

**Interdisciplinary  
Systems Research**

**Interdisziplinäre  
Systemforschung**

**4**

# **Industrial Robots Robots industriels Industrie-Roboter**

**Editor: Christof W. Burckhardt**



**Springer Basel AG**

**Editor / Herausgeber:**

Prof. Salomon Klaczko-Ryndziun  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,  
Schweiz / Switzerland

**Co-Editors / Mitherausgeber:**

Prof. Ranam Banerji, Temple University, Philadelphia  
Prof. Jerome A. Feldman, University of Rochester, Rochester  
Prof. Mohamed Abdelrahman Mansour, ETH, Zürich  
Prof. Ernst Billeter, Universität Fribourg, Fribourg  
Prof. Christof Burckhardt, EPF, Lausanne  
Prof. Ivar Ugi, Technische Universität München

**Interdisciplinary Systems Research**  
*Analysis – Modelling – Simulation*

*The system science has been developed from several scientific fields: control and communication theory, model theory and computer science. Nowadays it fulfills the requirements which Norbert Wiener formulated originally for cybernetics; and were not feasible at his time, because of insufficient development of computer science in the past.*

*Research and practical application of system science involve works of specialists of system science as well as of those from various fields of application. Up to now, the efficiency of this co-operation has been proved in many theoretical and practical works.*

*The series 'Interdisciplinary Systems Research' is intended to be a source of information for university students and scientists involved in theoretical and applied systems research. The reader shall be informed about the most advanced state of the art in research, application, lecturing and metatheoretical criticism in this area. It is also intended to enlarge this area by including diverse mathematical modeling procedures developed in many decades for the description and optimization of systems.*

*In contrast to the former tradition, which restricted the theoretical control and computer science to mathematicians, physicists and engineers, the present series emphasizes the interdisciplinarity which system science has reached until now, and which tends to expand. City and regional planners, psychologists, physiologists, economists, ecologists, food scientists, sociologists, political scientists, lawyers, pedagogues, philologists, managers, diplomats, military scientists and other specialists are increasingly confronted or even charged with problems of system science.*

*The ISR series will contain research reports – including PhD-theses – lecture notes, readers for lectures and proceedings of scientific symposia. The use of less expensive printing methods is provided to assure that the authors' results may be offered for discussion in the shortest time to a broad, interested community. In order to assure the reproducibility of the published results the coding lists of the used programs should be included in reports about computer simulation.*

*The international character of this series is intended to be accomplished by including reports in German, English and French, both from universities and research centers in the whole world. To assure this goal, the editors' board will be composed of representatives of the different countries and areas of interest.*

**Interdisziplinäre Systemforschung**  
*Analyse – Formalisierung – Simulation*

*Die Systemwissenschaft hat sich aus der Verbindung mehrerer Wissenschaftszweige entwickelt: der Regelungs- und Steuerungstheorie, der Kommunikationswissenschaft, der Modelltheorie und der Informatik. Sie erfüllt heute das Programm, das Norbert Wiener mit seiner Definition von Kybernetik ursprünglich vorgelegt hat und dessen Durchführung zu seiner Zeit durch die noch ungenügend entwickelte Computerwissenschaft stark eingeschränkt war.*

*Die Forschung und die praktische Anwendung der Systemwissenschaft bezieht heute sowohl die Fachleute der Systemwissenschaft als auch die Spezialisten der Anwendungsgebiete ein. In vielen Bereichen hat sich diese Zusammenarbeit mittlerweile bewährt.*

*Die Reihe «Interdisziplinäre Systemforschung» setzt sich zum Ziel, dem Studenten, dem Theoretiker und dem Praktiker über den neuesten Stand aus Lehre und Forschung, aus der Anwendung und der metatheoretischen Kritik dieser Wissenschaft zu berichten.*

*Dieser Rahmen soll noch insofern erweitert werden, als die Reihe in ihren Publikationen die mathematischen Modellierungsverfahren mit einbezieht, die in verschiedensten Wissenschaften in vielen Jahrzehnten zur Beschreibung und Optimierung von Systemen erarbeitet wurden.*

*Entgegen der früheren Tradition, in der die theoretische Regelungs- und Computerwissenschaft auf den Kreis der Mathematiker, Physiker und Ingenieure beschränkt war, liegt die Betonung dieser Reihe auf der Interdisziplinarität, die die Systemwissenschaft mittlerweile erreicht hat und weiter anstrebt. Stadt- und Regionalplaner, Psychologen, Physiologen, Betriebswirte, Volkswirtschaftler, Ökologen, Ernährungswissenschaftler, Soziologen, Politologen, Juristen, Pädagogen, Manager, Diplomaten, Militärowissenschaftler und andere Fachleute sehen sich zunehmend mit Aufgaben der Systemforschung konfrontiert oder sogar beauftragt.*

*Die ISR-Reihe wird Forschungsberichte – einschließlich Dissertationen –, Vorlesungsskripten, Readers zu Vorlesungen und Tagungsberichte enthalten. Die Verwendung wenig aufwendiger Herstellungsverfahren soll dazu dienen, die Ergebnisse der Autoren in kürzester Frist einer möglichst breiten, interessierten Öffentlichkeit zur Diskussion zu stellen. Um auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden in Berichten über Arbeiten mit dem Computer wenn immer möglich auch die Befehlslisten im Anhang mitgedruckt.*

*Der internationale Charakter der Reihe soll durch die Aufnahme von Arbeiten in deutsch, englisch und französisch aus Hochschulen und Forschungszentren aus aller Welt verwirklicht werden. Dafür soll eine entsprechende Zusammensetzung des Herausgebergremiums sorgen.*

# **ISR 4**

**Interdisciplinary Systems Research  
Interdisziplinäre Systemforschung**

# **Industrial Robots Robots industriels Industrie-Roboter**

*Proceedings · Comptes rendus · Tagungsberichte*

**Editor · Editeur · Herausgeber :  
Christof W. Burckhardt**

Nachdruck verboten

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen  
und der Reproduktion auf photostatischem Wege oder durch Mikrofilm  
vorbehalten.

© Springer Basel AG 1975

Ursprünglich erschienen bei Birkhäuser Verlag Basel 1975

ISBN 978-3-7643-0765-3 ISBN 978-3-0348-5530-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-0348-5530-3

## **Introduction**

The Industrial Robot—a programmable device capable of executing autonomously a number of manipulations in a production line—opens new perspectives in terms of progress in the mechanization of industrial production. It ought to be able to liberate man from dangerous, unpleasant and monotonous work. Industrial Robots made their first appearance in the USA in 1962 where they were mainly used in the automobile industry. Since then the number of manufacturers has increased substantially and Industrial Robots are currently finding ever widening fields of application.

Anyone wishing to learn something about Industrial Robots is somewhat confined to conferences and their proceedings as these are at the moment the best way to keep abreast of developments in this new and complex field. The "Journées de Microtechnique" take place every two years at the Swiss Institute of Technology in Lausanne and treat a different subject of current interest on each occasion. The subject chosen for October 1974 was the Industrial Robot in general, together with its precision engineering aspects.

The present proceedings although somewhat heterogenous, provide a brief introduction to this field and record the state of this technique, of a marked interdisciplinary nature, which is in constant and rapid development.

## **Préface**

Pour le progrès de la mécanisation de la production industrielle, le robot industriel — appareil programmable destiné à une multitude de manipulations qu'il exécute d'une façon autonome — ouvre de nouvelles perspectives et commence à jouer un rôle important. Il doit libérer davantage l'homme des travaux dangereux, désagréables et monotones. Les premiers robots industriels sont apparus en 1962 aux Etats-Unis et ont trouvé surtout un champ d'application dans l'industrie automobile. Depuis lors, le nombre de fabricants a fortement augmenté et les domaines d'application pour les robots s'étendent tous les jours.

Pour celui qui veut approfondir ses connaissances au sujet des robots industriels, les journées d'information et leurs comptes rendus sont actuellement le meilleur moyen pour se tenir à jour dans ce domaine nouveau et complexe. Les journées de Microtechnique ont lieu tous les deux ans à l'Ecole Polytechnique Fédérale à Lausanne sous le patronage de l'Association Suisse de Microtechnique (ASMT) et sont consacrées à un problème actuel. Celles qui ont été organisées en octobre 1974 étaient consacrées aux robots industriels, en général et aux robots en relation avec la microtechnique, en particulier.

Les comptes rendus présentés, caractérisés par une certaine hétérogénéité, introduisaient le sujet et donnaient l'état de la technique, de nature interdisciplinaire, qui se développe rapidement.

## **Vorwort**

Für den Fortschritt der Mechanisierung der industriellen Produktion eröffnet der Industrieroboter — ein programmierbares Gerät, das in einem Produktionsablauf eine Vielzahl von Handhabungen autonom ausführen kann — neue Perspektiven und spielt daher in neuester Zeit eine wachsende Rolle. Er soll den Menschen vermehrt von gefährlicher, unangenehmer und monotoner Arbeit befreien. Im Jahre 1962 tauchten in den U.S.A. die ersten Industrieroboter auf, die vor allem Anwendung in der Automobilindustrie fanden. Seither hat sich die Zahl der Hersteller stark vermehrt, und laufend werden neue Einsatzgebiete für Industrieroboter bekannt.

Für jenen, der sich auf dem Gebiete der Industrieroboter weiterbilden will, sind Tagungen und Tagungsberichte zurzeit das beste Mittel, um sich in diesem neuen komplexen Gebiet auf dem Laufenden zu halten. Die „Journées de Microtechnique“, die alle zwei Jahre an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne unter dem Patronat der Schweizer Gesellschaft für Feintechnik (SGFT) stattfinden und jeweils einem aktuellen Problem gewidmet sind, haben im Oktober 1974 den Industrieroboter im allgemeinen und aus der Sicht der Feintechnik behandelt.

Der vorliegende Tagungsbericht gibt trotz einer gewissen Heterogenität der Beiträge eine leicht verständliche Einführung in das sich schnell entwickelnde, interdisziplinäre Gebiet und vermittelt den technischen Stand 1974.

**Professor Dr. C.W. Burckhardt**  
Institut de Microtechnique de l'EPF-Lausanne  
114, Route cantonale 1025 St-Sulpice

## **Table of Contents**

### **Table des matières**

### **Inhaltsverzeichnis**

Summaries in English	9
S. Balmer: L'homme et le robot	22
C.W. Burckhardt: Où en sont aujourd'hui les robots?	34
W. G. Lamb: UNIMATES at Work	54
K. Aareskjold: The TRALLFA Robot—A Guide to Automated Continuous Motion	68
X. B. Ghali: L'ingénierie des robots industriels	92
G. Herrmann: Ergebnisse und Folgerungen aus Arbeitsplatzanalysen für Aufbau und Anwendung von Industrierobotern	97
W. Chevalier: Exemple de l'analyse d'une place de travail en vue de l'application d'un robot	113
R. J. Popplestone: Automatic Assembly with the Edinburgh Arm-Eye System	134
D. Helms: La commande du robot	152
C.W. Burckhardt et M.-O. Demaurex: Le développement d'un robot pour la microtechnique	168
G. Coray: Langages de programmation pour la commande de robots	176
G. Bullat: Les chances du robot dans l'industrie horlogère	186
F. Pruvot: L'avenir du robot dans un système de production	201
Discussion à la table ronde	218



## MAN AND ROBOT

S. Balmer

### The world and its demographic evolution

Today we are 4 billions individuals in the world, but barring accidents tomorrow we will be 7 billions. The demographic increase of the wealthy is modest, that of the poor is enormous.

What are the remedies ? The rich must help especially by learning to produce, to consume, to live and consequently to transmit improved knowledge.

### Switzerland and its duties

Support the "preactives" and the "postactives", the young and the old, as well as the disabled, i.e. to make the "actives", who are becoming less numerous, to carry on ever growing load.

### Products and means of production

Maintain product performance, while simplifying design to the utmost; aim at standardization, avoid overspecification.

Develop automation by simpler means as investments will be costlier and equipment will have to be written off over ever shorter periods. This is why industrial robots are becoming interesting as a means of simplifying production.

### Man or robot

A parallel can be drawn between the human-worker of the beginning of the industrial era and the robot of tomorrow. Research must define the robot, calculation its profitability.

### Normal situation - Crisis situation

Every enterprise must make long term forecasts, it cannot foresee everything. Hence one must be ready to react rapidly to crisis situations.

Should the need arise, it will be better to put the robots out of work than men.

WHERE ARE THE ROBOTS TODAY ?

C.W. Burckhardt

There are several definitions for the industrial robot. One valid definition of the non-intelligent robot which is on the market today is:

a universal handling device that has several degrees of freedom in its movements and that is capable of being programmed.

A distinction is made between industrial robots and other similar devices. The mechanical structure of the robot is described as are some of the existing means for controlling it. The problem of programming industrial robots is also presented.

Some typical applications of robots are described. Two tendencies appear among the producers of robots: the universal robot having at least 6 degrees of freedom which can be programmed by a universal electronic controller or a minicomputer and the modular robot having two to six degrees of freedom and rather simpler programming.

Some aspects of the robot of the future are described. In particular, research being undertaken in different laboratories throughout the world are enumerated.

The transition from non-intelligent robots to intelligent robots will occur gradually. For automatic assembly, a robot possessing a tactile sense will be needed. If the robot will be expected to grasp loose mechanical parts, it will have to be equipped with a visual sense and a system of pattern recognition.

At present the field of robots is not very developed in Switzerland. However, the Federal Institute of Technology in Lausanne is making an effort to catch up the delay Switzerland has in the development and application of industrial robots.

UNIMATES AT WORK

W.G. Lamb

Unimate Industrial Robots have been at work in widely diverse industrial applications for over 12 years. This paper reviews some of the more recent applications for which the Robot has only recently gained acceptance. With over 3.000.000 hours of field work the Unimate Robot is now an experienced tool with a proven record of reliability in many industries. What of the future ? A brief resume of the developments which will be available to the potential user shortly.

TRALLFA ROBOT

K. Aareskjold

The TRALLFA Robot is a "multi-purpose programmable memory-controlled Robot", designed for industrial application processes.

The TRALLFA Robot is programmed to work by leading the robot arm with the attached spraying equipment manually through the desired coating operation. The movements produced during the teaching sequence will be recorded in digital form on magnetic tape in the recorder situated in the control unit of the machine, and a total of 5 switched output functions can be taught in a program covering any period of time and in any desired sequence.

The arm of the TRALLFA Robot is powered by five hydraulic actuators. Each actuator contains its own separate position measuring system, which will supply analog signals corresponding to every position that an actuator can assume. During the teaching sequence these signals will, in the electronics of the control unit, be converted to groups of digital information. Every 1/80 of a second the digital information of all actuators will simultaneously be sampled and recorded on a continuously moving magnetic tape.

This process is repeated automatically as long as the magnetic tape is moving. When the robot is placed in the REPEAT mode and the hydraulic system is energized and the tape has been started normally, by an external start signal, it will transmit information to the control unit for comparison to the actual position of the actuators. Any positional discrepancy between the tape and the actuators will cause the corresponding servo valves to drive the actuators and align them in the desired position.

As the positional data changes the actuators will follow, reproducing the movements initially recorded.

Industrial coating is undertaken by a wide range of applications like painting, enamelling and powdering, and the TRALLFA Robot is suitable for all of them.

THE ENGINEERING OF INDUSTRIAL ROBOTS

X.B. Ghali

To start with, some figures are given to situate the significance of industrial robots. Currently some 3800 robots are in use throughout the world. It is essential to study the system "man-robot-machine" as a whole and from the point of view of different factors which are of a technical, economical and social nature.

When investigating the use of an industrial robot, one is generally confronted with the same problems that arise when installing an information handling system. Someone has to produce the appropriate software and the engineering.

Arising from the experience gained in the implantation of industrial robots, the following important conclusions can be drawn:

- define exactly the condition for using the robot
- determine the characteristics of the production units to be serviced by the robot
- determine the marginal conditions such as space available, energy supply, servicing facilities etc.
- study profitability
- take the possible social consequences into account.

The author concludes with some observations he was able to make while working with his company "Robotronics and Technics AG".

RESULTS AND CONCLUSIONS OF WORK PLACE ANALYSIS APPLIED TO THE DESIGN AND THE APPLICATION OF INDUSTRIAL ROBOTS

G. Herrmann

On the European market there are at present approximately 35 different types of industrial robots. A recent inquiry shows that of 650 units, divided into 5 different types, 90% are employed for either spray painting or spot welding.

In order to determine why the introduction of industrial robots in other areas of production has been slow and why the application of differently conceived apparatus designed to automate existing work places has not been as fast as might be expected, the institute where the author works has carried out more than 100 analyses of work places over the passed years.

The analyses have shown that materials handling and machining are only a fraction of the work carried out by the personnel; the fact is a good part of the work consists of quality control applied to the work-piece and to the tools. It is very important to note these relative proportions if industrial robots are to be introduced with success. The less non-productive work elements there are the easier is the automation of the work place by industrial robots. The different fields of production have to be examined from this point of view.

There are work places which seem to lend themselves ideally to the application of industrial robots. These are the ones that have to be analysed in detail for the same characteristics as those of the industrial robot, specially the degrees of freedom, the working volume, the angles, the forces etc. The results obtained in this way were compared with the characteristics of robots that exist already.

The comparison shows that the requirements obtained from the analyses coincide, in general, quite well with the characteristics of existing instruments.

On the other hand it can be shown that for a reasonable technical and economical effort many work places can only be automatised by a modular system.

EXAMPLE OF THE ANALYSIS OF A WORK PLACE WITH A VIEW TO THE APPLICATION  
OF A ROBOT

W. Chevalier

Hermes Precisa International S.A., Yverdon, occupies an industrial sector where automation is rapidly reaching its limits owing to the limited batch size and the great variety of pieces manufactured. Consequently, the industrial robot has been studied with interest from its first appearance as a possible means of automation. Some studies have been undertaken and one project is on the way to being put into practice.

It is this project, the loading and unloading of two semi-automatic lathes including the transfer of the machined part from one lathe to another by an industrial robot in the production link making typewriter segments, which is the object of this analysis.

It comprises the examination of the following points:

- the present method
- the specifications of the equipment proposed
- the function and the description of the entire set and of every component needed, i.e. robot, storage device, accessories and control device.

The analysis of this work place shows that with the first generation of industrial robots the accessories represent costwise practically the same investment as the robot itself. Applications of this type will be economically worthwhile only with the arrival of more sophisticated robots provided they will become available at a reasonable price.

THE EDINBURGH ARM-EYE SYSTEM

R.J. Popplestone

A film showing the Edinburgh Robot assembling a toy car and a toy boat from a random pile of parts was presented. The techniques used in the computer program controlling the robot are described, together with the way the components of the car and boat are located and recognised by their silhouette, how unidentified heaps of components are separated, using the "hand" and how the system is "taught" to recognise components and to pick them up.

How the hand uses its sense of touch to assist it in assembling the components is also considered. The basic commands available in programming the assembly are discussed.

The paper concludes with a brief description of the present work on sensing and interpreting the 3-dimensional form of bodies and describes how it is proposed to use the body-models so derived to produce a robot device that can be more easily instructed to perform an assembly task.



THE CONTROL OF ROBOT

D. Helms

The paper first gives a general survey of the different types of controllers used on today's robots. The principles of positioning point by point and of creating continuous trajectories are explained together with the technical means of achieving them. Whereas present industrial robots generally don't have any sensory organs, television cameras and tactile sensors are today already essential components of research robots allowing them to adapt their operations to a varying environment.

In the future, the use of tactile sensors will present a first phase in the application of new techniques to industrial robots.

Assembly generally needs the measurement of forces. The field of application of a robot having some tactile sense seems therefore quite promising.

In conclusion an example of programming a robot possessing tactile sense is given with some idea of the information handling required to put it to work.

THE DEVELOPMENT OF A ROBOT FOR PRECISION MECHANICS

C.W. Burckhardt and M.-O. Demaurex

The paper starts with a definition of "microtechnique" (fine mechanics at the industrial level). Specifications for an industrial robot usable in this field are developed.

Some peculiarities of this application are given, notably the need for great precision coupled with high operating speed. A further difficulty is that the work pieces are mostly presented lying loose in a container.

From these conditions one can determine the limits of present technology and define the problems requiring further research.

It is shown how a choice can be made among different solutions for the mechanical lay-out and the motors. The general concept of a robot for handling and assembling is discussed.

A film presents some of the projects carried out at the "Institut de Microtechnique".

PROGRAMMING LANGUAGES FOR CONTROLLING ROBOTS

G. Coray

The aim of this paper is to show certain similarities between two types of automatic machines:

The robots and the computers.

The comparison allows a rapid survey of the development of programming languages for computers.

The trend observed can be transposed to the field of intelligent robots, a rapidly developing field.

THE CHANCES OF THE ROBOT IN THE WATCH MAKING INDUSTRY

G. Bullat

Until recently a luxury product the watch has now become a mass produced item. This development coincided with the attacks of a ferociously dynamic competition from outside Switzerland. To maintain its high standard, watch-making, considered by many as one of Switzerland's most favoured industries, had to introduce rapidly the most up-to-date production methods.

As a result the industrial robot is forced to forge its place in an environment that is already highly automated. Obviously its chances of success depend on its capacity of adaptation to the fast rhythm of production and the extent to which it can fill gaps left by the present automats.

THE FUTURE OF ROBOTS IN A PRODUCTION SYSTEM

F. Pruvot

It is obvious that robots will be used to a great extent in industry. They will certainly be used for repetitive tasks where their versatility allows them to carry on without the need of making a new study for every task. Yet, on the other hand the robot will also be particularly suited to tasks comprising variables and even unknowns. The aim of this paper is not to provide new arguments in favour of robots but rather to try to specify their capabilities. Starting from this an attempt is made to deduce the external and internal structure of the robot of the future. The problem of its layout is tackled and finally it is tried to show how products will have to be modified so as to be adapted to the modern means of manufacturing and in particular to robots; all this with a view to the fact that this will merely be the starting point of a permanent interaction between the product and the means of producing it which will ultimately lead to a better economic concept and a more interesting life for man.

Some particular points are high lighted:

- In large production systems such as the manufacturing of automobiles today, the main field of application of robots is materials handling.
- A fundamental characteristic of robots should be that they are modular. This modularity has not only to exist at the mechanical level, but also at the control level.
- Robots will have to evolve continuously. Today they still are not reliable enough and they are too expensive.

L'HOMME ET LE ROBOT

par S. Balmer, Président de la Direction générale d'EBAUCHES S.A.

1. Le monde et l'évolution démographique

Un thème vraiment à l'ordre du jour est celui de l'expansion démographique de notre planète.

Nous étions en 1900	-	1½ milliard
Nous sommes aujourd'hui	-	4 milliards
Nous serons en l'an 2000	-	7 milliards

Et aujourd'hui déjà, nous sommes assez "coincés".

---

Cette expansion n'est pas équilibrée:

- Certaines régions ne bougent plus ou sont même en régression.
- D'autres ont un taux de croissance inouï.

Le malheur veut que ce soit justement ceux à croissance zéro qui soient les plus conscients des dangers que représente cette expansion et proposent des remèdes tels que la pilule ou le robinet.

Bien avant de proposer un remède, il est de bonne logique de connaître le mal et les causes du mal. Et, dans le cas particulier, nous sommes loin de connaître le mécanisme de l'évolution, donc,

bien loin de pouvoir proposer un correctif sérieux.

---

Nous avons, en simplifiant un peu

- |  |      |  |
|--|------|--|
| - des groupes à faible progression démographique | avec | une économie forte, une forte production et une forte consommation     |
| - des groupes à forte progression démographique  | avec | une économie faible, une faible production et une faible consommation. |

Partant du principe que taux de croissance et richesse de l'économie sont liés, ce qui n'est pas encore prouvé, nous proposons l'amélioration du niveau de vie comme frein à la prolifération.

Nous proposons donc de corriger une divergence trop marquée - d'où deux solutions qui ne diffèrent que par les temps de réaction.

#### Première solution

Grouper des forts et des faibles, donc créer une large communication entre forts et faibles. Le déséquilibre numérique est tel que le niveau de l'économiquement faible serait à peine modifié, alors que le fort serait presque entièrement dépouillé.

Deuxième solution

Elever progressivement le niveau des économiquement faibles en demandant aux forts de produire un surplus pour les faibles, tout en apprenant aux faibles à produire pour eux-mêmes. Cette deuxième solution semble acceptable.

Mais si "produire" et "consommer" entraînent nécessairement des modifications aussi profondes que celles que nous venons de vivre dans "l'environnement" alors que deviendra notre globe si les 5 à 7 milliards de consommateurs se mettent au diapason des quelques privilégiés actuels.

Nul doute que nous devons

APPRENDRE A PRODUIRE

APPRENDRE A CONSOMMER

APPRENDRE A VIVRE

tout en transmettant progressivement nos connaissances améliorées à ceux qui en ont besoin.

Je vais abandonner ce thème trop général. Il est traité par des commissions réunissant des compétences du monde entier à qui nous ferons confiance et, avec votre accord, je vais le ramener à la dimension Suisse, puisque nos journées sont patronnées par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et l'Association Suisse de Microtechnique.



## 2. La Suisse

La population suisse totale évolue faiblement, mais la structure de la population se modifie sensiblement

- les "préactifs" sont en forte croissance, toujours plus d'étudiants, des études toujours plus longues
- les "postactifs" sont également en croissance, on arrête de travailler plus tôt, on vit heureusement plus longtemps

et ces deux groupes ont de plus des exigences toujours croissantes, nous nous en réjouissons.

- les "actifs" bloqués entre ces deux groupes, sont donc toujours moins nombreux, avec un bagage de charges toujours plus lourd. Aux charges indirectes s'ajoute la croissance de leur besoin propre.

Combien de temps ces "actifs" - que certains baptisent aujourd'hui déjà "Lastenesel" - tiendront-ils le coup ?

Résisteront-ils à un incident provoquant une brusque augmentation de la charge spécifique due par exemple à une initiative tendant à réduire la population étrangère ?

Nous voyons que pour nous Suisses, nous avons des actifs toujours moins nombreux

- devant supporter les charges "extérieures" d'assistance aux pré-térités

- devant couvrir des besoins "internes" toujours plus importants.

L'assistance aux préterités se fera en déplaçant les produits qui sont à leur portée et en conservant chez nous les produits les plus sophistiqués. Ce déplacement doit correspondre aux besoins et possibilités des territoires choisis et ne pas perturber leur équilibre souvent précaire. Il est par exemple parfaitement idiot d'implanter aux Indes une production automatisée de sandales en matière synthétique, alors que la matière doit être importée, que l'énergie manque, que la main-d'oeuvre est largement disponible et qu'une telle opération tue l'artisanat local. (Et pourtant, l'on cite le cas d'idioties de cette dimension).

Donc

Déplaçons du travail, mais à bon escient

et ne déplaçons pas simplement le "sale" travail que plus personne ne veut faire chez nous.

---

Nous freinerons la croissance de nos besoins "internes" en apprenant à consommer, en apprenant à vivre. Nous couvrirons le solde de la croissance des besoins en produisant mieux

- par une meilleure conception de nos produits;
- par une meilleure conception de nos moyens de production.

C'est ces deux derniers aspects que je vais développer - car ils sont liés - mais je mettrai l'accent sur les moyens de production.

### 3. Les produits industriels et les moyens de production

A performance égale, le produit actuel est infiniment plus simple que celui d'il y a vingt ans. Le constructeur a donc obtenu de beaux résultats.

Pour réaliser un même produit, il nous faut aujourd'hui infiniment moins de "temps homme" qu'il y a vingt ans. Les ingénieurs de production ont donc fait du bon travail.

Mais ces progrès ne semblent plus suffisants - en tout cas pas dans tous les domaines - puisque le coût des produits évolue défavorablement et que la croissance de notre PNB s'essoufle.

---

Avouons que bien de nos produits souffrent encore de perfectionnisme, que la construction dépouillée, dans laquelle la fonction est assurée avec un minimum de composants simples n'est pas encore partout notre point fort.

Avouons aussi que trop de produits de même famille, conçus et réalisés dans une même entreprise, sont constitués d'une foule d'éléments spéciaux, alors qu'avec un nombre limité de composants de base, nous pourrions, dans le style mecano, obtenir la diversité nécessaire ou indispensable.

En résumé, encore trop de composants complexes et trop de composants différents voire inutiles d'où, difficulté d'automation et dispersion des forces et des capitaux.

---

Si nous voulons poursuivre efficacement notre effort, nous devons rationaliser à fond nos produits - nous disposons encore de réserves - et renforcer nos moyens de production.

Mais nos moyens de production coûteront toujours plus cher, les moyens financiers nécessaires seront donc toujours plus considérables, donc toujours plus rares et plus onéreux.

Comme l'évolution des produits et des technologies est toujours plus rapide, les moyens traditionnels d'automatisation, adaptés à un type de produit ou de technologie bien défini, devront s'amortir toujours plus rapidement !

Une spirale impossible, les coûts seront inaccessibles. Seules quelques industries privilégiées, profitant d'une relative stabilité des produits et de séries excessivement importantes pourront se payer ce luxe.

---

L'automatisation nouvelle ne pourra se faire qu'avec des groupes de machines et d'outils simplifiés, bon marché, réalisant des opérations qui ne se modifient pas trop dans le temps, donc des opérations élémentaires.

La liaison entre les machines, c'est-à-dire la succession des opérations élémentaires, sera assurée par "quelque chose" d'universel, facilement adaptable, capable de mouvements les plus complexes, capable de répéter ces mouvements, capable de réagir lorsque tout ne se déroule pas normalement.

Et ce quelque chose, en fait, c'est vraiment l'homme-ouvrier tel qu'on le concevait au début de l'ère industrielle.

On lui demandait :

- d'être présent lorsqu'on avait besoin de lui
- de ne rien coûter lorsqu'on n'avait plus besoin de lui
- de répéter inlassablement et sans rouspéter les mêmes tâches
- de réagir en cas de "pépin"
- et surtout, de ne pas réfléchir au-delà de sa tâche.

C'est donc cet homme-ouvrier ou esclave-ouvrier qui nous manque aujourd'hui et nous manquera bien plus encore demain si tout se développe comme nous le pensons. Son remplaçant, c'est notre fameux Robot.

#### 4. L'homme, le robot, le calcul de rentabilité

- Si je devais établir, pour un groupe d'ingénieurs, le cahier des charges du Robot industriel, je prendrais pour base "le portrait robot" de l'ouvrier du début du siècle, celui que je viens de vous donner et croyez-moi, aussi macabre que cela puisse paraître, je ne serais pas loin de la réalité.
- En tant qu'industriel, je devrais évidemment compléter ce cahier des charges par l'indication du prix maxi que je suis prêt à payer pour ce robot. C'est ce que je vais m'efforcer de faire à l'aide d'un calcul très simplifié.

- Ne prenez pas mon calcul trop au sérieux, il existe des méthodes plus techniques d'approche, je vous renvoie, par exemple, à l'excellent ouvrage "Capital investment manual" de Roche.
  - Pour être plus complets sur le plan technique, ajoutons que notre "robot industriel" est constitué de deux éléments principaux, l'élément pensant et l'élément exécutant (le cerveau et le corps), que la partie pensante peut commander directement la machine, sans passer par le corps, que nous pouvons donc concevoir un robot qui ne soit qu'une tête.
- 

## 5. Situation normale

### Situation de crise

L'introduction du robot dans l'atelier doit être préparée avec soin, car le robot prend la place de l'homme, et si l'homme ne voit pas l'ensemble du problème, il risque d'être profondément touché.

Pensons à la réaction provoquée par l'ordinateur chez le personnel de bureau et multiplions-la par le facteur 10 ou 100 et nous comprendrons ce qui peut se passer.

Ne répétons pas nécessairement les erreurs commises avec l'ordinateur:

- dans le cas du robot, je vous ai suggéré de revoir la conception de nos produits et de nos techniques de production;
- avons-nous tous revu nos besoins en information et notre organisa-

tion, avant de lancer l'ordinateur ?

---

En industriels conscients de nos responsabilités, nous introduirons d'abord le robot là où il soulage vraiment le travailleur, là où il nous permet de donner à l'homme la possibilité de son plein épanouissement.

En industriels, nous calculerons nos risques en examinant le problème sous les deux aspects

- de la situation normale, conforme à nos prévisions

- de la situation de crise, dans laquelle tout est remis en question

En cas de crise, soyons prêts à mettre nos robots au "congélateur", car dans un tel cas, l'homme préférera reprendre n'importe quel travail répétitif, plutôt que de moisir dans l'oisiveté. L'opération "congélateur" peut nous donner un léger répit et nous permettre de passer le creux de la vague.

Tenons donc largement compte du facteur insécurité dans notre calcul de rentabilité.

C'est pourquoi, j'ai barré le tableau précédent d'un large

ATTENTION CRISE

## 6. Conclusion

Les conférenciers qui vont suivre vous présenteront des aspects plus techniques et vous en tirerez grand profit, car le robot touche tous les domaines de l'ingénieur.

Pour ma part, j'ai bâti mon exposé sur tous les grands titres de la presse de ces derniers mois. Permettez-moi de vous les passer en revue, l'image résumera ma pensée bien mieux que je ne pourrais le faire.



1870	Cahier des charges comparatif	1974
Ouvrier-esclave	Caractéristiques	Robot
Aucune sécurité sociale	Ne rien coûter lorsqu'on n'a plus besoin de lui	Amortissement (Prix/Performance)
Fidélité - Santé	Etre disponible lorsqu'on a besoin de lui	Fiabilité
Facilité d'adaptation	Apprendre rapidement	Programmation simple
Pas d'infirmité	Capable de mouvements complexes	Electronique et Mécanique
Intelligence suffisante	Capable de réagir en cas de "pépin"	Senseurs, palpeurs
Pas de syndicat	Ne jamais "rous-péter"	Mécanique silencieuse

PRIX MAXI D'UN ROBOT

40 ans	1 Homme	8 Robots
1. Amortissement	1'000'000.--*	4'844'000.--***
2. Frais de fonction Salaire / Energie	1'200'000.--	300'000.--
3. Frais d'entretien Charges sociales 30 % Réparations	350'000.--	1'000'000.--
4. $\Sigma$ 1 + 3	2'550'000.--	6'144'000.--
5. Heures d'utilisation	80'000	192'000 **
6. Taux horaire	32.--	32.--

\* Homme y compris frais de formation  
Capital investi = 650'000.--  
(Valeur assurance)

\*\* Robot: 300 j. - 2 équipes - 8 heures

\*\*\* Robot  
Capital investi par unité =  $\frac{3'800'000}{8}$  = 475'000.--

IL EXISTE DES METHODES D'APPROCHE PLUS SERIEUSES

## QU'EN SONT AUJOURD'HUI LES ROBOTS ?

C.W. Burckhardt, Institut de Microtechnique de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

### 1. Définition

Tout d'abord, nous décrirons ce qu'est un robot, puis ses possibilités d'utilisation et finalement son développement futur et ce que nous pouvons faire en Suisse pour combler notre retard dans le domaine des robots industriels.

Sur le plan scientifique et technique, le robot industriel d'aujourd'hui n'apporte rien de nouveau. Les techniques de la construction mécanique, de l'entraînement, de la commande, de la programmation sont bien connues et il suffit de les mettre ensemble pour en faire un robot. Malgré cela, les robots ont des caractéristiques particulières et une nouvelle discipline se dessine: on parle, par exemple, de "robotics". Pour un jeune ingénieur, l'étude des robots industriels est intéressante, car c'est essentiellement une tâche interdisciplinaire.

Le robot industriel trouve sa place entre les machines de production spécialisées et l'homme; il est beaucoup plus facile à programmer et beaucoup plus universel dans son emploi qu'une machine spécialisée, mais il ne sera jamais aussi adaptable qu'un ouvrier.

Voici une définition du robot industriel qui vient des Etats-Unis: c'est un appareil programmable qui, dans une chaîne de production, peut faire une multitude de manipulations d'une façon autonome. Il y a deux aspects à relever: on peut le programmer et il est universel dans son emploi.

Voici une deuxième définition qui est plutôt utilisée en Europe, particulièrement en Allemagne: le robot industriel est un manipulateur équipé de plusieurs degrés de liberté, il peut être muni de pinces ou d'outils et il travaille d'une façon automatique. Avec cette définition, la structure du bras apparaît avec ses articulations, mais cette définition n'inclut pas un robot plus évolué qui aurait des yeux et peut-être d'autres organes pour avoir une interaction avec son entourage.

Une troisième définition est proposée: le robot industriel est un appareil de manipulation programmable et anthropomorphe. Sa ressemblance avec l'homme ne doit pas être extérieure, mais dans son fonctionnement. Le robot doit remplacer l'ouvrier esclave qui a un bras et un oeil.

Après ces quelques définitions, il semble opportun de délimiter la notion "robot industriel" en décrivant les appareils qui n'en sont pas:

- Le manipulateur simple: C'est un manipulateur équipé de griffes ou de dispositifs magnétiques en son extrémité. Il permet de déplacer une pièce d'une position à une autre. Ces manipulateurs simples ne sont pas très universels, ni facilement programmables. Les programmes réalisables sont très limités et les mémoires pour les positions se trouvent sur la partie mécanique sous la forme de butées.
- La machine-outil à commande numérique. Elle est bien programmable, mais pas très universelle: une fraiseuse qui ne peut rien faire d'autre que de fraiser. Il ne s'agit donc pas d'un robot. Certaines machines-outils universelles sont équipées pour faire une multitude d'opérations sur une pièce: tourner, fraiser. Ce sont des machines universelles, mais non pas des robots. On parle de centres d'usinage automatiques.
- Le télé-opérateur. Il a l'aspect extérieur d'un robot; il comprend des articulations, des pinces, mais il n'est pas autonome. Un homme doit le guider et les mouvements de l'opérateur sont transmis à distance sur le manipulateur. Ces engins sont utilisés dans les centrales nucléaires et en général dans des environnements dangereux.

## 2. Structure mécanique et commande.

La première question qui nous intéresse dans la conception d'un robot est celle des degrés de liberté. On exige d'un robot qu'il déplace un objet dans une position de l'espace et le transporte dans une autre position. Dans les cours de mécanique élémentaire, on apprend que pour définir la position d'un corps rigide, il faut 6 coordonnées. Pour définir un point, il faut 3 coordonnées de l'espace et pour définir la position d'un corps par rapport à ce point, il faut encore 3 coordonnées de rotation.

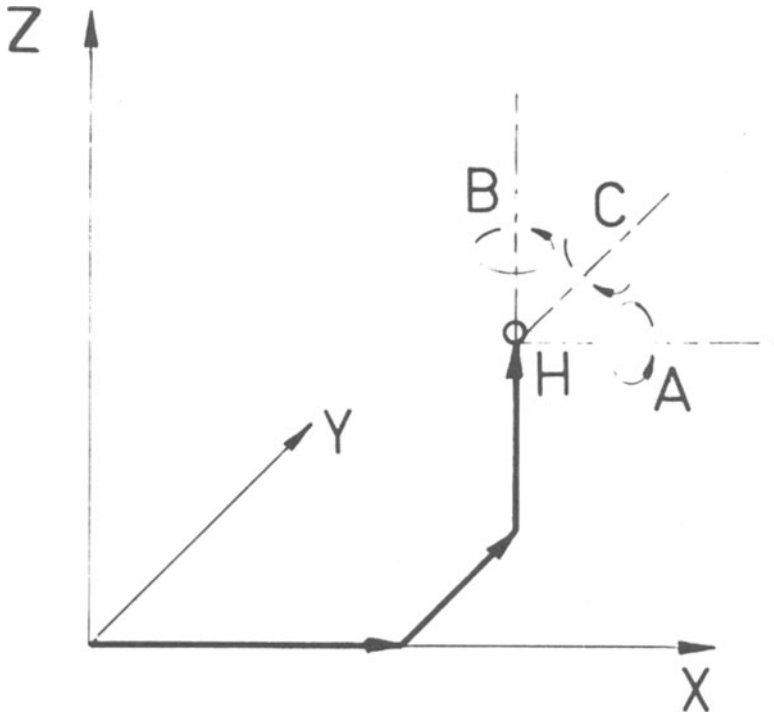


Figure 1: Système de coordonnées.

La figure 1 montre un système de coordonnées. Les trois coordonnées de l'espace sont cartésiennes, les trois rotations pour définir la position du corps sont les angles d'Euler. Si l'on déplace un corps d'une position dans une autre, il faut, dans le cas général, déterminer les variations des 6 coordonnées et donc les commander. Cela veut dire que dans le cas le plus général, le bras de manipulation doit avoir 6 degrés de liberté. En réalité, les robots sur le marché n'ont souvent que 5, 4 ou même 3 degrés de liberté. Il y a un intérêt à concevoir un bras à 7 degrés de liberté. Le bras humain

en a aussi 7. Ce septième degré de liberté ne contribue en rien au mouvement de la main, mais il permet un mouvement du coude qui peut servir à éviter des obstacles, ce qui peut être très important si l'on veut faire un montage avec un robot. Le nombre des degrés de liberté, donc le nombre des articulations est une caractéristique très importante d'un robot industriel.

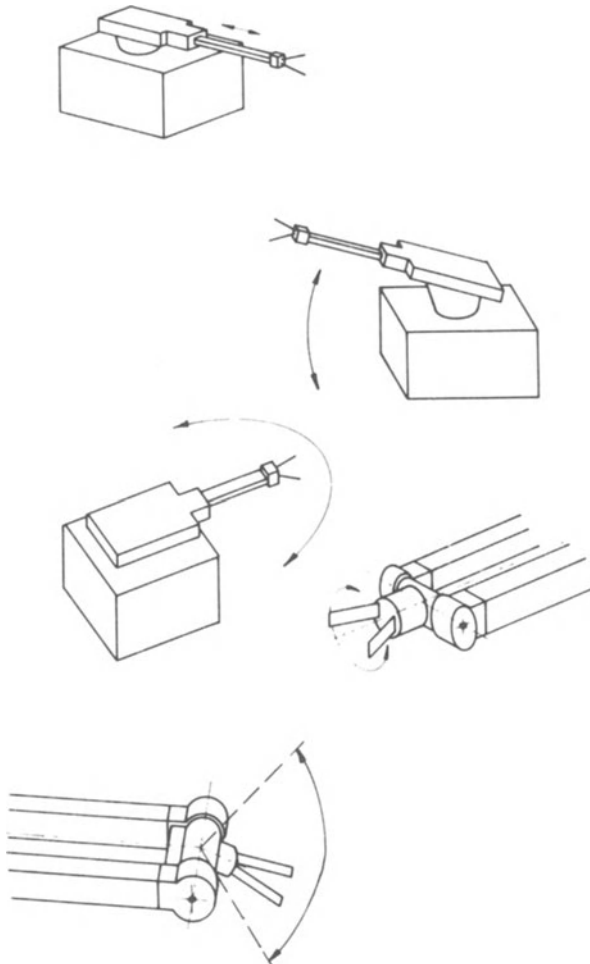


Figure 2: Robot Unimat Mark 2.

La figure 2 montre le robot Unimat Mark 2 qui a déjà 5 ans. Ce robot a 5 degrés de liberté. Il peut allonger, lever et baisser son bras; il peut tourner et il a deux articulations dans le poignet. Pour être absolument universel, il manque un 6ème degré de liberté.

Pour le constructeur mécanique, une autre question étroitement liée aux degrés de liberté concerne les différentes façons de réaliser les trois coordonnées de l'espace.

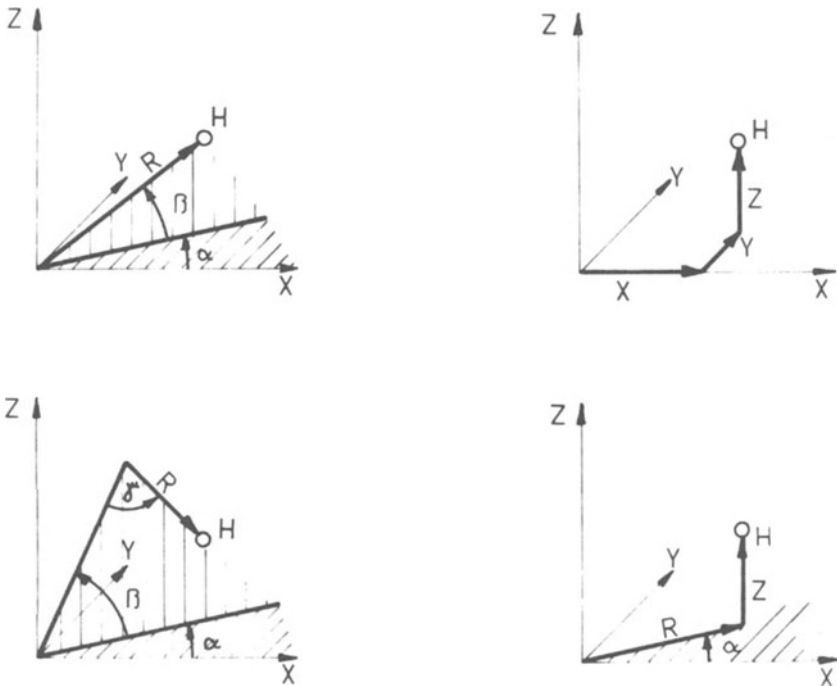


Figure 3: Coordonnées: sphériques, cartésiennes, angulaires, cylindriques.

Sur la figure 3, il y a tout d'abord des coordonnées cartésiennes. Pour atteindre un point, il y a trois déplacements linéaires. Dans le cas des coordonnées cylindriques, il y a une rotation et deux déplacements linéaires. Dans le cas des coordonnées sphériques, il y a deux rotations et un déplacement

ment linéaire. Il existe une quatrième possibilité qui n'est pas mentionnée dans les cours de géométrie, c'est définir un point avec trois angles; on parle de coordonnées angulaires. Le constructeur mécanique aime bien ce dernier système de coordonnées, car il peut faire des constructions avec articulations de rotation qu'il préfère aux déplacements linéaires.

Il existe plusieurs manières d'entraîner les articulations. Chaque degré de liberté a besoin d'un entraînement séparé. Le cas le plus simple est celui de l'entraînement pneumatique présenté à la figure 4 qui permet normalement un mouvement d'une butée à une autre. La programmation est simple, mais on peut à peine appeler robot ce manipulateur qui a des butées fixes et des fins de course.

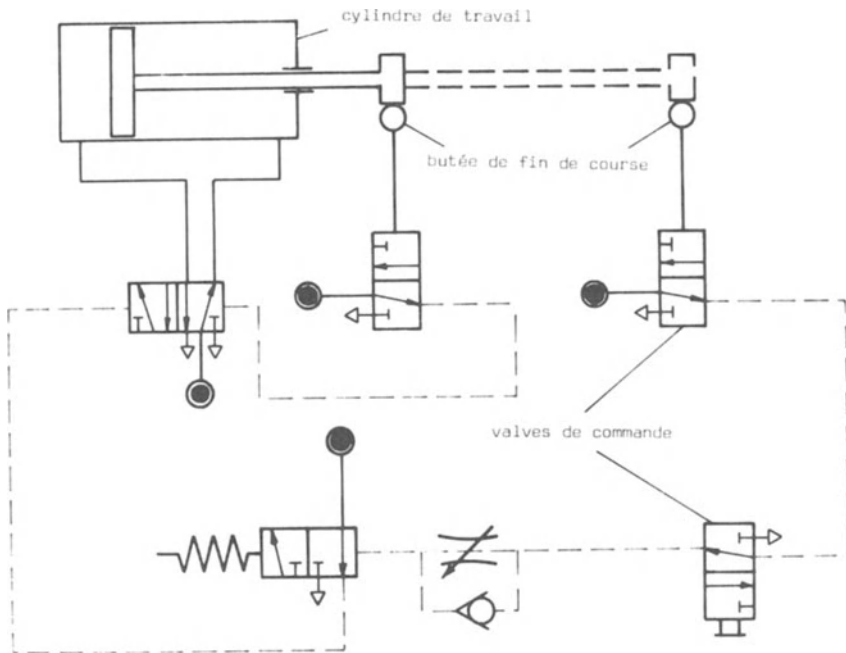


Figure 4: entraînement pneumatique.

Pour faire les commandes pneumatiques continues qui sont présentées à la figure 5, il faut combiner un piston pneumatique avec une crémaillère munie d'un capteur de position et d'un frein électro-magnétique. Ceci permet d'atteindre n'importe quelle position de la portée du piston selon le programme.

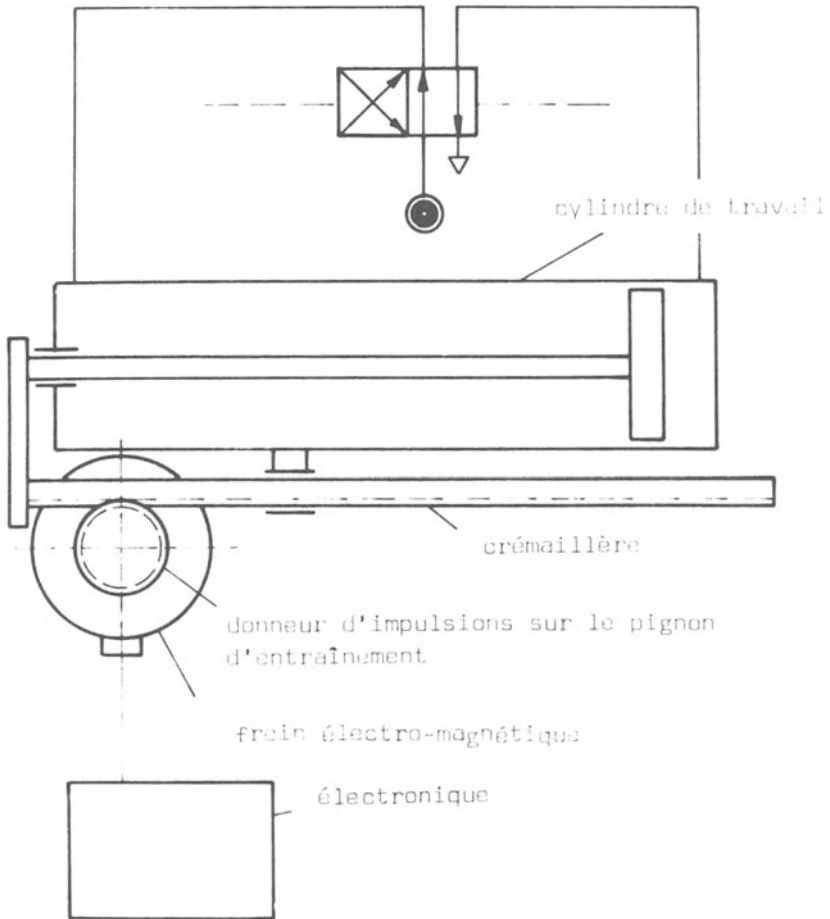


Figure 5: Commande électro-pneumatique.



Ce qu'on utilise le plus souvent dans les robots c'est la commande hydraulique présentée à la figure 6.

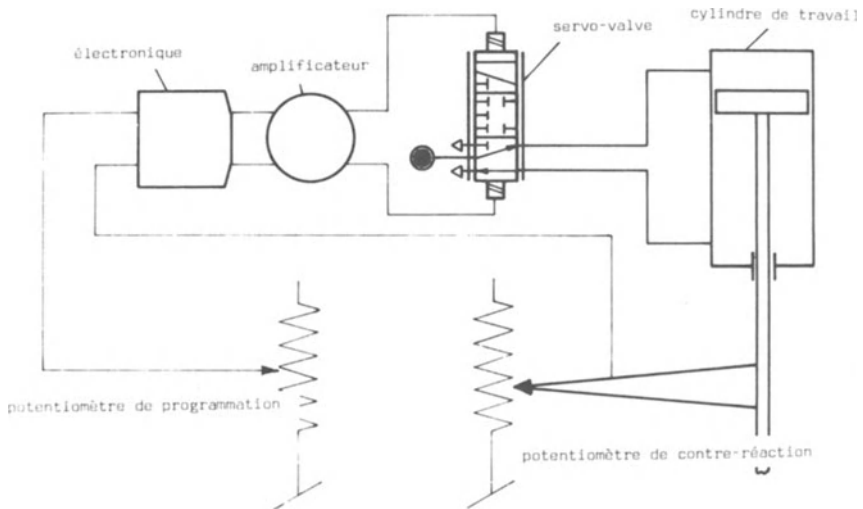


Figure 6: Commande électro-pneumatique.

La commande hydraulique comprend le piston, une servo-valve (valve à 4 voies) et une partie électronique. Les commandes hydrauliques travaillent toujours en boucle fermée dans le cas analogique présenté à la figure 6. La position désirée est imposée sous forme d'un signal analogique et comparée à la position réelle. La différence de ces deux signaux commande par l'intermédiaire de l'électronique la servo-valve et le circuit hydraulique. De tous les entraînements le moteur hydraulique a le meilleur rapport puissance / volume. C'est pourquoi, les commandes hydrauliques sont les plus utilisées dans les robots. L'un des inconvénients est la nécessité d'avoir une pompe à haute pression, souvent 100 atmosphères environ.

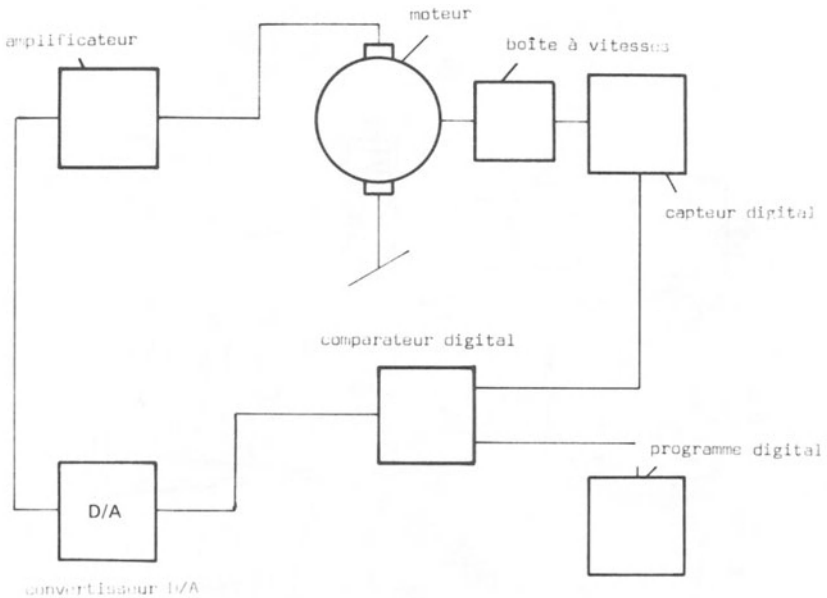


Figure 7: Commande électrique.

La figure 7 montre un entraînement électrique. Il s'agit d'un moteur électrique incorporé dans un servo-mécanisme. On peut utiliser alternativement des moteurs à courant continu ou des moteurs pas-à-pas. La figure 7 montre schématiquement un capteur digital, un comparateur digital, un programme digital, une conversion digitale-analogique, une amplification et un moteur. Sur le plan puissance / poids, un moteur électrique est moins favorable qu'une commande hydraulique. Dans le cas du moteur pas-à-pas, ce rapport est encore beaucoup moins favorable. Dans l'intérêt de la puissance, le moteur électrique devrait tourner rapidement; on a donc encore besoin de réducteurs mécaniques de rapport de démultiplication élevé.

Le problème des réducteurs pour les robots est aussi un problème important pour le constructeur. Il existe un réducteur avantageux qui est le HARMONIC DRIVE présenté à la figure 8.



Couronne rigide



Générateur de vagues



Cloche flexible



Harmonic Drive

Figure 8: HARMONIC DRIVE.

Il s'agit d'une sorte de train planétaire ayant un engrenage extérieur rigide et un autre engrenage intérieur flexible, en contact avec un roulement à bille de forme elliptique. Si l'arbre du roulement est entraîné, l'ovale déforme l'engrenage flexible et le contact entre les deux engrenages se déplace avec la vitesse de rotation de l'arbre d'entraînement. On peut obtenir une démultiplication de 200 en un étage. Il n'y a pratiquement pas de jeu et l'on obtient une construction très compacte. Les engrenages supportent bien l'effort mécanique, car il y a plusieurs dents en prise. Le prix de revient de ces engrenages est assez élevé et il n'existe pas encore pour les petites dimensions.

La commande du robot est dans un certain sens son cerveau. Les robots industriels d'aujourd'hui sont encore au stade des robots non-intelligents; on leur impose donc un programme qu'ils exécutent automatiquement. Certains robots simples ont des commandes électro-mécaniques avec des contacts ou des commandes pneumatiques (entourages explosifs), mais la tendance actuelle va vers des commandes électroniques. Il y a des maisons spécialisées qui fabriquent des commandes électroniques pour robots provenant de différents fabricants. Dans une commande électronique, l'introduction du programme se fait de deux façons:

- programmation à l'avance: sur la planche à dessin ou au bureau, comme on le fait pour une machine à commande numérique;
- programmation sur place: le robot est commandé par un opérateur; il est soit guidé à la main, soit avec un petit appareil de commande et ses mouvements sont mémorisés. Ensuite, le robot répète exactement ce qu'on lui a demandé de faire.

Il est intéressant de comparer le robot d'une façon sommaire avec les machines à contrôle numérique. On peut dire que la vitesse d'un robot est cent fois plus grande environ que celle d'une machine-outil à commande numérique, mais la précision est en général aussi cent fois plus faible.

La partie électronique d'une commande électrique se compose en général de trois parties: la partie puissance, la partie mémoire et la partie qui fait le transfert d'information et la coordination des différents

mouvements et opérations. La partie mémoire et la partie coordination sont semblables à celles que l'on trouve dans un mini-ordinateur. C'est pourquoi, de plus en plus on trouve des robots commandés par des mini-ordinateurs. Cette tendance va encore s'accroître avec le progrès technologique dans le domaine des mini-ordinateurs ces prochaines années.

### 3. Applications

Où sont employés les robots aujourd'hui ? Les premiers endroits où il faut utiliser les robots sont ceux où le travail est désagréable ou dangereux pour l'ouvrier: dans le voisinage d'un four, il y a de très hautes températures, certaines machines font beaucoup de bruit et des installations dégagent des vapeurs désagréables. Dans ces cas, le remplacement de l'homme par un robot est absolument indiqué. A l'origine, le robot était surtout utilisé pour manipuler des pièces lourdes, mais aujourd'hui le robot est de plus en plus utilisé pour la manipulation de petites pièces.

Ces dernières années, le robot a trouvé le plus grand nombre d'applications dans l'industrie automobile, en particulier pour la soudure par point. Presque tous les fabricants d'automobiles ont aujourd'hui des robots pour cette tâche. Les robots sont souvent employés pour la soudure oxy-acétylénique et pour le découpage continu. Une autre application très répandue est la peinture au pistolet.

Il y a d'autres domaines où l'application de robots est bien introduite: dans l'industrie du verre, pour la fabrication de pneus, dans l'industrie de la céramique, la fabrication de briques, de produits en ciment et de pièces en matière plastique. De plus en plus, on les voit dans la fabrication d'appareils ménagers, par exemple pour les appareils de cuisine, les appareils de bureau, de télévision. Tous les produits en tôle fabriqués en série qui sont peints tels que les baignoires, les brouettes et les meubles de jardin peuvent être peints par des robots. Le remplacement de l'ouvrier par le robot fait l'objet d'études économiques. Il existe des spécialistes dans ce domaine, ainsi que de la littérature.

Pour apprécier le développement des robots industriels dans un proche avenir, on peut d'abord poser quelques questions:

1) Pourquoi un robot doit-il être construit comme un homme ?

Pourquoi doit-il avoir des articulations, des mains ?

2) Pourquoi investir dans l'achat de robots qui sont chers ? Il y a des automates spécialisés qui font le même travail meilleur marché.

Pour répondre à la première question, sur le plan social, une certaine interchangeabilité entre l'homme et le robot semble souhaitable et dans l'intérêt de la structure d'une fabrication, il est même important que l'on ait cette interchangeabilité. En conséquence, le robot devient toujours plus semblable à l'homme, bien que jusqu'à maintenant il ne soit pas doté de certaines qualités que possède l'ouvrier (sens tactile, sens visuel, pouvoir de décision).

En ce qui concerne la deuxième question: "Pourquoi a-t-on besoin de robots si ces machines de production automatiques qui existent déjà donnent satisfaction ?", on peut avancer plusieurs arguments. Tout d'abord, le temps de la construction et de la mise au point de ces appareils spécialisés est généralement long. Il faut dire que la programmation d'un robot doit être rapide, alors qu'un appareil spécial est toujours long à construire. Tous ces instruments construits en usine sont en général des constructions nouvelles qui souffrent de maladies d'enfance. Quand on achète un robot, on peut au moins souhaiter qu'il n'ait plus de maladies d'enfance. L'entretien de ces appareils spécialisés est difficile, car en général on n'a pas de documentation. Seule l'équipe qui les a conçus les connaît, mais les autres ne savent pas très bien comment s'y prendre. Tel n'est pas le cas pour le robot, car on utilisera le même robot pour beaucoup d'applications. Il y aura un service d'entretien et des modes d'emploi à disposition. De plus, nous souffrons aujourd'hui d'une pénurie de constructeurs et de mécaniciens. Les programmeurs et les électroniciens sont plus faciles à trouver. Actuellement, le jeune homme préfère l'électronique à la mécanique.

Un autre avantage du robot est qu'on peut le mettre en place jusqu'à ce que l'appareil spécialisé soit au point. Si une production est modifiée, la chaîne de production doit être changée aussi rapidement que possible. Au

début, les manipulations seront peut-être exécutées par des ouvriers, mais dans la phase suivante, il sera intéressant d'utiliser un robot et de le remplacer plus tard par une machine spécialisée.

Il vaut la peine de faire une petite comparaison avec l'électronique. Il y a quelques années, si une tâche électronique dans une usine se présentait, une équipe d'électroniciens se mettait immédiatement à faire des circuits et ainsi une électronique spécialisée était conçue. Aujourd'hui, on utilise souvent un autre procédé: on emploie le mini-ordinateur existant, on le programme et les fonctions électroniques sont réalisées avec celui-ci; l'électronique spécialisée est donc remplacée par le mini-ordinateur et l'électronicien, par le programmeur. Même si peut-être le mini-ordinateur est trop sophistiqué pour une tâche particulière, on l'utilise néanmoins, car il est interchangeable, bon marché et son service d'entretien est assuré. Il en sera probablement de même pour le robot. Un parallèle entre le mini-ordinateur et le robot s'impose: le robot industriel est la contrepartie du mini-ordinateur universel. Il remplace un appareil de manipulation, comme l'ordinateur remplace l'électronique spécialisée. Le robot n'a pas encore été accepté d'une façon générale et la raison principale en est qu'il est encore trop cher et que ses performances ne sont pas suffisantes actuellement.

On remarque deux tendances chez les constructeurs de robots:

- une tendance vers l'universalité du robot qui peut faire plusieurs tâches: même si une tâche n'exige que 4 degrés de liberté, on utilise celui qui en a 6, car c'est un modèle standard pour les raisons mentionnées plus haut;
- une deuxième tendance vers le robot modulaire comprenant différentes articulations et leurs commandes: pour chaque application, on utilise seulement les articulations dont on a besoin, afin d'éviter un gaspillage de moyens.

En outre, les robots industriels se distinguent selon leur volume de travail. Ceux qui remplacent l'ouvrier travaillant debout ont un volume de travail d'environ  $10 \text{ m}^3$ . Ceux qui remplacent l'homme assis ont un volume de travail d'un  $\text{m}^3$ . Le robot de précision a un volume de travail d'environ  $0,01 \text{ m}^3$ .

La distinction n'est pas nette, mais elle correspond à une tendance que l'on peut observer en ce qui concerne les robots qui apparaissent sur le marché. L'introduction des programmes doit être développée parallèlement avec les ordinateurs, en particulier les micro-processeurs. Des progrès se feront dans les langages de programmation des robots, dans les prix de revient et les facilités de programmation.

#### 4. L'avenir

Cependant, l'avenir appartient au robot intelligent. Il est difficile de donner une définition précise du mot intelligence. Ce que l'on peut dire, par exemple, pour caractériser l'intelligence est qu'une machine à intelligence cherche son but. Si les conditions de l'environnement ont changé, s'il y a un obstacle, la machine cherche et corrige son parcours. Un autre aspect de l'intelligence est l'établissement d'un modèle de l'environnement dont le robot acquiert une certaine connaissance sous forme d'un modèle. Avant de passer à l'action, il exécute tout d'abord son travail sur son modèle pour le réaliser ensuite d'une façon optimum. Deuxièmement, il faut que ce modèle soit corrigé en permanence selon les expériences faites. Le robot doit enregistrer l'obstacle rencontré et modifier son modèle. L'étude de ces questions est du domaine de l'intelligence artificielle. Pour assurer l'interaction avec son entourage, un robot intelligent doit être muni d'organes sensoriels. Certains robots en possèdent déjà aujourd'hui; par exemple, la partie mécanique de certains robots se trouve sous tension électrique de quelques volts et si un objet en métal est touché, ceci provoque un court-circuit et les mouvements du robot s'arrêtent pour éviter des dégâts. C'est la forme primitive d'un organe sensoriel. En outre, on trouve des dispositifs de limitation de force et des interrupteurs-limite qui permettent au robot de saisir ou de déposer des pièces sur une pile. Ces dispositifs sont encore très élémentaires; cependant, certaines opérations telles que le montage nécessitent des organes sensoriels plus évolués.



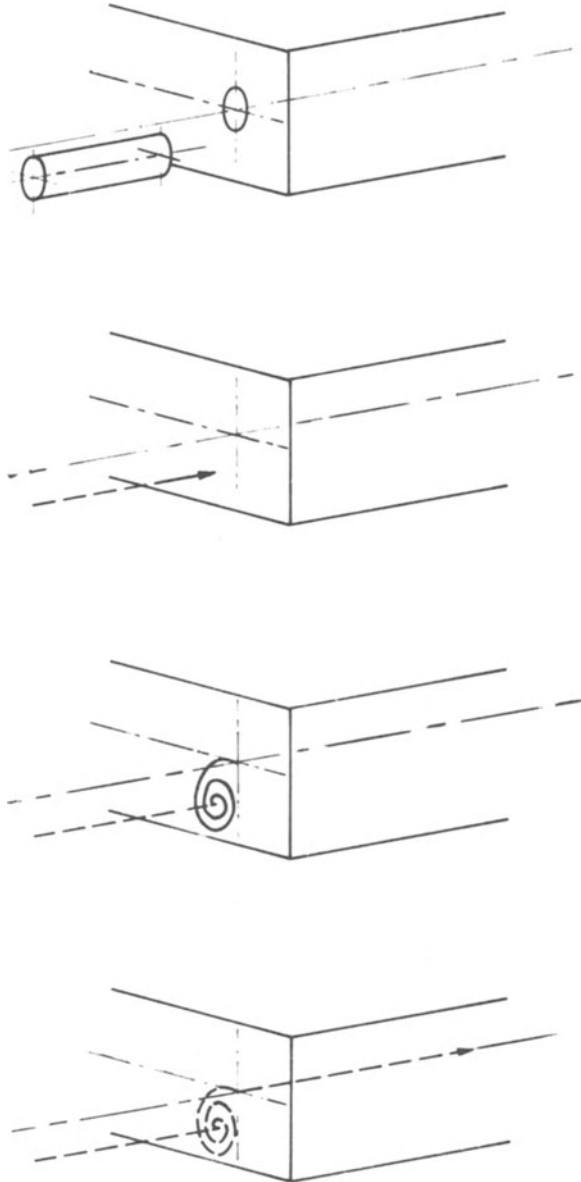


Figure 9: Introduction d'un axe dans un trou.

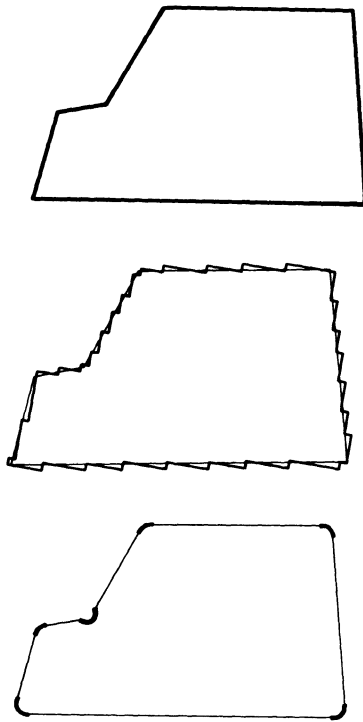


Figure 10: Reconnaissance de formes.

La figure 9 montre schématiquement l'opération de l'introduction d'un cylindre dans un trou. A la suite des imprécisions que l'on rencontre partout, le cylindre arrive un peu à côté du trou; grâce à son sens tactile, le robot constate la présence d'un obstacle et en conséquence, il se met à faire un mouvement en forme de spirale jusqu'à ce que le cylindre glisse dans le trou; ensuite, le robot pousse le cylindre. Il s'agit d'une fonction typique d'une certaine intelligence qui n'existe pas dans les robots industriels d'aujourd'hui, mais qui est connue pour les robots de recherche.

D'autres robots de recherche ont un sens visuel. Ces derniers ont la tâche, par exemple, de reconnaître des pièces présentées sans ordre et leur position exacte.

La figure 10 illustre quelques étapes de la reconnaissance de formes dans l'exemple d'une petite voiture: détermination du contour, digitalisation de ce contour pour le mettre dans la mémoire de l'ordinateur et reconnaissance des points saillants de ce contour afin de pouvoir dire: c'est une voiture. La reconnaissance de formes est en elle-même un grand domaine de recherche de l'intelligence artificielle. La recherche visant à la construction de robots avec intelligence se fait dans quelques laboratoires dans le monde: aux Etats-Unis, au Japon et dans un seul laboratoire en Europe, à Edimbourg.

Pour conclure, que pouvons-nous faire en Suisse ? Nous sommes sûrs que les robots vont se développer et il est important que notre industrie se penche sur ce problème comme utilisatrice, mais aussi éventuellement pour les développer et les fabriquer.

Pour stimuler l'activité en Suisse, nous avons décidé à l'Ecole Polytechnique de nous lancer dans l'étude et le développement de robots industriels.

Le robot a encore un aspect qui concerne l'enseignement dans une école d'ingénieurs. L'industrie suisse a besoin d'ingénieurs s'occupant de la mécanisation de la fabrication. Nous devons former nos ingénieurs dans cette direction, mais comment enseigner la mécanisation d'une fabrication dans une école polytechnique ? La difficulté consiste dans le fait que l'on ne

peut pas monter une chaîne de fabrication qui fabrique des souliers ou une chaîne qui fabrique des montres seulement pour l'étude de sa mécanisation. Il y aurait trop de problèmes annexes qui n'ont rien à faire avec le problème que l'on veut étudier. L'avantage du robot industriel est qu'il permet d'étudier sous une forme assez condensée beaucoup de problèmes typiques de la mécanisation. Le robot industriel n'est pas spécifique pour une branche ou une autre; il permet pourtant d'acquérir des connaissances générales valables pour toute mécanisation.

#### Littérature

- Proceedings of the First National Symposium on Industrial Robots (Chicago, USA, 1970). III Research Institute, Chicago, Illinois.
- Proceedings of the Second International Symposium on Industrial Robots (Chicago, USA, 1972). III Research Institute, Chicago, Illinois.
- Referate des 3. internationalen Symposiums Über Industrieroboter (Zürich, Schweiz, 1973). Verlag moderne Industrie, 8000 München.
- Proceedings 1st Conference on Industrial Robot Technology (Nottingham, UK, 1973). International Fluidics Services Ltd, Carlton, UK.
- Proceedings 2nd Conference of Industrial Robot Technology (Birmingham, UK, 1974). International Fluidics Services Ltd, Carlton, UK.
- The Industrial Robot, International Fluidics Services Ltd, Carlton, UK.
- H.J. Warnecke, R.D. Schraft: Industrie-Roboter, 1973. Krauskopf-Verlag, Mainz.

### UNIMATES AT WORK

W.G. Lamb, UNIMATION Inc., Telford, Salop, England.

Since its inception more than 12 years ago Unimation Incorporated has strived to produce a Robot which would be considered truly "Universal Automation" and accepted by industry as such. This is a continued development process during which time over 3.000.000 hours of working experience has been logged in widely diverse industries.

At this point in time we feel that we can rightly claim to have come a considerable way to achieving the original design objective. There is obviously no limit to the future developments and Unimation Incorporated intends to remain the leader in the field of practical "all-purpose" industrial Robots. This paper will review some applications in detail which have not been previously covered by other speakers, and paint a broad picture of the whole application spectrum.

#### Investment Casting

Investment casting is of course the "lost wax" process first used by artists and jewellers but now being used on large scale production of many intricate parts in Industry generally. This application is one of the more recent success stories for Unimate with around 30 machines at work through out the world most of them supplied within the past 1½ years and enquiries for further machines continues at a high level.

Without doubt this is one of the most graceful of Robot applications with the smooth transition between motions that is an essential part of the job.

The Unimate programme required for Slurry dipping and then Stuccoing with ceramic granules is determined to ensure there are no air inclusions in the intricate wax mouldings. Thereafter, the Unimate repeats the programme mould to mould with no variation in the high quality obtained.

If one considers a wax mould of say 100 turbine blades the finished weight after primary and multiple secondary dips can be of the order of 40/50 Kilos. With weights of this order it is obviously difficult for the human operator to achieve the same repeatability as the Unimate.

This application incorporates a special swivel control which allows us to achieve continuous rotation in either direction at a controlled speed. This ensures that any surplus Slurry is removed before the ceramic is applied.

### Press Loading

At first glance what could be easier ? Pick up and place a piece of metal of one size and shape and remove after the press operation. One would think an ideal situation for a simple "pick and place" device. Let us consider the problems.

1. Orientation:- Usually the parts are presented in a completely random manner in a tote box. Having once orientated the part correctly then it is important to maintain orientation either by palletizing or press to press transfer.
2. Speed:- With high capital investment involved in most press lines it is important to maintain the presses working at the optimum rate.
3. Part Turnover:- In many cases it is necessary to turn the pressed part completely over between presses.
4. Product Change:- Most press lines need the capability of changing the product through the press line without the need of having to re-set all the handling equipment. The inbuilt sophistication of the Unimate enables us to:-
  1. Maintain orientation by palletizing or press to press transfer.
  2. Maintain optimum speeds by working "on the fly" with the press and the interlocks available within the Unimate. Press to press transfer can be achieved in 5.5 - 6.0 seconds.
  3. The 6 axis machine allows complete turnover of the pressed part without releasing the part from the gripper.

4. Product changes can be handled by the Unimates ability to store up to 16 programmes within the machine memory.

Figure 1 shows two Unimates at typical press installation while figure 2 shows a Unimate with dual hands to provide high-speed transfer of smaller parts through three presses.

#### GlassHandling

The applications in the glass industry vary considerably but due to the continuous nature of most of the processes the prime requirement is maximum reliability. The level of reliability being an order greater than normally quoted for the Unimate. This gives an up time requirements of around 99.5 per cent. One example of the applications is the handling of television tubes from the anode buttoning machine to 6 different put down position at the annealing Lehr. Ambient temperatures are as high as 45 degrees centigrade with the components being at temperatures of 300/350 degrees. Parts are handled at the rate of one complete load/unload cycle every 9 seconds. Under these conditions a Unimate has been giving good service with up time as high as 98.5 per cent.

Many applications in the glass industry involve the handling of plate glass. The Unimate loads and unloads two automatic edge grinding machines alternately in less than 17 seconds. Maximum glass size is 28" x 68", weighing up to 35-lbs. An auxiliary unload assist device on the glass grinder raises the finished part to allow the Unimate's special hand to move under the finished part into a nest on the grinder and from there glass is placed on the output stacker.

The continuous process nature of the glass manufacturing industry makes this outstanding application an extremely profitable investment. Each Unimate, with relatively simple auxiliary equipment, replaces two workers per shift on a three shift basis. The programmability of the Unimate's memory in combination with the five axis flexibility allow easy set-up for a wide variety of shapes and sizes of glass not possible with hard automation or less sophisticated Robots.

Figure 3 illustrates the handling of television tubes while figure 4 shows the layout for the edge grinding operation.

#### Gas Welding (MIG)

Gas welding is again a comparatively new field and required development of special options to the Unimate digital control system.

For some 2 years a Unimate in Sweden has been gas welding front suspensions for a well known Swedish Automobile manufacture. There are however limitations to this application. The welds are limited to straight lines and the tracking of the weld gun is handled by a special adaptor fitted to the Unimate wrist. A new system developed by our Japanese licensee Kawasaki overcomes these restrictions. Welds may be placed around any required surface, gun tracking is handled by the Unimate and special features allow for fast retract at the end of welding and automatic cleaning of the weld gun at predetermined intervals. Wire feed and gas flow are also controlled by the Unimate.

Machines have been supplied for the welding of complete automobile rear axle assemblies and for the welding of motor cycle frames.

The European version of these machines will be available in October 1974 and discussions are currently being held with various European companies and we are hopeful that the first machines will be operational in Europe before the end of 1974.

Figure 5, 6 and 7 show the rear axle installations and the completed assembly.

#### Machines Tool Loading

In the original design and marketing concept of the Unimate this was an area which appeared at the top of the list for possible applications.

After 10 years we are at last beginning to make an impression in the field which appeared so attractive in the early days.

There were various reasons for this lack of penetration.



1. Parts not orientated at presentation point.
2. Unimate would stand idle during cutting time.
3. Chip breaking and removal appeared to be difficult.
4. Machine tool manufacturers preferred to design and build special purpose loading equipment, mainly due to costs.

However times change. Unimate now mass produced, is competitive with special purpose equipment on a cost basis once the part is orientated, by grouping machine tools around the Unimate, orientation is maintained to the end of the machine cycle, and then to maintain orientation the Unimate is able to palletize parts at the end of the machining cycle. Smarter than its predecessor the present day Unimate is able to "feel" for a key way in the machine chuck and an option is available which enables long complex programmes to be stored external to the machine. Even automatic inspection functions are now within the Unimates capabilities. One large European company producing Electric motors utilizes a Series 2000 Unimate to handle motor rotors through a sequential 3 machine grinding operation and load to an automatic dynamic balance.

Rotors are checked automatically for dimensional tolerance and this information is used to correct for tool wear again on an automatic basis.

This application involves the Unimate in handling parts weighing up to 40 Kilos with a double gripper to handle tow Rotors for fast load/unload to ensure minimum loss of machining time.

Figure 8. shows the lay-out of the grinding operation while figure 9 illustrates a machine loading operation involving 4 different machine tools.

Having covered some specific areas in the Robot spectrum the general view of todays situation is given in figure 10. This tabulates those areas where Unimates are successfully at work and in most instances have been for a number of years.

This list is by no means complete and is intended only as a guide to these areas of major activity.

We believe that to a large extent this justified our original design concept

that the Robot needs to be truly universal automation to be accepted in the market place by industry.

Over 800 machines are at present working through out the world and a further 25 machines a month join the work face. Some machines have already logged more than 32.000 hours which is the equivalent of 8 years on a 2 shift basis.

The range of machines available from Unimation is by no means complete. New designs to tackle new areas of the industrial market are already well under way.

In the near future we are looking to Automatic assembly faster machines (twice as fast as present machines) with greater accuracy, smaller machines to cope with the difficult areas.

These are all areas where hardware will be available within 12/18 months.

As of to-day we are able to supply a family of machines ranging from 2 to 6 freedoms of movement, capable of handling up to 170 Kilos, able to be mounted in any position, programme lengths of up to 1000 steps. Various options extend the capability of the basic machines to cover almost any eventuality. Even spot welding on moving targets is now an accomplished fact.

Moreover these machines are all current production items, proven and tested not "one off specials". Many items are inter-changeable from model to model which has obvious advantages from spares stocks view point.

To support the machine sales well trained service and application engineers are on call any time. This together with a good spare parts service operated on an exchange/repair basis to keep maintenance cost to a low level, has ensured service continuity for over 10 years and will continue to give the same customer support in the future.

In conclusion let me say that we welcome the opportunity to study the possibility of new applications. The problems associated with them become a challenge for our engineers to solve in the ever increasing quest to widen the fields of influence of todays Industrial Robot.

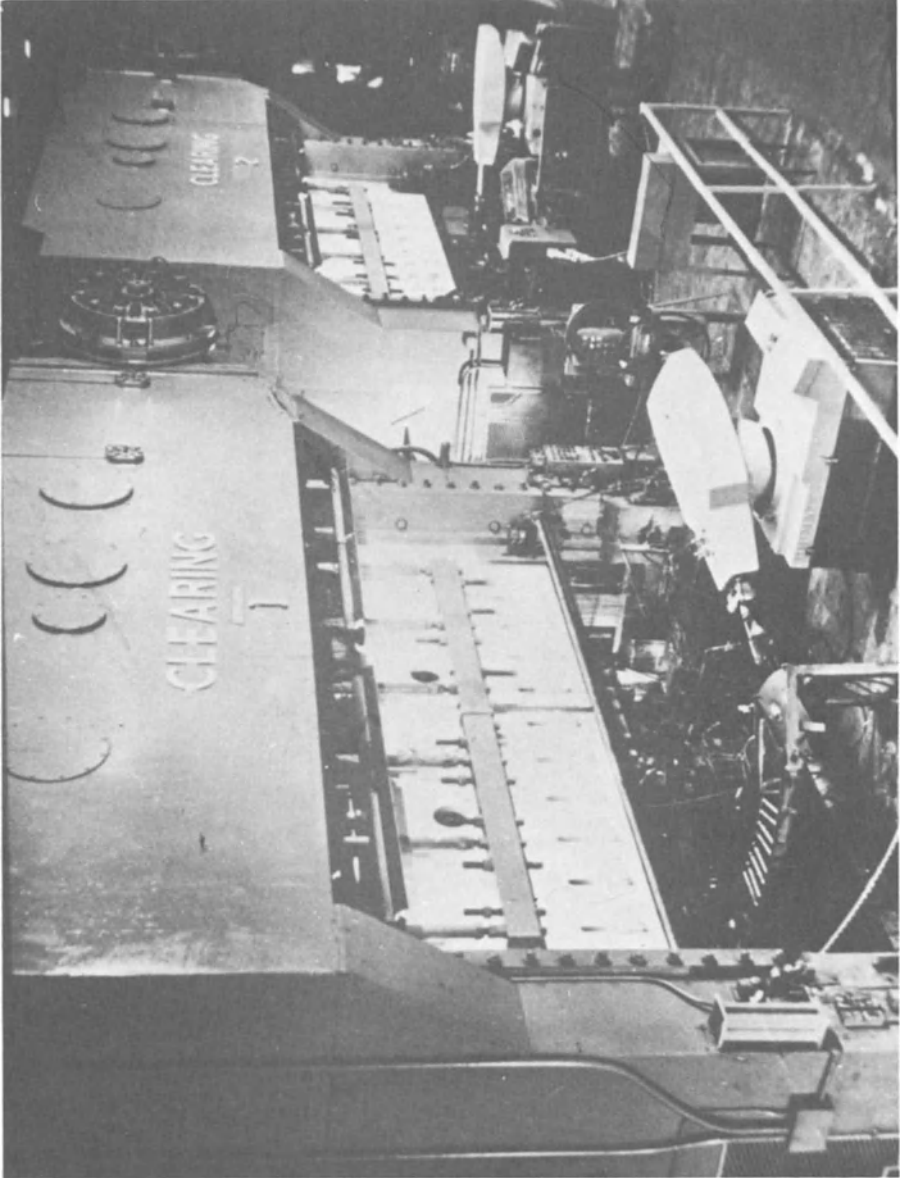


Figure 1.

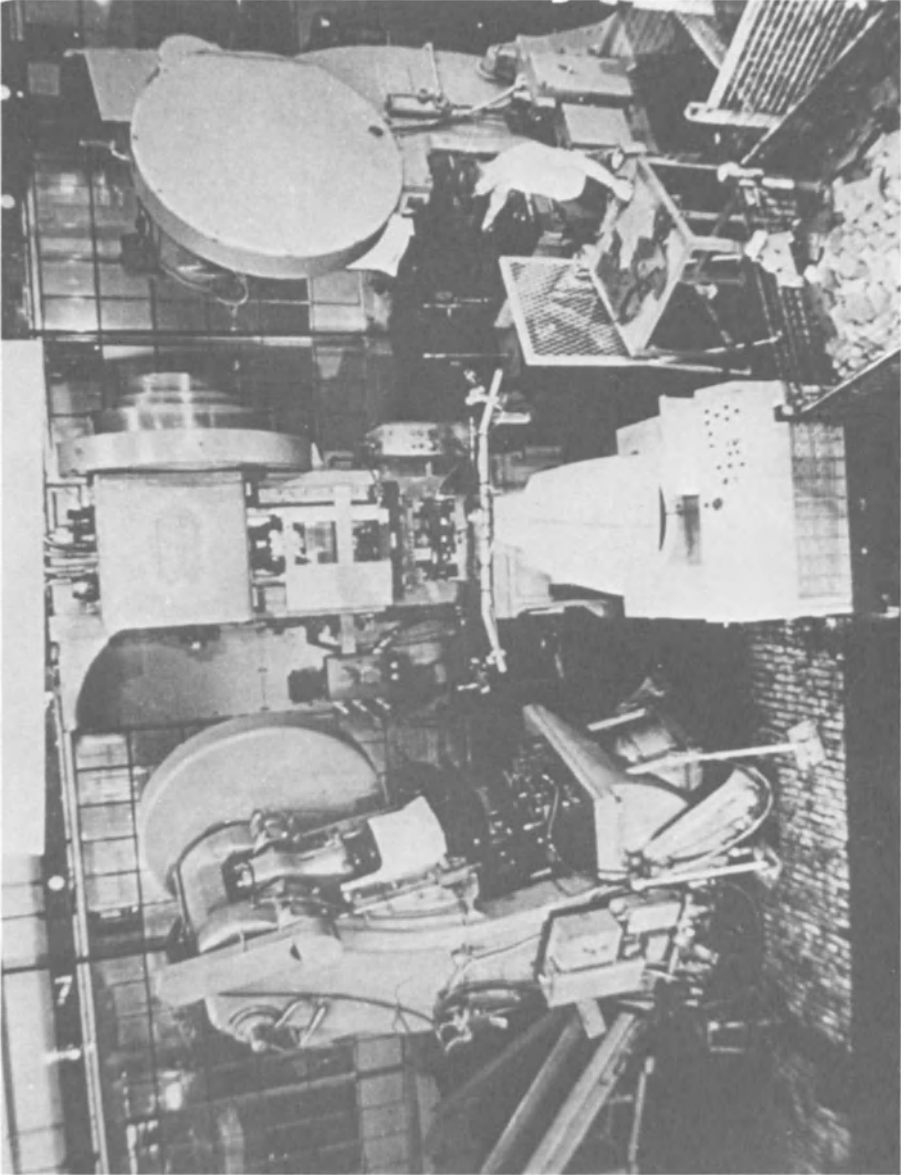


Figure 2.

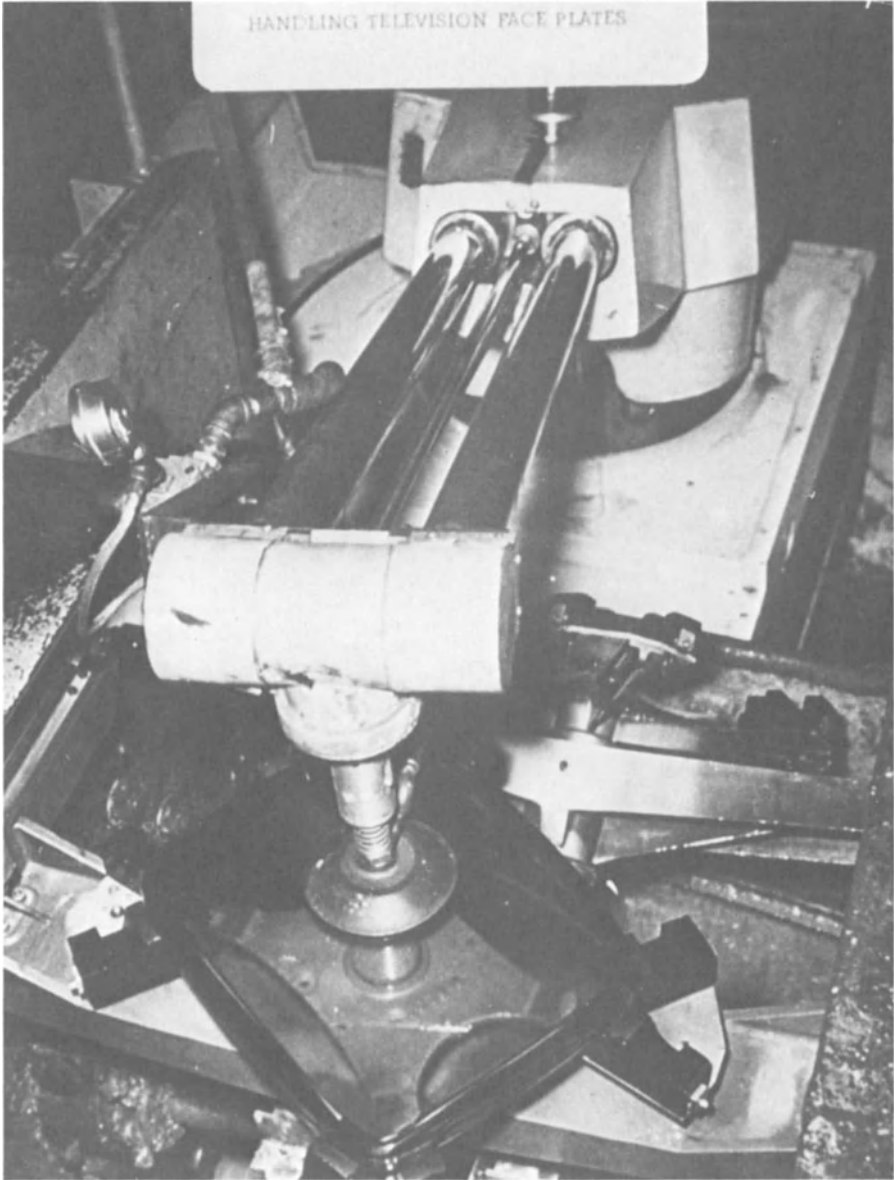


Figure 3.

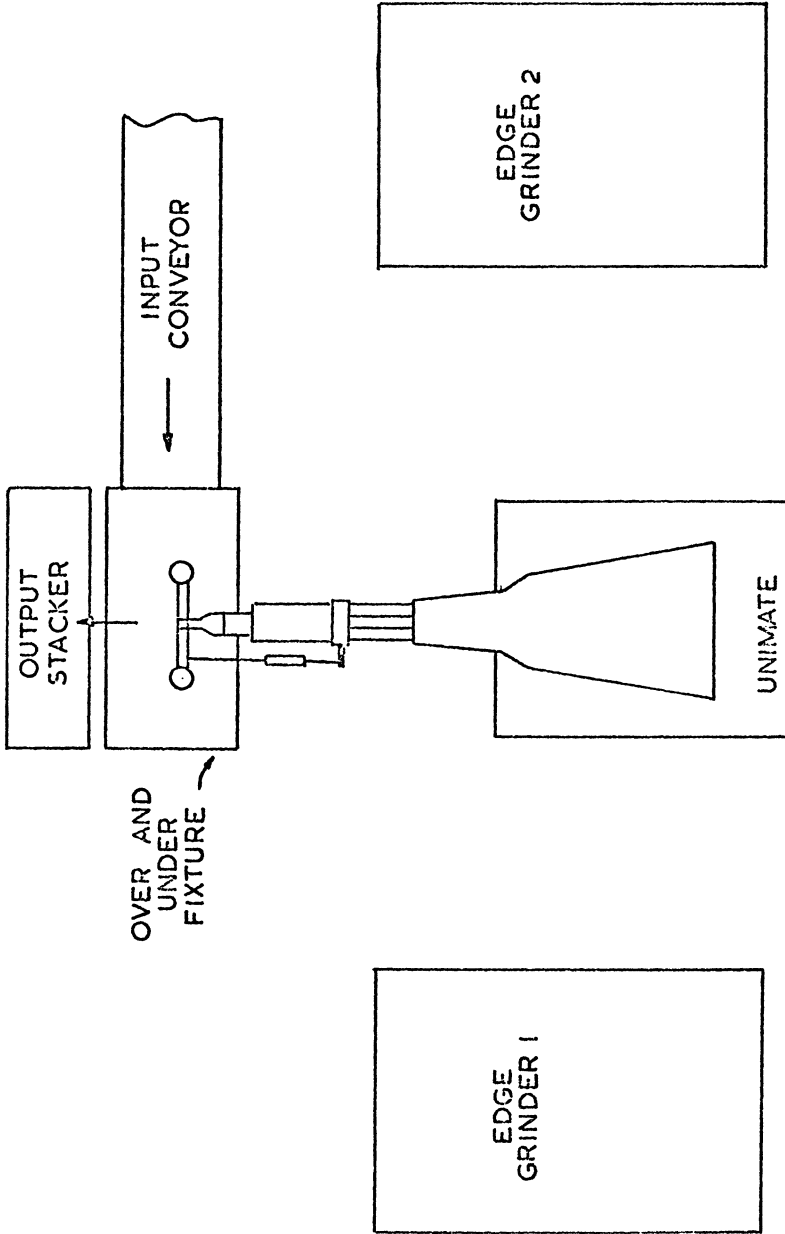


Figure 4.

INSTALLATION ARRANGEMENT

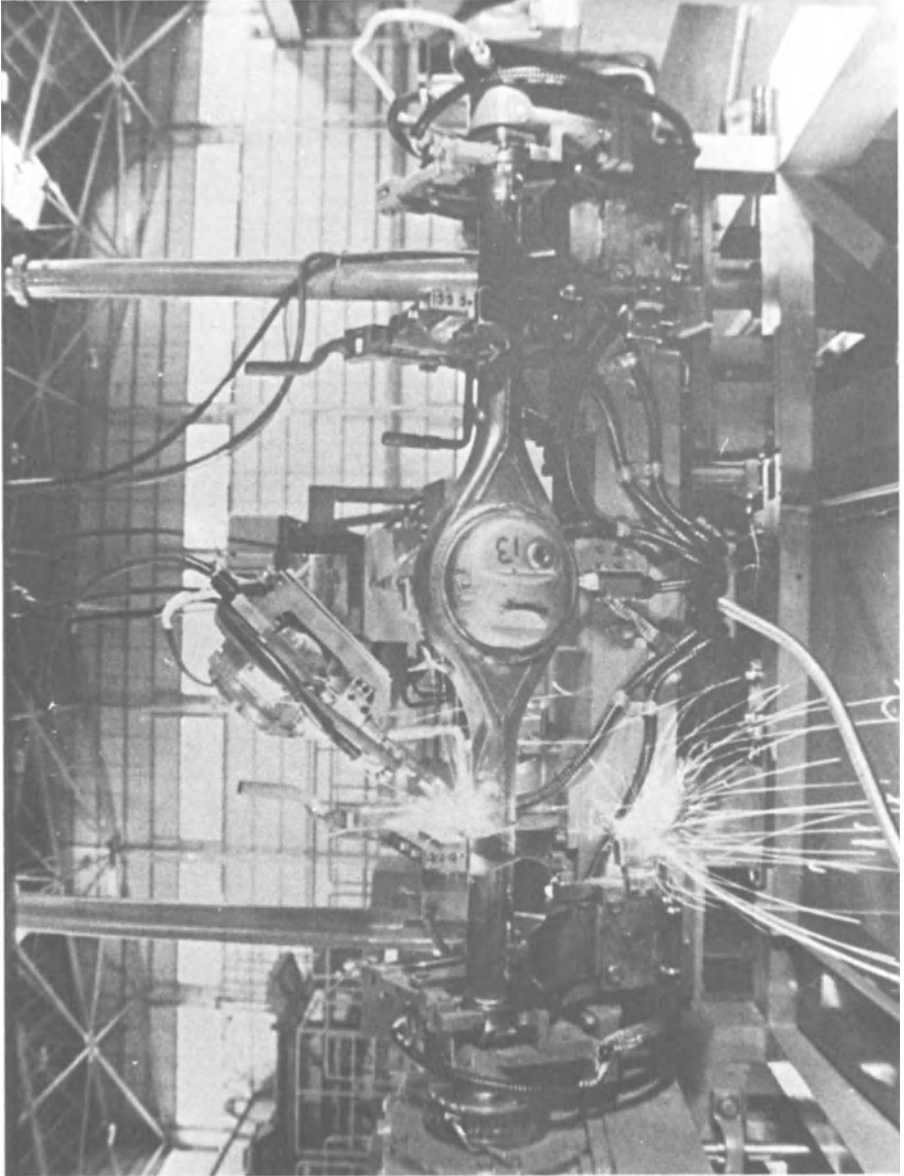


Figure 5.

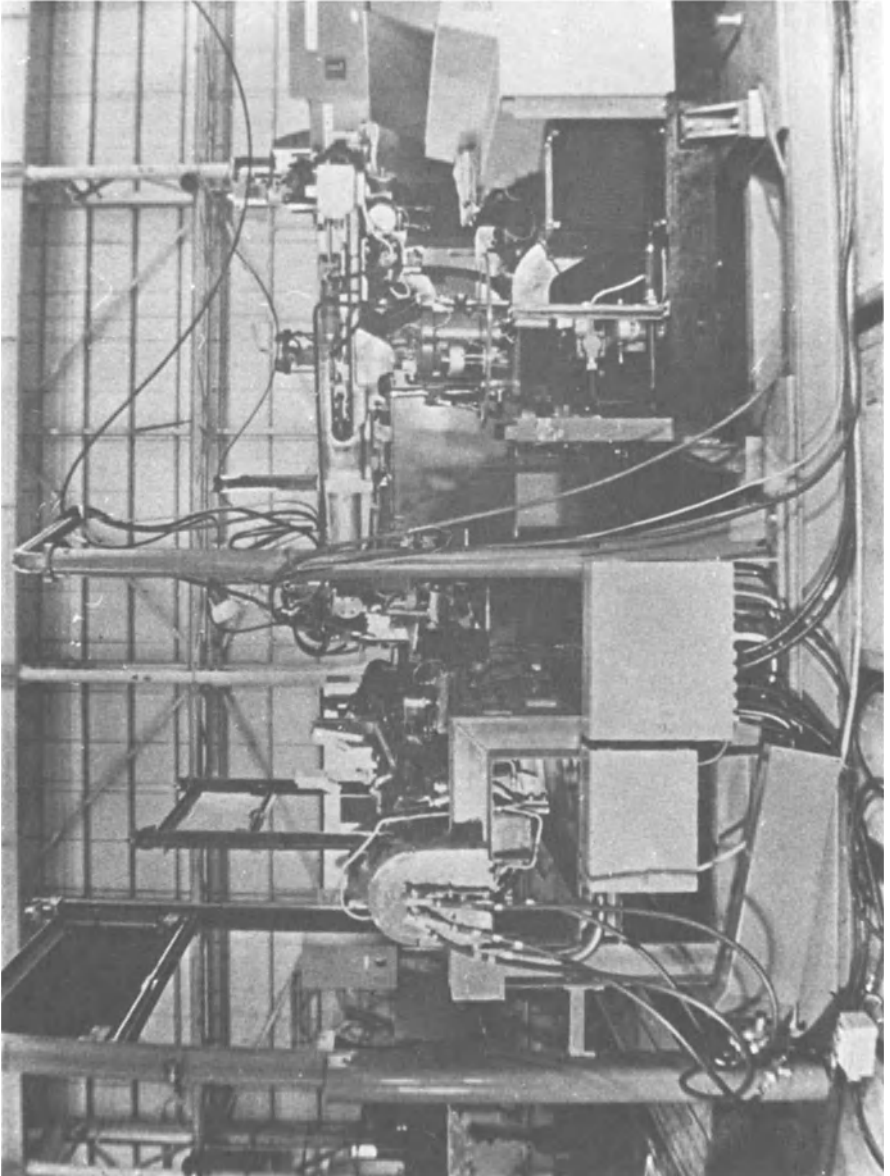


Figure 6.



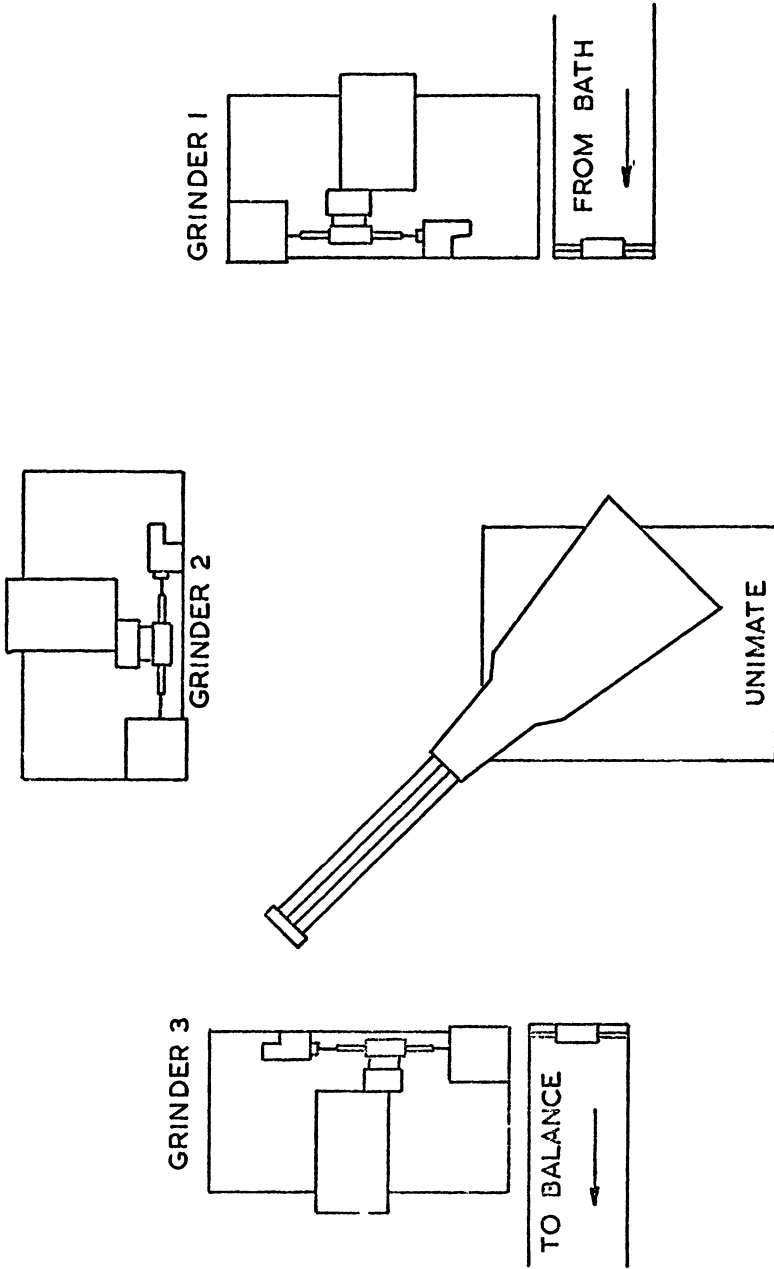


Figure 8.

INSTALLATION ARRANGEMENT

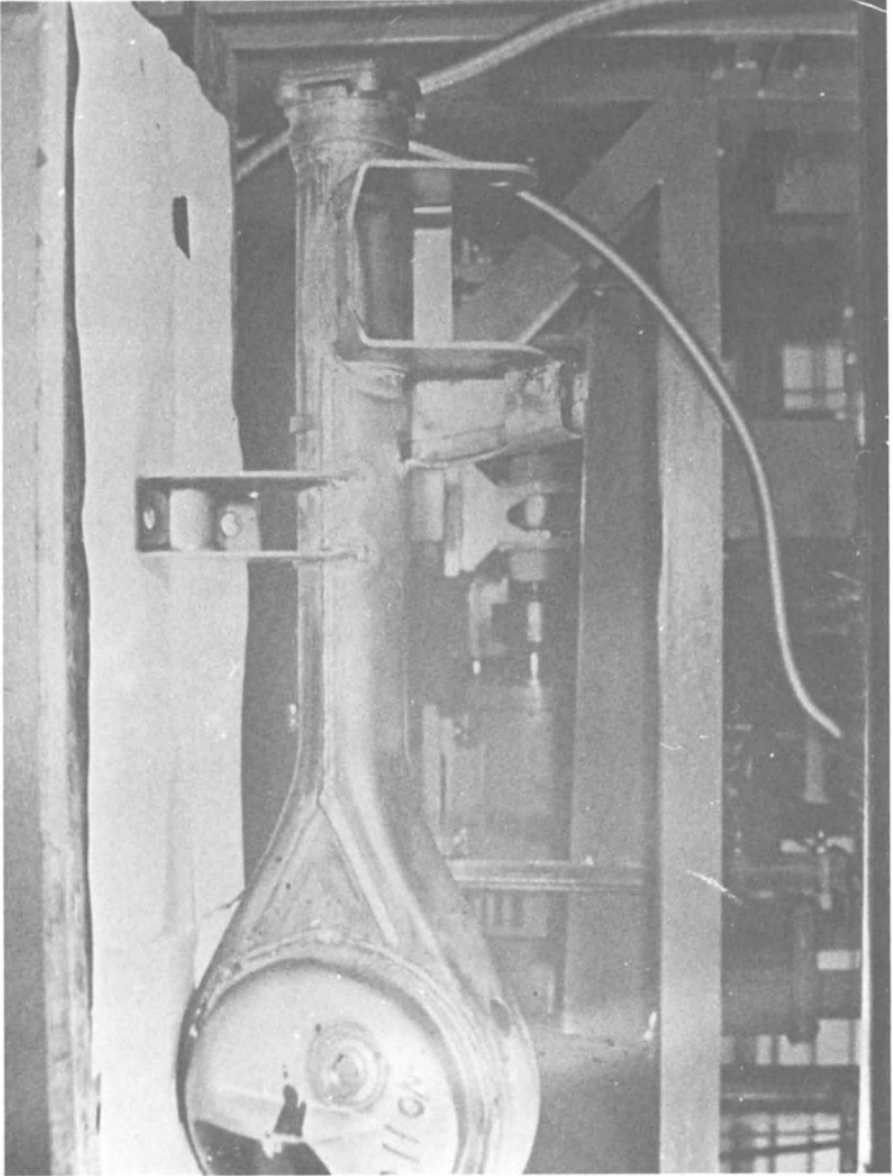


Figure 7.

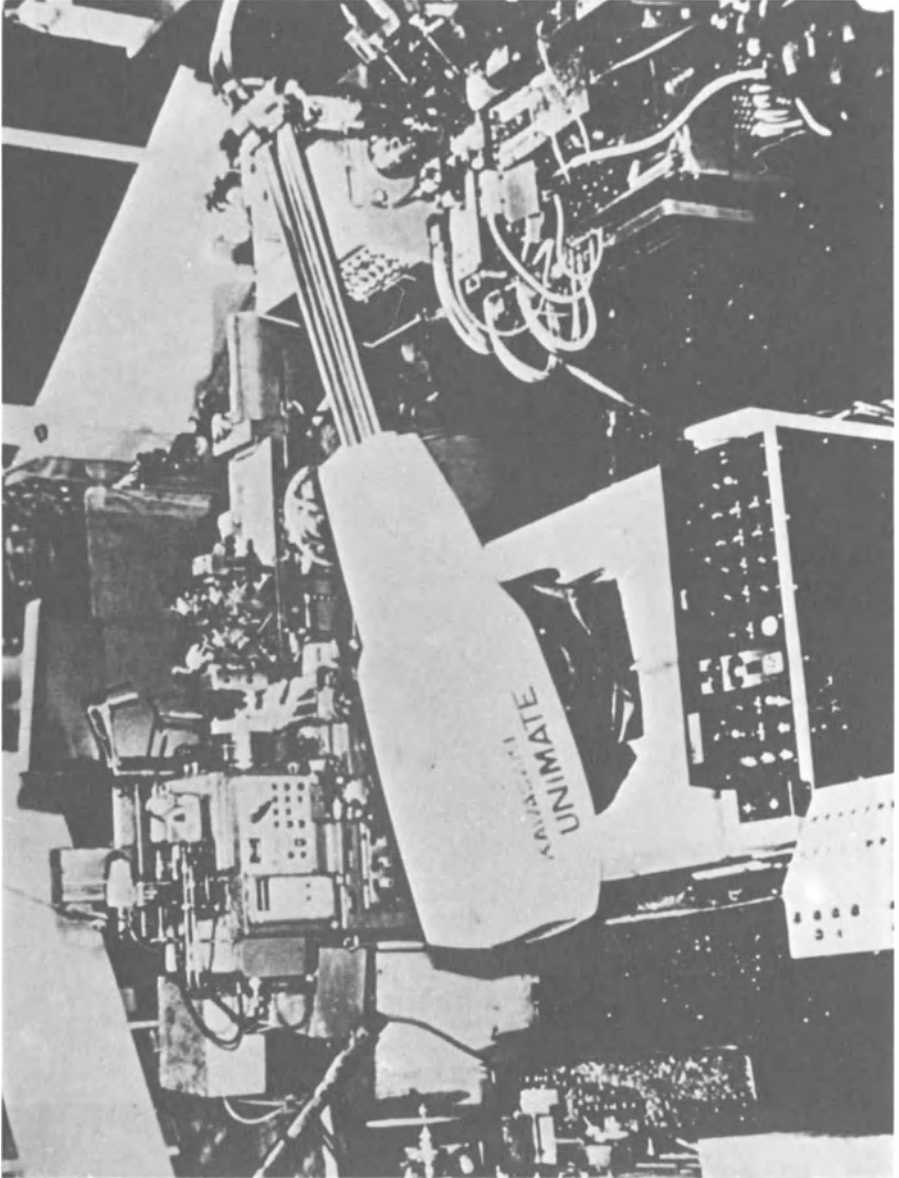


Figure 9.

THE TRALLFA ROBOT -

A GUIDE TO AUTOMATED CONTINUOUS MOTION

by Kristian Aareskjold, Trallfa Nils Underhaug A/S, Bryne, Norway

General

The TRALLFA Robot might be characterized as a "multi-purpose programmable memory-controlled robot" with continuous path type control. It is a tool-carrying robot designed to replace the human spray gun operator in industrial application processes, and its five degrees of freedom allows it to emulate the movements of the human hip, should, elbow and wrist.

The TR-3000 Model consist of:

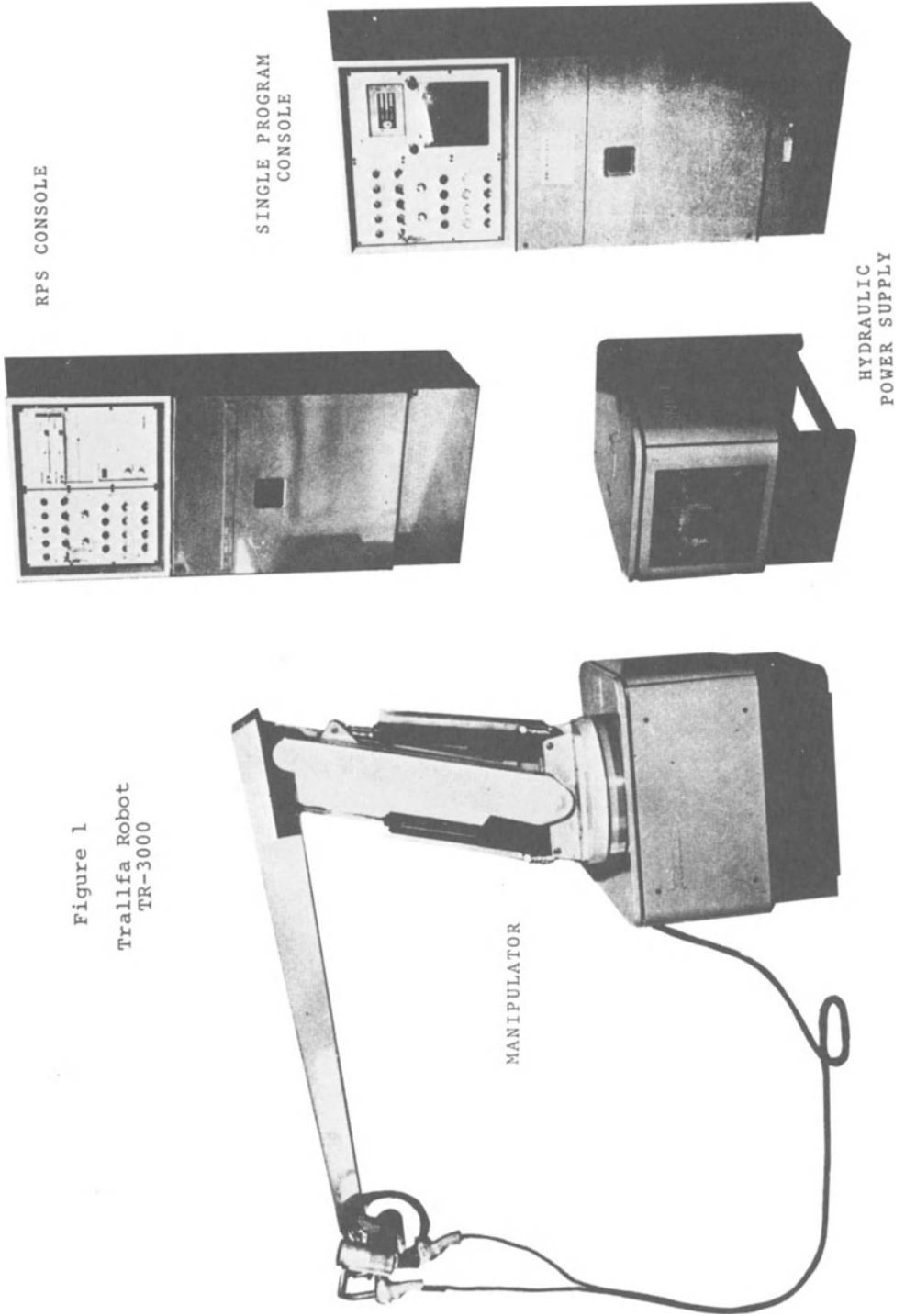
- a Manipulator
- a Hydraulic Power Supply
- a Control Unit with Single Program - or RPS Console.

The Manipulator

The manipulator arm has the ability to position a spray gun (or other type of tool) in space by means of its five continuously moveable servo links.

Each of the five links is controlled by a hydraulic actuator containing its own position measuring system which will supply analogue signals corresponding to every position an actuator may assume.

The measuring system, consisting of a resolver and a potentio-



RPS CONSOLE

SINGLE PROGRAM  
CONSOLE

HYDRAULIC  
POWER SUPPLY

MANIPULATOR

Figure 1  
Trallfa Robot  
TR-3000

meter, indicates the position of the hydraulic actuator by means of a steel tape fixed to the piston rod and linked to the signal units over a gear system in the interior of the actuator.

#### The Hydraulic Power Supply

Hydraulic fluid under pressure is applied to the manipulator from the hydraulic Power Pack via two hoses.

The power pack contains an oil reservoir, a motor/pump unit, the pump being of the inner gear type, and a valve manifold.

The fluid level and the fluid temperature are watched by sensors which will trip at a too high temperature or a too low oil level.

The pump motor cannot be started as long as one of the sensors are tripped, thus forming a "fail to safe" system.

#### The Control Unit

The control unit contains the Main Junction Box, the Electronics Rack, the Control Panel and the Tape Recorder (RPS or SCT).

From the control panel all functions of the robot including switched output functions can be controlled.

To easen operation, a remote control panel which is an exact copy of the lower right half of the main control panel, is delivered with the robot as a separate unit.

#### System Fundamentals

The movements of the TRALLFA Robot are controlled by an analogue/

digital control system. For ease of operation the magnetic tape is stored in one or more cassettes, which are easily removed from the control unit and thus permits quick change between different previously recorded programs.

For teaching purposes, two auxiliary handles are attached to the front of the robot arm (Fig. 3). One is fitted with a trigger operated microswitch and the complete handle is fastened to the bracket which holds the automatic spray gun. When the gun is properly connected, depressing the trigger will operate it, causing material to start flowing. This operation will be recorded simultaneously in the program if the magnetic tape is running. To start the magnetic tape at the beginning of a programming cycle, the other handle is utilized. It is fitted with a trigger microswitch as well, which, when depressed, will start the magnetic tape.

The trigger is held depressed during the entire teaching sequence and any movements made are automatically recorded. Releasing this trigger will end the program and cause the tape to reset to the starting position.

#### Programming the TRALLFA Robot

The TRALLFA Robot is programmed for work by leading the robot arm with the attached spraying equipment manually through the desired coating operation. The movements produced during the teaching sequence will be recorded in digital form on magnetic tape. A

total of 5 switched output functions can be taught within a program for any period of time and in any sequence desired.

Teaching procedures are relatively simple and can be performed by virtually anyone, but should be performed by a person well acquainted with conventional spraying techniques.

#### Servo System

The arm of the TRALLFA Robot is powered by five hydraulic actuators. Each actuator contains its own separate position measuring system which will supply analogue signals corresponding to every position an actuator may assume. During the teaching sequence these signals will, in the electronics of the control unit, be converted to groups of digital information. Every 1/80 of a second the digital information of all actuators will simultaneously be sampled and recorded on a continuously moving magnetic tape. This process repeats automatically as long as the magnetic tape is moving.

When the robot is placed in the REPEAT mode and the hydraulic system is energized, the tape is normally started by an external signal, and will transmit the information to the control unit for comparison to the actual positions of the actuators. Any positional error between the tape and the actuators will cause the corresponding servo valves to drive the actuators and align them with the desired position. As the positional data changes the actuators will follow, reproducing the movements recorded.



### Applying the TRALLFA Robot to Industry

The TRALLFA Robot is an adaptive piece of automated, programmable equipment which can be utilized in a variety of applications and is particularly suited for the application of sprayable materials. Since the TRALLFA Robot is adaptable to a wide range of industrial applications and might well be considered a universal piece of equipment, several advantages and limitations need to be considered in order to utilize the robot to its maximum capability.

These advantages and limitations are explored in the following pages to assist the reader in application studies.

In determining the suitability of the TRALLFA for a particular job, there are six major points which should be reviewed in depth by the prospective user.

1. Adaptability to the complex motions in replacing human labour.
2. Spatial Coverage - 5 motions covering a volume of 200 cubic feet.
3. Arm Loading - weight limitations.
4. Wrist Loading - torque limitations.
5. Time - available time for the task.
6. Interlocks and synchronization.

### Adaptability

To determine if the TRALLFA Robot can generate labour savings requires a concentrated study of the planned application and the

existing operator's motions. It is extremely important to recognize any adaptability which the operator brings to the job.

An operator or set-up man, trained in the programming of a TRALLFA Robot and acquainted with painting techniques of the particular job requirements, will manually program the robot according to a representative sample. If the item is a bathtub to be coated, all tubs must be hung exactly as the sample (from the end or side) with the same elevation (same length hooks), and at the same distance from the TRALLFA. The repeatability inherent in the control system guarantees uniformity of product coating when the tubs are hung uniformly.

The tub, properly hung and moving at production conveyor speed, is manually sprayed by the operator to record the program by moving the TRALLFA Robot arm through the same motions as he would move the spray gun. A quick switch to PLAYBACK and the TRALLFA Robot will repeat the same motions just taught on each subsequent tub.

Although the TRALLFA Robot has five motions and works in three dimensions, it very rarely can apply material to the reverse side of an object. If the human operator turns the part to coat the reverse side, then this function must be included in the system, either as a separate operation or triggered by the TRALLFA (see interlocks below). In certain idealized cases the TRALLFA can turn the part, but this rarely proves practical.

In studying any proposed task, it is not necessary to have the

TRALLFA Robot repeat the exact motions of an operator, but these motions should be modified as required to take advantage of the machine's unique abilities.

### Spatial Coverage

Now that all the required motions for the assigned task are known, it must be determined if the TRALLFA Robot has the reach. Fig. 2 illustrates the three dimensional volume covered by the manipulator. To determine if the TRALLFA Robot has the reach for the assigned task, the working area of the TRALLFA should be arranged to cover the workpiece, taking into consideration whether the workpiece is moving at a constant rate or remains fixed. Exercise care in using the TRALLFA Robot at the limit of any one motion. Four of the five motions are polar and if perpendicularity to the workpiece is to be maintained for painting, the usable working volume may be reduced.

Frequently, TRALLFA Robots replace painters where the parts are in elevated booths. It may be necessary to elevate the TRALLFA also, but elevation need not be the same as that provided for the programmer, since the teaching controls are mounted on one end of the arm. This platform need not be at the same level, but should be convenient for the programmer and could be a temporary structure.

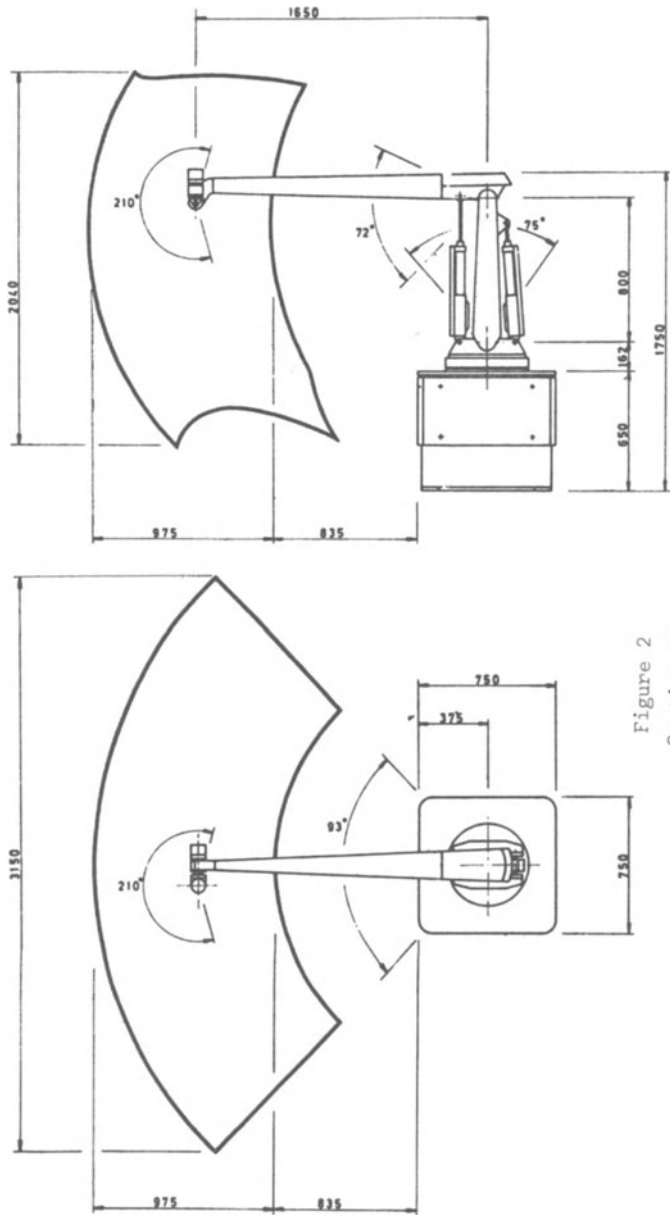


Figure 2  
Spatial Coverage  
TR-3000

### Arm Loading

The working load for the TRALLFA Robot is usually less than 20 pounds, but, under certain conditions and with appropriate design, loads up to 60 pounds can be controlled.

Load carrying capacity for the two wrist motions must be calculated carefully to limit the torque on either motion to 360 inch-pounds. Fig. 3 illustrates the motions of these two cylinders. The inherent weight of servo 5 reduces the load carrying capacity of servo 4 by about 20 inch-pounds without a spray gun.

The TRALLFA Robot is equipped with a mount for a standard automatic spray gun (see Fig. 3). These spray guns, which weigh less than 3 pounds, may be mounted without considering the loading. Other mountings should be designed to provide a balanced load on servo 4, thereby reducing wear and increasing wrist life.

### Timing

Time is an important ingredient in planning a TRALLFA installation. In choosing a model there must be sufficient program time available in the cassette to perform the specified task. The workpiece must remain within the working volume of the TRALLFA Robot long enough to apply the required material.

Now that it has been determined that the robot can carry the load through the required motions, it must still be determined that there is sufficient time to apply the material to the surface or transport the load within the time limitations of the task.

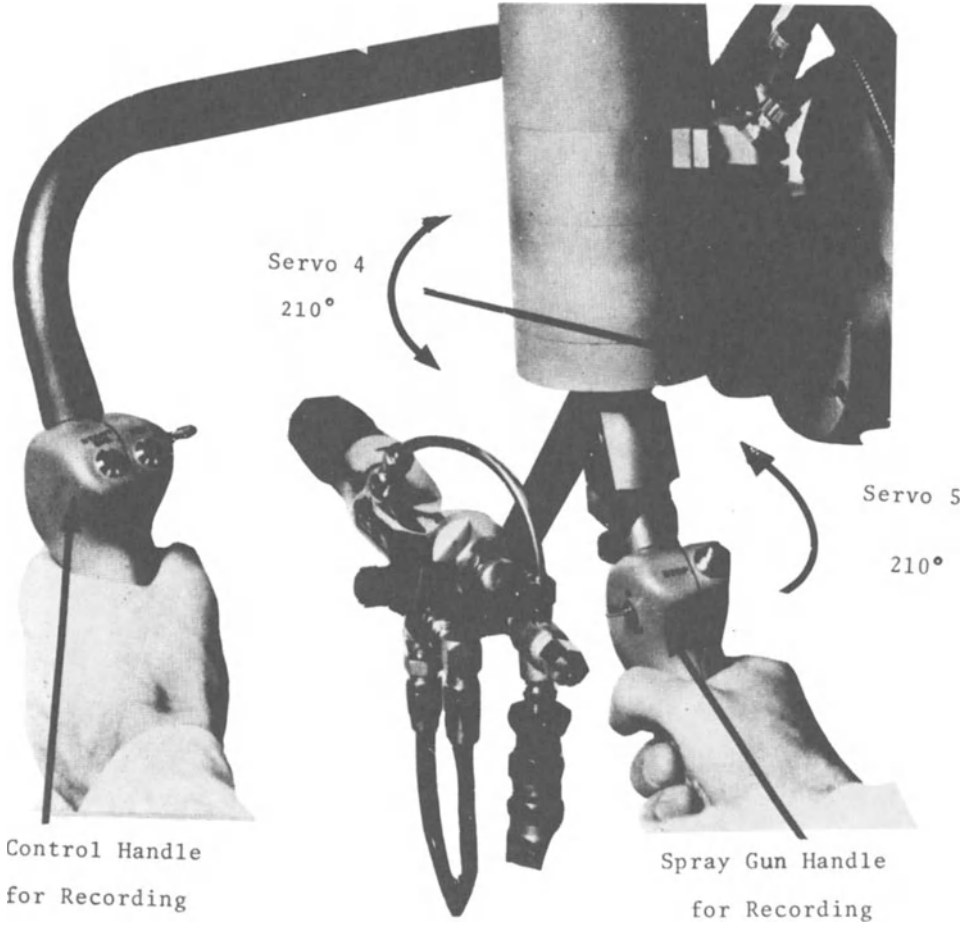


Figure 3  
Trallfa robot wrist assembly with  
programming handles attached.

Unlike point-to-point manipulators, where the number of steps is significant in program planning, the continuous path TRALLFA operates as a function of time. Once a program is started it must be recorded in its entirety because the magnetic tape is driven at a constant speed. Therefore, the available time in the memory and the time the part is available within the working volume of the TRALLFA must be planned carefully in order to accomplish the task successfully.

Conveyor line speed may be varied  $\pm 10\%$  without reprogramming. A tape speed control on the front panel of the console permits varying the tape speed to keep pace with production rates.

The TRALLFA Robot's control data is stored on magnetic tape in cassettes. There are two types of cassettes, one which contains one program and a second which contains up to 15 programs. The single program cassette has an average program time of 85 seconds, which can be increased to 105 seconds when the tape speed control is set to its minimum position. The second cassette, for use only on TRALLFA Robots equipped with Random Program Selection (RPS), has an average of 150 seconds with a maximum of 180 seconds at minimum tape speed. These 15 programs can be accessed from memory sequentially to provide any program length from 5 seconds to 180 seconds. The RPS is available as an option (see section on System Options) with a capacity of four cassettes to provide a maximum program time of 720 seconds and 60 separate programs. Special cassettes can be provided with 300 seconds of programming

time in each cassette.

In using the Single Program cassette there are two times to consider for evaluating a cycle - the time to repeat the program and the time to rewind the tape. When a TRALLFA program is repeated, the tape from the single program cassette is spilled into a collector. At the end of the program a signal automatically initiates tape rewind to prepare for the next workpiece. The rewind time is calculated as 10% of the program time.

Therefore:

$$\text{Cycle time} = 1.1 \times \text{Program Time}$$

This cycle time must be less than or equal to the time between adjacent parts on the conveyor.

In the RPS cassettes the tape is a continuous loop so the:

$$\text{Cycle time} = \text{Program Time} + \text{Program Search Time}$$

where the

$$\text{Search Time} = \frac{\text{Maximum Cassette Time} - \text{Program Time}}$$

10

and maximum time is 180 seconds for the standard RPS cassette at minimum tape speed.

This reduces to:

$$\text{Cycle time} = 0.9 (\text{Program Time}) + 18$$

where the cycle time and program time are in seconds.

To illustrate this equation, assume that two adjacent parts on the conveyor are to receive the same spray pattern and that the pattern requires 35 seconds. Using the equation above the cycle time is calculated as 49,5 seconds. The TRALLFA Robot would be



ready to repeat the same pattern after this time. Translating this time into conveyor speed would give the maximum speed and production rate. If 6 foot centers are assumed, the maximum conveyor speed would be 7,2 FPM.

The RPS system may be configured to eliminate the search time from the cycle time as follows:

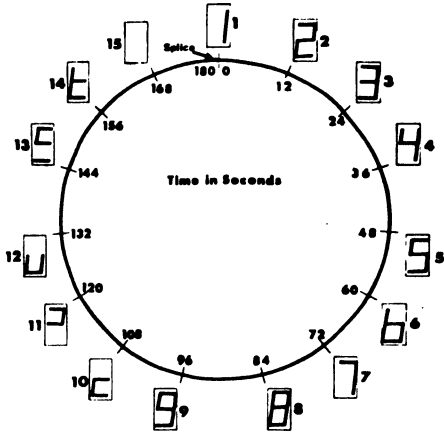
Identical programs may be taught on two cassettes, and while painting under the control of one cassette, the TRALLFA will search for the same program on the second cassette. In the example given above, conveyor speeds could be increased to 10 FPM.

Fig. 4 illustrates the program and deck selection codes. The selection mechanism within the TRALLFA Robot operates on the binary coding shown. Provisions have been made within the robot to accept other types of information when suitable interface assemblies have been prepared. Assistance from a Trallfa Application Engineer may be required for special interface assemblies.

#### Interlocks and Synchronization

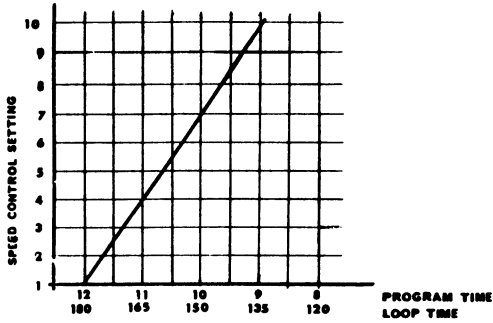
A sensor is required to detect when a workpiece is in place. This sensor provides a start signal to initiate the recorded program, thus synchronizing the TRALLFA Robot with each workpiece. Outputs from the robot are available also to operate external equipment and mechanization of hand functions

When organizing the available program time, consideration must be



PROG.	ADDR. CODE			
	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

Figure 4



Cassette	MCK CODE	
	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
1	0	0
2	1	1
3	0	1
4	1	0

PROGRAM AND DECK SELECTION CODES

Fig. 4

given to the start signal which initiates the program. The TRALLFA will accept inputs from mechanical switches or relay contacts or directly from a photo diode. (Not all types of photo diodes may be used.) To illustrate the planning for a start signal location and type of sensing, consider that the TRALLFA has been installed to apply epoxy powder to three different articles A, B and C, as shown in Fig.5. This cycle repeats every 65 seconds. The single program cassette has sufficient time to do all three parts, but does not have the ability to select any one of the three parts. However, once the pattern has been established such as A-B-C, and not A-C-B or any other combination, sensors may be mounted to identify A as the starting point and the spray pattern taught to cover all three parts. With this arrangement, a self-synchronizing system is established every three pieces on part A and only one start signal sensor is required. If part C should be missing, the TRALLFA Robot, in its simplest form, will not recognize this and will do one of two things. If the hook is empty, the TRALLFA will spray the empty place. If part A is mounted on the hook reserved for C and the correct pattern maintained thereafter, the TRALLFA will spray A as a C part and wait for the next A (parts B and C will not be painted) to synchronize.

Frequently it is required that the part sensor be located remote from the spray area. A time delay, variable up to 6 seconds, is located on the front panel of the TRALLFA. This control will delay the start of the program up to 6 seconds from the time the start signal is received from the sensor. When determining the location of the start

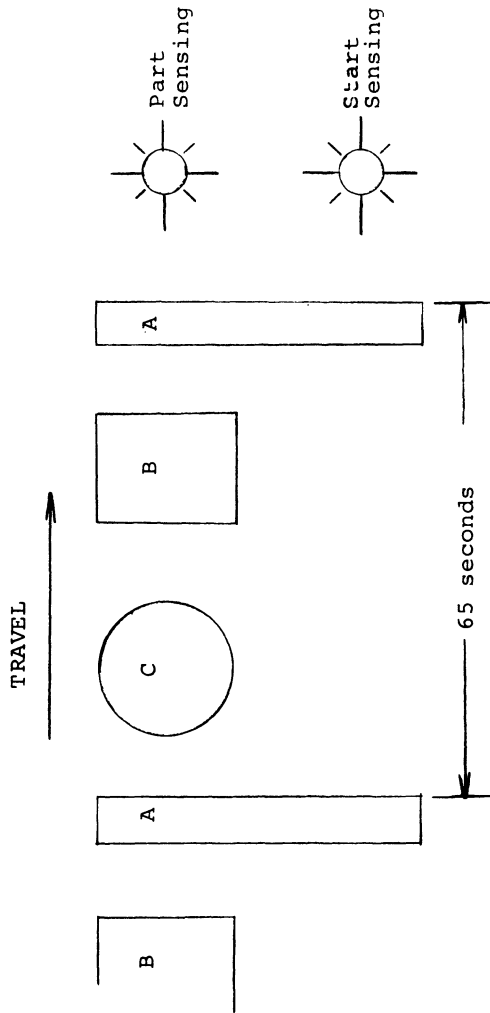


Fig. 5 STUDY EXAMPLE

signal sensor, be sure to think in terms of this time delay.

Up to this point the TRALLFA Robot has been described as an entity. It must be considered also as a component in a larger system and must be able to interface with the larger system. The self-synchronizing feature of the start signal input has already been described. In addition, three output functions are available, capable of providing 24 VDC at 1 Amp. These outputs are used to operate external equipment in synchronism with the program.

In determining the suitability of a TRALLFA Robot, the job's operations were analyzed above and part turning was considered an external operation. One of the output functions can be used to initiate a turning mechanism located on the conveyor at the appropriate time in the program.

One of the output functions is always connected to the spray gun handle. This control is used to operate a spray gun or other mechanism. It is located in a pistol grip arrangement (see Fig. 3) to provide close coordination between moving parts and the programmer. The output functions are programmed on the tape as often as necessary, for as long or as short a period as required.

#### System Options

For extended flexibility within the automatic system, various optional configurations have been created for the TRALLFA Robot.

- Option:
- Approved as Intrinsically Safe by FM and BASEEFA
  - Electrostatic Spray Gun Capability
  - Early Program Reset

- Random Program Selection
- Program Interrupt
- Conveyor Control
- Sixth Motion
- 5 Output Functions

INTRINSIC SAFETY:

When this option is installed, the TRALLFA will be intrinsically safe for use with solvents of Class I, Division 1, Group C and D as defined by the National Electric Code (will not cause an explosion). The TRALLFA system has been tested and approved by Factory Mutual, and British Approvals Services for Electrical Equipment in Flammable Atmospheres (BASEEFA). Approvals are also pending with the German Physikalische-Technische Bundesanstalt (P.T.B.) and the Swedish Statens Provningsanstalt. Each TRALLFA so modified carries the appropriate labeling.

ELECTROSTATIC SPRAY GUN CAPABILITY:

When electrostatic guns are used, the TRALLFA Robot requires an electrical noise filter to prevent disturbances in the control system.

EARLY PROGRAM RESET:

This option will artificially terminate a program from an external signal randomly or synchronized with a taught output function in the program. As an example of the use of this option, assume that Fig. 5 is a set of three parts. Occasionally, part C will not be needed and several times in a production run parts B and C will not be needed. During the programming all three parts are sprayed as one complete

program. Just before spraying part B and part C one of the output functions is taught as an interlock with the upper sensor. During normal production operation the TRALLFA Robot will sense either empty hook to terminate the program and reset the tape for the next sequence. It is necessary to have part A to generate the start signal.

#### RANDOM PROGRAM SELECTION:

This optional feature allows the TRALLFA Robot to contain as many as 60 different sequences in memory for instant recall as opposed to the single program cassettes which require a cassette change for each different sequence.

Each RPS cassette has 15 pre-assigned segments on the tape divided equally over the length of tape. Each segment and each cassette is selected by a binary coded signal (see Fig. 4). Each pre-assigned (pre-addressed) segment is 8 to 20 seconds in length, depending on tape speed and size of cassettes. This does not mean that programs are restricted to this length. Programs may be as long as required for the assigned task. Whenever several segments are required, the TRALLFA is programmed continuously as if the length of tape had no addressing other than the starting address. Once the length of this program has been determined the next address for the starting position of another program can be calculated.

Using Fig. 5 as an example, assume that part A requires 45 seconds to paint, part B requires 28 seconds, and part C requires 39 seconds. Running at an average tape speed each segment of a standard 3 minute cassette will have 10 seconds of programming time. Part A requiring

45 seconds will start at address 1 on cassette 1 for a combined address of 11 (Deck 1, Program 1). At the end of 45 seconds the program is terminated. The second program for part B will then start at address 15, which is located 50 seconds into the tape (see Fig. 4). Following the same reasoning, it would require 3 segments to paint part B and 4 segments to paint part C with a starting address for part C of 19. This would leave three unused segments in cassette 1 at the end of the tape which could be used for other painting patterns. Cassettes 2, 3 and 4 may be programmed with any other painting patterns and sequences.

In contrast to the previous example, where parts had to be hung as A-B-C, the RPS would permit random handling patterns when sensors are set to detect each part.

#### PROGRAM INTERRUPT:

The TRALLFA Robot can be configured to interrupt the program at any time during playback when the conveyor stops. As soon as the conveyor resumes, the robot will continue from where it was interrupted. All output functions are inhibited at this time to prevent inadvertent operation of interlocks. Timing delays are provided to compensate for conveyor momentum and inertia and adjustable by the programmer.

#### CONVEYOR CONTROL:

Occasionally it is desirable and necessary to operate several TRALLFA Robots in series to accomplish a task. An optional "black box", which will accept inputs from up to four robots, is available to prevent



the conveyor line from being stopped before all the robots have completed their programs. This unit also makes provisions to prevent a new series of programs from starting, should the parts placement be such that a new workpiece has entered the working area of the first TRALLFA before the piece being completed has left the work area of the last robot. Emergency stop inputs are also available.

#### SIXTH MOTION:

Lift tables, rail drives, indexing drives and other forms of motion may be used to increase the operational capability of the TRALLFA. These devices may be independently operated, initiated by the output functions, or driven linearly under program control.

The electronic console of the TR-3000 has been provided with the required wiring and memory channels for adding this sixth motion.

However, there has been no provision for hydraulic or mechanical connections. In order to use the linear control capability, the feedback elements and servo valve must match the characteristics of those used in the TRALLFA system. Components which are used in the intrinsically safe TR-3000 are available for use in external systems.

#### FIVE OUTPUT FUNCTIONS:

The TR-3000 has increased output interlock function capability. Two additional functions can be added when required. These outputs have the same 24 VDC, 1 Amp. capability as the three standard outputs described under Interlocks and Synchronization above.

Summary

Although the TRALLFA has been designed primarily as a paint sprayer, it can be used as a material handler for light loads. The continuous path capability makes it ideally suited for certain handling operations.

With a special purpose gripping mechanism the TRALLFA can be used for part dipping, powder sprinkling, or palletizing small parts from conveyors.

Being a machine, it is unaffected by noxious spray materials, heat and hostile or hazardous environments.

The TRALLFA Robot does what a man does, but better, cheaper and single-handed. It is a programmable automatic sprayer with the skill of a man and the mind of a machine.

Now that all the operations and options of the TRALLFA have been described, it remains to select the appropriate model and options. The characteristics and operating features of the two models are summarized in Fig. 6. Select the program time required for the job to determine the model.

SUMMARY OF TRALLFA ROBOT SPECIFICATIONS

<u>Specification</u>	<u>TR-3000</u>
Floor Space	
Spray Booth	6.9 square feet
Other	7.2 square feet
Power	220/440V 3 phase 4.5 kVA
Cooling	Air cooled standard Water cooling available
Program Time (average)	90 seconds SCT model 150 seconds per cassette on RPS model
Maximum Reach	
Horizontal	122 inches ( $\pm 46^\circ$ )
Vertical	78 inches
Radial	39 inches
Wrist	$\pm 105^\circ$ each motion
Accuracy, mid position	
repeatable (long term)	$\pm 0.15$
Operating Temperature	
Manipulator	150°F
Hydraulic	150°F
Console	90°F

Fig. 6

## L'INGENIERIE DES ROBOTS INDUSTRIELS

par Xavier B. Ghali, Dr Ing.  
Robotronics & Technics AG, Aarau

Il y a peu de temps encore, la notion de "robot industriel" était à peu près inconnue en dehors de certains cercles restreints de l'industrie. Aujourd'hui, une bonne centaine de firmes du monde entier offre une variété de plus de 250 modèles de ce genre d'équipement, sans tenir compte de ceux qui sont actuellement en cours de développement.

Pourtant, lorsqu'on essaie d'évaluer le nombre des robots employés à l'échelle mondiale dans l'industrie, on s'aperçoit qu'il y en a à peine 3800 (1). Cela prouve que l'implantation de cette nouvelle technique chez des utilisateurs potentiels se heurte encore aux préjugés, à l'ignorance et au manque d'une perception bien nette des conditions qui doivent prévaloir à un poste de travail donné pour justifier - du point de vue technique et économique - l'introduction d'un robot industriel.

### Une étude de système

L'ingénierie et le "software" sans lesquels aucune optimisation d'un système homme-robot industriel-machine n'est possible, ne sont pas suffisamment prises en considération lors de l'étude de nombreuses applications; il arrive même qu'on les ignore totalement. Or, sans l'apport de ces deux éléments, les robots industriels ressemblent aux armures médiévales : un élément décoratif, certes, mais pas un investissement judicieux.

Afin d'optimiser un système comme celui mentionné auparavant, il faut d'abord examiner divers facteurs d'ordre technique, économique et social. L'élaboration et l'exploitation des données nécessaires doivent s'effectuer de concert avec l'utilisateur et la collaboration de spécialistes de l'extérieur, que ce soient des fabricants de robots ou des ingénieurs-conseils.

---

(1) 2000 au Japon, 1000 aux Etats-Unis et 800 en Europe

L'utilisateur a, bien sûr, toute latitude à ne suivre que ses propres idées; toutefois, lors de l'introduction d'une technique nouvelle, il sera souvent difficile de trouver rien que dans son entreprise tout le savoir-faire dont on a besoin.

Une étude approfondie de tous les facteurs techniques, économiques et sociaux qui conditionnent l'utilisation pertinente des robots, serait trop vaste pour être confinée dans ces lignes. Il est, par contre, possible de proposer aux intéressés quelques solutions, tout en soulignant l'importance de l'ingénierie.

#### L'automatisation rationnelle

Les arguments favorables à l'introduction des robots industriels sont nombreux : accroissement du coût de la main d'oeuvre ainsi qu'une raréfaction de cette dernière, diminution de la rentabilité, concurrence de plus en plus acharnée, amélioration de la qualité des produits, prescriptions de sécurité plus sévères.

Pour maintenir sa capacité concurrentielle, l'industrie - surtout en Europe - sera obligée, dans les années à venir, de faire appel de plus en plus à l'automatisation. Ce sont surtout dans les processus de manutention que s'ouvriront des nouvelles perspectives, par l'introduction des robots industriels.

En plus du problème de la capacité concurrentielle, l'industrie de l'Europe occidentale doit faire place également au problème de la main d'oeuvre. La situation tendue sur les marchés du travail rend très difficile, sinon impossible, le recrutement de travailleurs pour des activités éprouvantes, monotones ou sales. D'autre part, l'accroissement du nombre des travailleurs étrangers (2) ne va pas sans grever l'infrastructure sociale des pays en question. Combien de temps encore les entreprises de ces pays pourront-elles

---

(2) 29,6 % de la population active en Suisse, 25,7 % au Luxembourg, 14,2 % en France, 8,7 % en République Féd. d'Allemagne et 8,1 % en Grande-Bretagne

continuer à fonctionner en multipliant le nombre des travailleurs immigrés, et en refusant de moderniser et automatiser leurs processus de fabrication ? Au cas d'une récession économique, ce serait-là une situation lourde de conséquences.

L'industrie japonaise avait été confrontée par les mêmes problèmes dans ses efforts d'expansion et d'accroissement de la productivité. Elle aurait pu faire appel à la main d'oeuvre "bon marché" des pays avoisinants, mais elle a préféré réaliser, en coopération avec les organismes d'Etat compétents, un grand nombre de projets d'automatisation. C'est ainsi que le Japon compte aujourd'hui le plus grand nombre de fabricants et d'utilisateurs de robots industriels.

En Europe, cependant, on commence aussi à mettre en oeuvre des projets d'automatisation à l'échelle nationale. Ainsi, notre société est en train d'élaborer un projet d'automatisation généralisée (pour le compte d'un pays européen) qui prévoit, entre autres, de sanctionner par un bonus ou un malus les efforts d'automatisation des entreprises concernées.

#### Planifier l'implantation

Lors de l'utilisation des robots industriels, on est confronté avec les mêmes problèmes que ceux posés par la mise en route d'une installation de traitement de l'information. Il arrive souvent que les entreprises n'emploient pas l'ordinateur qui convient, ce dernier étant soit trop grand, soit trop petit. De même, on a constaté à plusieurs reprises que des robots industriels avaient été installés sans une examination préalable approfondie des exigences du poste de travail respectif. Résultats : les robots étaient utilisés ni à plein rendement, ni correctement.

Quand on vend un ordinateur, on le livre avec le software nécessaire. Il faut agir exactement de la même manière lorsqu'une entreprise acquiert un robot, en mettant à la disposition de l'utilisateur le software et l'ingénierie nécessaires. Le robot doit être partie intégrante d'un système et non pas étranger à celui-là. Il est donc indispensable pour un fabricant de robots de pouvoir offrir des solutions aux problèmes et non pas seulement une

machine. Sans une telle approche, on ne doit pas s'étonner si des centaines d'offres sont faites en vain par les fabricants de robots.

Avant l'implantation d'un robot, il faut analyser avec précision le poste de travail concerné, afin d'optimiser le système homme-robot-machine. Voici les grandes lignes de ce travail :

1. Définir exactement les conditions d'utilisation du robot à l'emplacement prévu à cet effet et noter surtout les caractéristiques d'intérêt primordial, comme :
  - les degrés de liberté des mouvements
  - les combinaisons des mouvements simples
  - la précision des positionnements
  - les dispositifs de commande
  - les capacités des mémoires
  - les poids à manipuler.
2. Evaluer les caractéristiques des unités de production s'enchaînant au robot, comme par exemple :
  - le degré d'automatisation de chaque unité de production
  - l'uniformité du déroulement du processus
  - les possibilités de raccordement aux commandes et aux prises d'alimentation en énergie; - les dispositifs de surveillance du processus.
3. Déterminer les conditions marginales telles que :
  - l'ordonnance des pièces
  - la situation de l'emplacement destiné à l'installation du robot et des équipements auxiliaires
  - l'accessibilité de l'unité de production.
4. La rentabilité de l'emploi du robot industriel peut être appréciée au moyen de données mettant en évidence les coûts actuels et ceux que l'on estime comme résultant de son emploi. En font partie :
  - les heures de travail effectif
  - les salaires
  - le degré d'utilisation de l'unité de production
  - la fréquence des changements d'outillages

- la durée des changements d'outillage
  - le volume des séries
  - les cadences.
5. Il faut aussi prendre en considération les aspects sociaux du problème de l'implantation des robots, comme par exemple :
- l'accord du comité d'entreprise
  - le reclassement de l'ouvrier remplacé par le robot, avant même que tout le monde soit au courant de son introduction
  - une information adéquate à tous les niveaux de l'entreprise.

#### Les robots - solution d'avenir

Il est réjouissant de constater qu'un grand nombre d'entreprises européennes sont conscientes du rôle de l'ingénierie dans l'application de cette nouvelle technologie.

Plus de vingt sociétés participent actuellement à une étude intitulée : "Les robots industriels - critères techniques et rentabilité". Il s'agit d'une oeuvre qui sera une aide appréciable pour les efforts d'automatisation des firmes concernées et leur permettra d'éviter des investissements erronés.

L'étude préconise l'analyse détaillée de postes de travail typiques dans diverses entreprises et l'évaluation d'une large gamme de processus de fabrication, afin d'obtenir des résultats aussi complets que possible.

Sous la direction de la Société Robotronics & technics SA - travaillant en coopération avec l'institut de production et de l'automatisation de l'Université de Stuttgart - il s'est constitué un comité technique, où chaque entreprise intéressée est représentée par un délégué. Cette procédure permet d'engendrer un vif échange d'idées et de réalisations pratiques.

Il serait souhaitable et avantageux pour le futur développement de cette technologie en Europe, que l'exemple japonais d'une association de producteurs de robots industriels puisse être suivi bientôt sur le Vieux continent avec, toutefois, la participation des utilisateurs (ce qui n'est pas le cas au Japon).



ERGEBNISSE UND FOLGERUNGEN AUS ARBEITSPLATZANALYSEN  
FÜR AUFBAU UND ANWENDUNG VON INDUSTRIEROBOTERN

Dipl.-Ing. G. Herrmann, Stuttgart

Mitteilungen aus dem Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) der Fraunhofer-Gesellschaft e.V. an der Universität Stuttgart

1. Einleitung

Industrieroboter sind dabei, sich einen festen Platz in der Automatisierungstechnik zu erobern. Nach mühsamem Start in den 60er Jahren kann nunmehr auch in Europa ein rasch wachsendes Interesse an diesen programmierbaren Handhabungsgeräten festgestellt werden. In der Bundesrepublik Deutschland, in der 1970 Industrieroboter praktisch noch unbekannt waren, waren 1972 ca. 30 und nach jüngsten Untersuchungen des IPA Anfang 1974 bereits ca. 130 Industrieroboter eingesetzt. In ganz Europa konnten in derselben Untersuchung ca. 850 Anwendungsfälle ermittelt werden.

Diese Zahlen sind angesichts des großen Rationalisierungspotentials, das in der Handhabung vorhanden ist, und trotz der großen Steigerungsrate noch sehr bescheiden. Das IPA hat es sich deshalb zum Ziel gesetzt, mit Hilfe von Arbeitsplatzuntersuchungen die Probleme, Möglichkeiten und Grenzen der Automatisierung der Handhabung mit Industrierobotern zu ermitteln. Einige der bisherigen Ergebnisse werden nachfolgend ausgeführt.

2. Durchführung von Arbeitsplatzanalysen

Ziel der Arbeitsplatzanalysen war es, sämtliche Tätigkeiten des Personals, die Merkmale der eingesetzten Fertigungsmittel sowie der zu handhabenden Gegenstände zu ermitteln. Aus dieser Ist-Zustands-Aufnahme sollten dann die erforderlichen Maßnahmen zur Automatisierung des betreffenden Arbeitsplatzes abgeleitet und insbesondere Informationen über die Anwendbarkeit von Industrierobotern gewonnen werden.

Über die Vorgehensweise bei den Arbeitsplatzanalysen wurde an anderer Stelle bereits berichtet (4,5). An dieser Stelle soll deshalb nur noch einmal das

Ablaufdiagramm (Bild 1) mit den wichtigsten Schritten der Analyse und Auswertung gezeigt werden.

Die bisherigen Untersuchungen beschränkten sich im wesentlichen auf die Teilefertigung.

Um jedoch dort zu möglichst repräsentativen Ergebnissen zu kommen, wurden insgesamt über 100 verschiedene Arbeitsplätze analysiert, an denen die unterschiedlichsten Produkte hergestellt bzw. Fertigungsverfahren angewandt werden.

3. Funktionale Gliederung der Tätigkeiten in der Teilefertigung

Die Fertigung von Teilen mit geometrisch definierter Gestalt erfolgt mit Hilfe eines oder mehrerer hintereinandergeschalteter Fertigungssysteme. Jedes Fertigungssystem kann in drei sich funktional unterscheidende Teilsysteme gegliedert werden und zwar in

- Bearbeitungssystem
- Handhabungssystem
- Kontrollsystem.

Je nach dem Automatisierungsgrad des Fertigungssystems werden mehr oder weniger große Teile der Systemfunktionen vom Bedienungspersonal ausgeführt. In der vollkommen unmechanisierten Fertigung, die in modernen Betrieben nicht mehr anzutreffen ist, werden sämtliche Funktionen vom Menschen übernommen, der also mit dem Fertigungssystem identisch ist. Das andere Extrem ist erreicht, wenn sämtliche Funktionen maschinell ausgeführt werden. Die meisten heutigen Fertigungssysteme liegen zwischen diesen Extremen. Hier bilden Fertigungsmittel, Kontrolleinrichtungen und Mensch ein Fertigungssystem. Der Mensch führt also, abhängig von den ihm zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln, nur noch Teile der jeweiligen Funktionen selbst aus, die als Tätigkeiten mit

- Bearbeiten
- Handhaben
- Kontrollieren

bezeichnet werden. Diese können wie in Bild 2 untergegliedert werden.

Beim Bearbeiten mit einem Hilfsmittel, das im einfachsten Fall ein Werkzeug sein kann, können die Funktionen "Antreiben", d. h. Erzeugen mechanischer Energie, "Führen", d. h. das Bewegen von Werkzeug oder Werkstück auf bestimmten von der zu erzielenden Form abhängigen Bahnen und "Steuern", also das Beeinflussen bestimmter weg- oder zeitabhängiger Größen, ganz oder teilweise manuell ausgeführt werden. Die eigentliche Veränderung der Werkstück- oder Werkstoffeigenschaften erfolgt durch das Hilfsmittel, also z. B. das Werkzeug.

Die Handhabung läßt sich entsprechend der VDI-Richtlinie 3239 in mehrere Zubringefunktionen unterteilen, die in Bild 2 zu den vier gezeigten Funktionen zusammengefaßt wurden. Die in der VDI-Richtlinie enthaltenen Funktionen "Bunkern" und "Magazinieren" wurden bewußt nicht aufgeführt, da sie keine Tätigkeit, sondern das Aufbewahren von Gegenständen über längere Zeit hinweg kennzeichnen.

Bei den Kontrollaufgaben erweist es sich als sinnvoll zu unterscheiden, ob diese an den Fertigungsmitteln oder Werkstücken ausgeführt werden. Sie können mit oder ohne Hilfsmittel ausgeführt werden, wobei letzteres als allgemeine Funktionsüberwachung bzw. Sichtkontrolle bezeichnet wird.

#### 4. Eigenschaften von Industrierobotern

Die Automatisierung eines Arbeitsplatzes mit einem Industrieroboter ist nur dann erfolgreich, wenn alle vorher manuell ausgeführten Funktionen von diesem übernommen werden. Es ist folglich zunächst zu klären, welche Funktionen heutige Industrieroboter ausführen können.

Bezieht man sich auf die Funktionen die in Bild 2 angeführt sind, so können davon von einem Industrieroboter nur das

- Weitergeben

- Drehen, Wenden, Schwenken und
- Steuern des Bearbeitungsvorganges

ausgeführt werden, wobei z. T. erhebliche Einschränkungen hinsichtlich der Komplexität dieser Funktionen zu machen sind. Das Steuern des Bearbeitungsvorganges z. B. beschränkt sich bei den heutigen Industrierobotern auf das Einschalten eines Bearbeitungszyklusses. Der Bearbeitungsvorgang bis zum Abschalten und Zurückgehen der Werkzeuge usw. in die Ausgangsstellung muß dagegen von der Maschine selbst gesteuert werden.

#### 5. Voraussetzungen für die Automatisierung mit Industrierobotern

Aus der Gegenüberstellung der möglichen Aufgaben an einem Arbeitsplatz und der mit einem Industrieroboter ausführbaren Funktionen, lassen sich einige Voraussetzungen ableiten, die für die Automatisierung von Fertigungssystemen mit Industrierobotern erfüllt sein müssen:

1. Der Bearbeitungsvorgang muß vollautomatisiert sein, d. h., daß er nach dem Festspannen des Werkstücks durch ein einfaches Signale ausgelöst werden kann und alle Vorgänge bis zum Ende der Bearbeitung selbsttätig ablaufen. Werkzeuge und Werkstücke müssen sich am Ende des Bearbeitungsvorganges an einem eindeutig definierten Ort in eindeutig definierter Lage befinden.
2. Die Werkstücke werden dem Arbeitsplatz geordnet, d. h. in eindeutiger Lage, zugeführt, oder aber am Arbeitsplatz mittels spezieller Ordnungseinrichtungen geordnet. Bei längeren Bearbeitungszeiten kann ggf. auch die Lösung wirtschaftlich sein, bei der die Teile manuell geordnet und in Magazine gefüttert werden.

3. Die Spannmittel müssen kraftbetätigt und die Bestimmung der Werkstücklage im Spannmittel **selbsttätig** erfolgen, wie z. B. in einem hydraulischen Dreibackenfutter. Auch hier kann es Ausnahme bei Teilen mit langer Bearbeitungszeit geben. Bei diesen ist es evtl. wirtschaftlicher, die Teile manuell auf Werkstückträgern festzuspannen und zu magazinieren, als komplizierte Kraftspannmittel einzusetzen.
  
4. Die Fertigungsmittel und sonstigen Elemente des Fertigungssystems müssen entweder mit einem automatischen Funktionskontrollsystem ausgerüstet werden, oder, -da solche Systeme z. Zt. industriell nur ausnahmsweise verfügbar sind -, eine so hohe Gleichmäßigkeit und Zuverlässigkeit besitzen, daß sie über längere Zeiträume hinweg unbeaufsichtigt bleiben können.
  
5. Die Kontrolle der Werkstückmerkmale ist entweder nicht erforderlich, erfolgt automatisch oder kann an eine andere Stelle verlegt werden.  
Weitere Voraussetzungen für die Automatisierung mit Industrierobotern ergeben sich aus der Betrachtung der Funktion "Weitergeben", die hier stellvertretend für alle Zubringefunktionen steht, die Ortsveränderungen mit dem Handhabungsgegenstand kennzeichnen (ein-, ausgeben usw.). An vielen realen Arbeitsplätzen müssen nämlich außer den Werkstücken nach jedem oder mehreren Arbeitstakten Abfälle abgeführt und Hilfsstoffe zugeführt werden. Diese können häufig nicht mit derselben Einrichtung gehandhabt werden wie die Werkstücke, da  
- Abfälle i. a. keine definierte Gestalt besitzen (z. B. Gräte von Schmiedeteilen)

- Abfälle i. a. nicht an definierten Orten vorliegen (z. B. Späne)
- Abfälle in großen Mengen auftreten können (z. B. Gußspäne)
- Hilfsstoffe oft flüssig oder gasförmig sind (z. B. Schmiermittel für Pressenwerkzeuge)
- die Nebenzeiten übermäßig verlängert würden.

Daraus folgt als weitere Voraussetzung:

6. Prozeßnebenfunktionen, unter denen alle regelmäßig oder unregelmäßig auszuführenden, nur mittelbar der Erfüllung der Fertigungsaufgabe dienende Tätigkeiten zu verstehen sind, treten entweder nicht auf oder können mit speziellen Einrichtungen automatisiert werden.
7. Die Ausführung der Handhabungsfunktionen darf keine gleichzeitigen, ungleiche, koordinierte Bewegungen zweier Arme erfordern, wie z. B. beim Fügen zweier Teile. Sie müssen vielmehr so einfach sein, daß sie in akzeptabler Zeit mit einem einarmigen Industrieroboter, der mit einem Einfach- oder Mehrfachgreifer ausgerüstet ist, oder einem zweiarmigen Industrieroboter, mit nicht unmittelbar gekoppelten Bewegungen beider Arme, ausgeführt werden können.

Eine achte Voraussetzung schließlich berücksichtigt in allgemeiner Form die Wirtschaftlichkeit der Automatisierungsmaßnahme:

8. Die mit Industrierobotern automatisierbaren Funktionen müssen einen wesentlichen Anteil an der gesamten Tätigkeit des Personals ausmachen.

6. Folgerungen für die Anwendung von Industrierobotern

Die vorher genannten erforderlichen Voraussetzungen schränken die Anwendungsmöglichkeiten heutiger Industrieroboter erheblich ein. Es stellt sich nunmehr die Frage, wo diese Voraussetzungen erfüllt sind bzw. relativ einfach geschaffen werden können.

Die z. Zt. erarbeitete Antwort deutet darauf hin, daß es gerade die Bereich sind, in denen schon jetzt Industrieroboter erfolgreich eingesetzt werden, also insbesondere beim

- Punktschweißen
- Spritzlackieren
- Entladen von Druckguß- und Spritzgußmaschinen.

7. Erforderliche Merkmale für Industrieroboter

An solchen Arbeitsplätzen, an denen die Automatisierung mit Industrierobotern erfolversprechend erschien, wurden detaillierte Arbeitsplatzanalysen (vgl. Bild 1) durchgeführt. Daraus resultierten Angaben über die erforderlichen Merkmale von Industrierobotern, die in den Bildern 4 - 6 (100 % =85 Industrieroboter) zusammengefaßt sind. /5/. Die Bezeichnung der Bewegungsachsen zeigt Bild 7. In denselben Bildern sind Ergebnisse aus Untersuchungen des Industrieroboters-Marktangebots angegeben /6/. Aus dem Vergleich der beiden Untersuchungen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

1. Ein dreidimensionaler Arbeitsraum wird an 93 % aller Arbeitsplätze benötigt. Nahezu alle käuflichen Industrieroboter erfüllen diese Forderung. 72 % der Industrieroboter besitzen zylindrische, 14 % kugelförmige und 4 % quaderförmige Arbeitsräume.
2. Die Reichweiten, Drehwinkel und anfahrbaren Positionen in den Armachsen der heutigen Industrieroboter erreichen oder über-

treffen die gestellten Forderungen.

3. Ein zusätzlicher rotatorischer Freiheitsgrad wird in mehr als der Hälfte der Anwendungsfälle benötigt. Auch diese Forderung erfüllen die angebotenen Geräte zufriedenstellen.
4. Die Tragfähigkeit der realisierten Industrieroboter scheint nach Bild 6 höher zu sein als an der Mehrheit der Arbeitsplätze gefordert wird. Da jedoch in den Tragfähigkeitsangaben der Hersteller oft das Greifergewicht nicht enthalten ist, die erforderliche Tragfähigkeit in den Arbeitsplatzanalysen durch das Werkstückgewicht angegeben ist, sind die tatsächlichen Abweichungen geringer als in Bild 6 gezeigt.
5. Für den zulässigen Positionierfehler wurde weitgehende Übereinstimmung in den beiden Untersuchungen gefunden. Wie bei der Tragfähigkeit ist jedoch auch hier das Ergebnis kritisch zu betrachten, da i. a. keine Herstellerangaben vorliegen, bei welcher Last und Verfahrensgeschwindigkeit der Positionierfehler ermittelt wurde.
6. PTP-Steuerung ist an über 90 % der Arbeitsplätze ausreichend und entspricht weitgehend dem Steuerungstyp der vorhandenen Industrieroboter.

Der Vergleich zeigt weitgehende Übereinstimmung von Forderung und Angebot, solange jedes Merkmal der Industrieroboter einzeln betrachtet wird. Dieses Ergebnis ändert sich jedoch wesentlich, wenn man die Summe aller Merkmale betrachtet. Unter der Voraussetzung, daß nur 10 Merkmale eines Industrieroboters zur Beurteilung seiner Anwendbarkeit



herausgezogen werden müssen, und daß in jedem individuellen Merkmal die Anforderungen von 90 % der Arbeitsplätze erfüllt sind, fällt der Anteil der mit diesem Industrieroboter automatisierbaren Arbeitsplätze auf 35 % ab. Er wird reduziert auf 11 % (3 %), wenn die einzeln **betrachteten** Merkmale die Anforderungen an nur 80 % (70 %) der Arbeitsplätze erfüllen.

Daraus ist zu schließen, daß nur mit einem Baukastensystem ein breites Band von Anwendungsfällen sowohl in technischer wie wirtschaftlicher Hinsicht befriedigend automatisiert werden kann. Ein "Universalroboter" wird dagegen in den meisten Fällen die technischen Anforderungen in vieler Hinsicht übertreffen und ist damit, insbesondere für die einfacheren Handhabungsaufgaben, i. a. unwirtschaftlich. Eine Alternative zum Baukastensystem stellen in bestimmten Fällen solche Industrieroboter dar, die für relativ eng umgrenztes Aufgabengebiet konzipiert sind, wie z. B. der "Trallfa" zum Lackieren.

Von den heute angebotenen über 100 verschiedenen Industrierobotern sind nur 2 % als Baukastensystem ausgelegt. Alle anderen besitzen einen weitgehend starren Aufbau. Hierzu ist einer der Gründe zu suchen, warum trotz der großen Anzahl angebotener Industrieroboter diese nur zögernd Eingang in die **Industrie** finden.

8.

Schrifttum

- /1/ Warnecke, H. J. : Betrachtungen zur Automatisierung der Handhabung. Proceed. 3. Int. Symp. Ind. roboter, Zürich, Zürich: 1973
- /2/ Gengenbach, O. Industrieroboter-Erfahrungen in deren Anwendung mav 7/8 - 1974
- /3/ Friedrichs, G.: Sozial und wirtschaftliche Aspekte bei Verwendung von Industrierobotern. Proceed. 3. Int. Symp. Ind. roboter, Zürich, 1973
- /4/ Warnecke, H. J., W. Kirmse, G. Herrmann: Voraussetzungen für die Anwendung von Industrierobotern. wt-Z. ind. Fertig. 63 (1973) 148 - 152
- /5/ Autorenkollektiv: Technische Hilfen für den Arbeitsprozeß. Forschungsbericht T 74 - 03 des Bundesministeriums für Forschung u. Technologie, Bonn.
- /6/ Warnecke H. J., R.D. Schraft: Industrieroboter. Krausskopf-Verlag, Mainz, 1973.

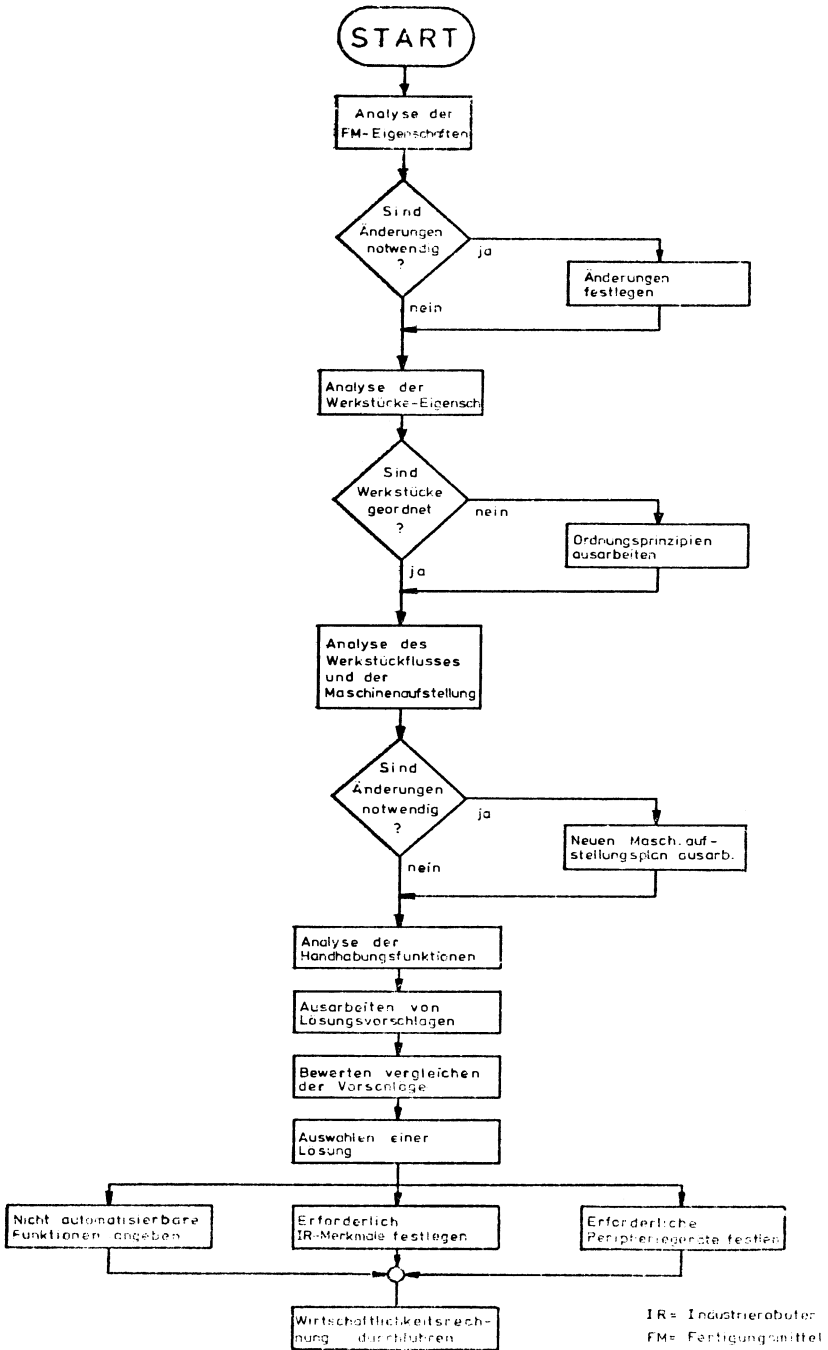


BILD 1: Flußdiagramm zur Durchführung und Auswertung von Arbeitsplatzanalysen

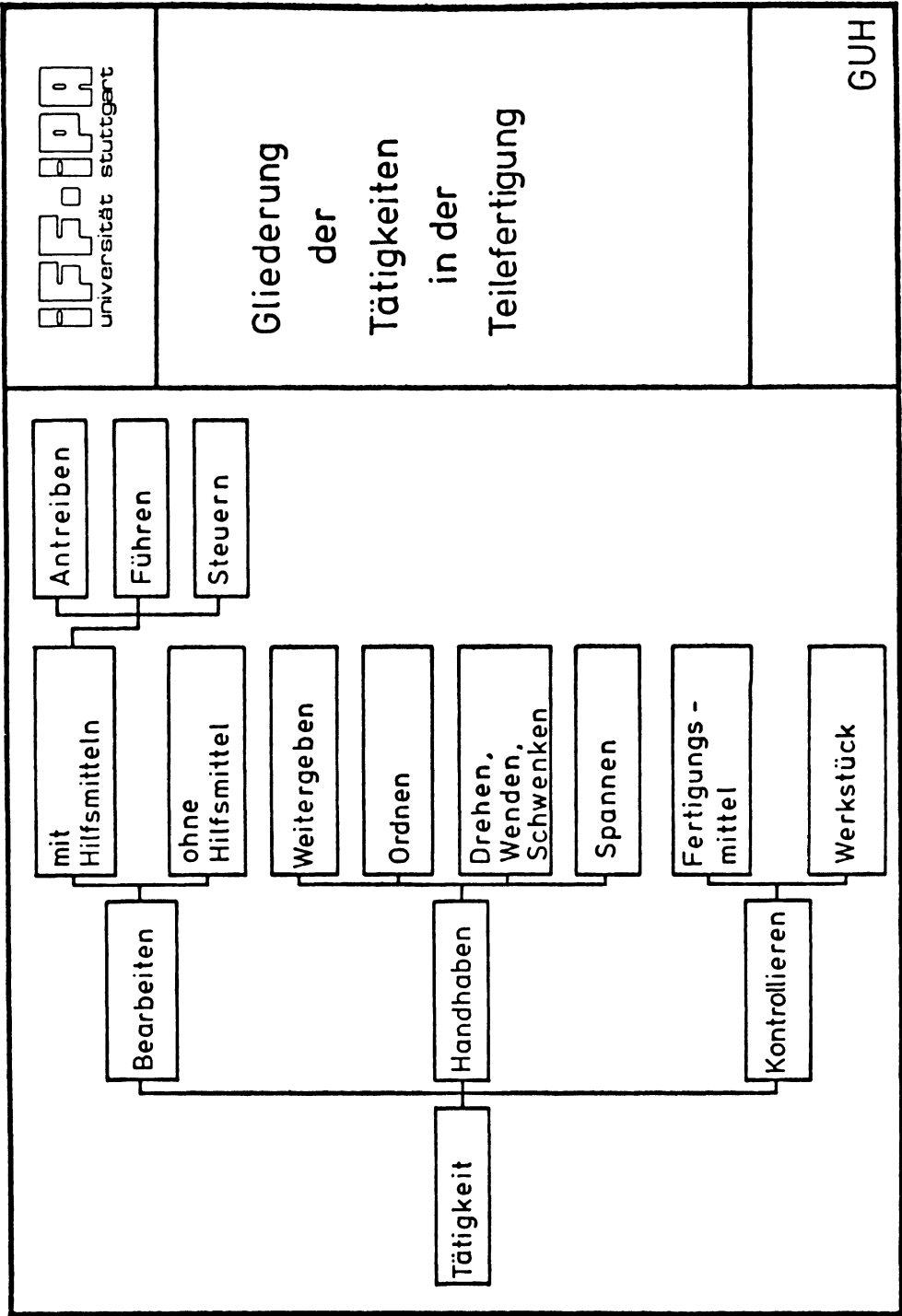




Bild 2

Häufigkeit von  
Industrieroboter-  
Merkmalen (1)

 Marktanalyse

 Arbeitsplatzanalyse

22 357

GUH/RDS

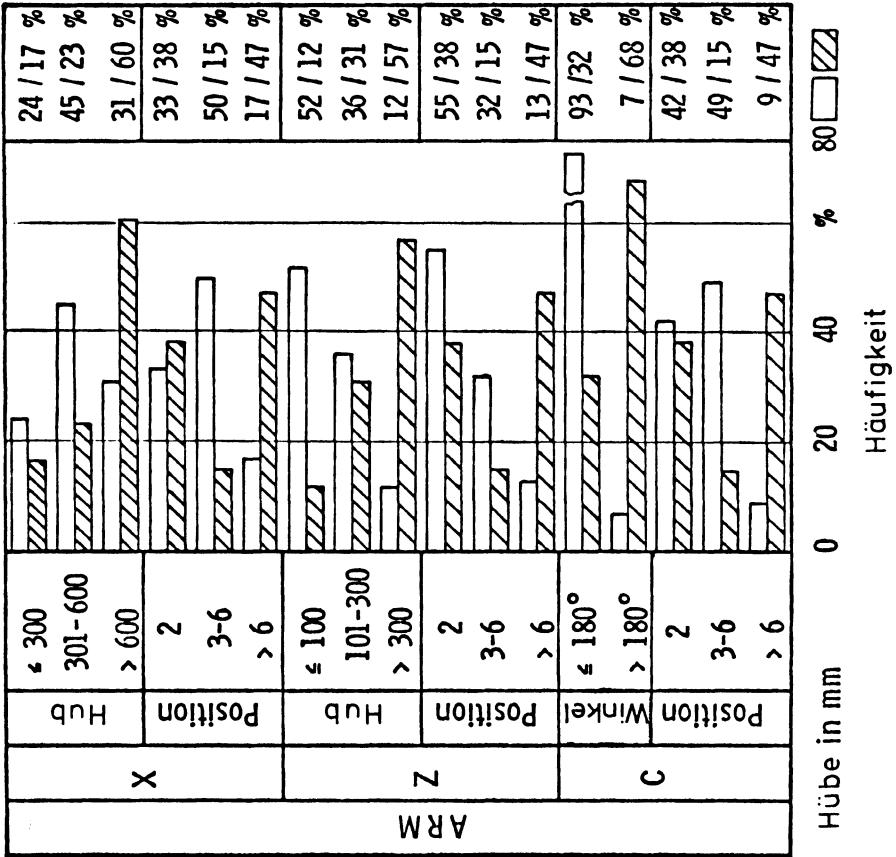
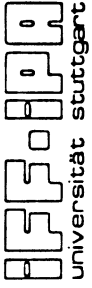


Bild 4



### Häufigkeit von Industrieroboter - Merkmalen ( 2 )

- Marktanalyse
- Arbeitsplatzanalyse

22 358

GUH/RDS

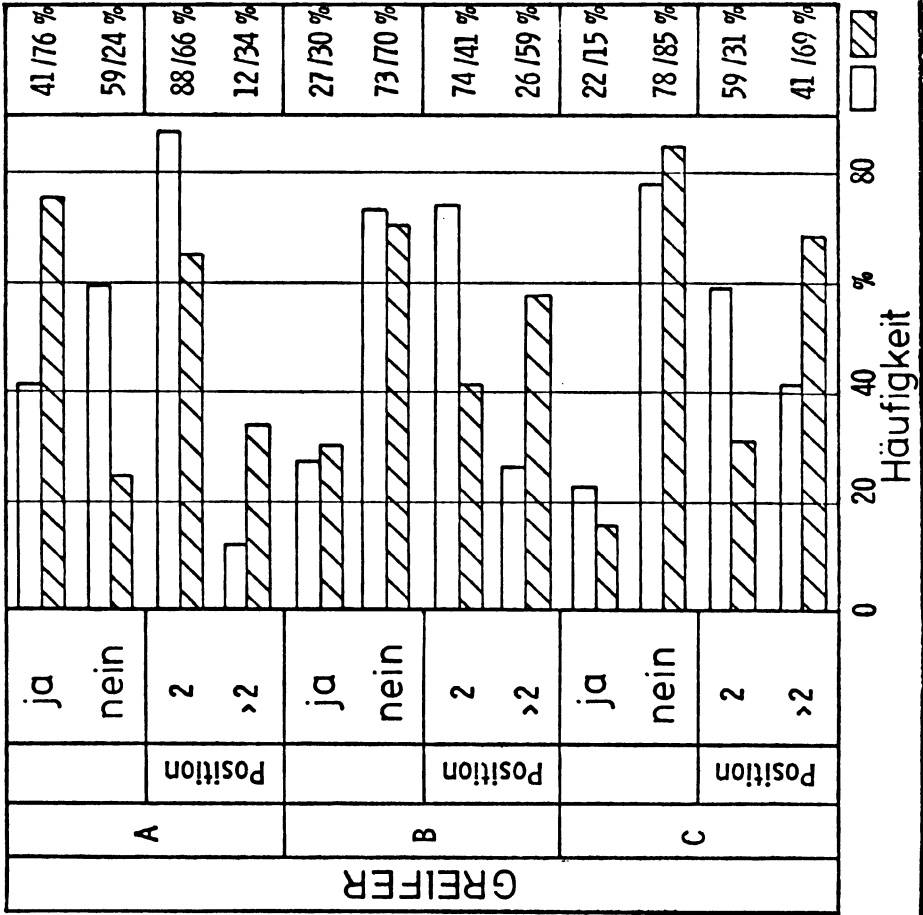


Bild 5

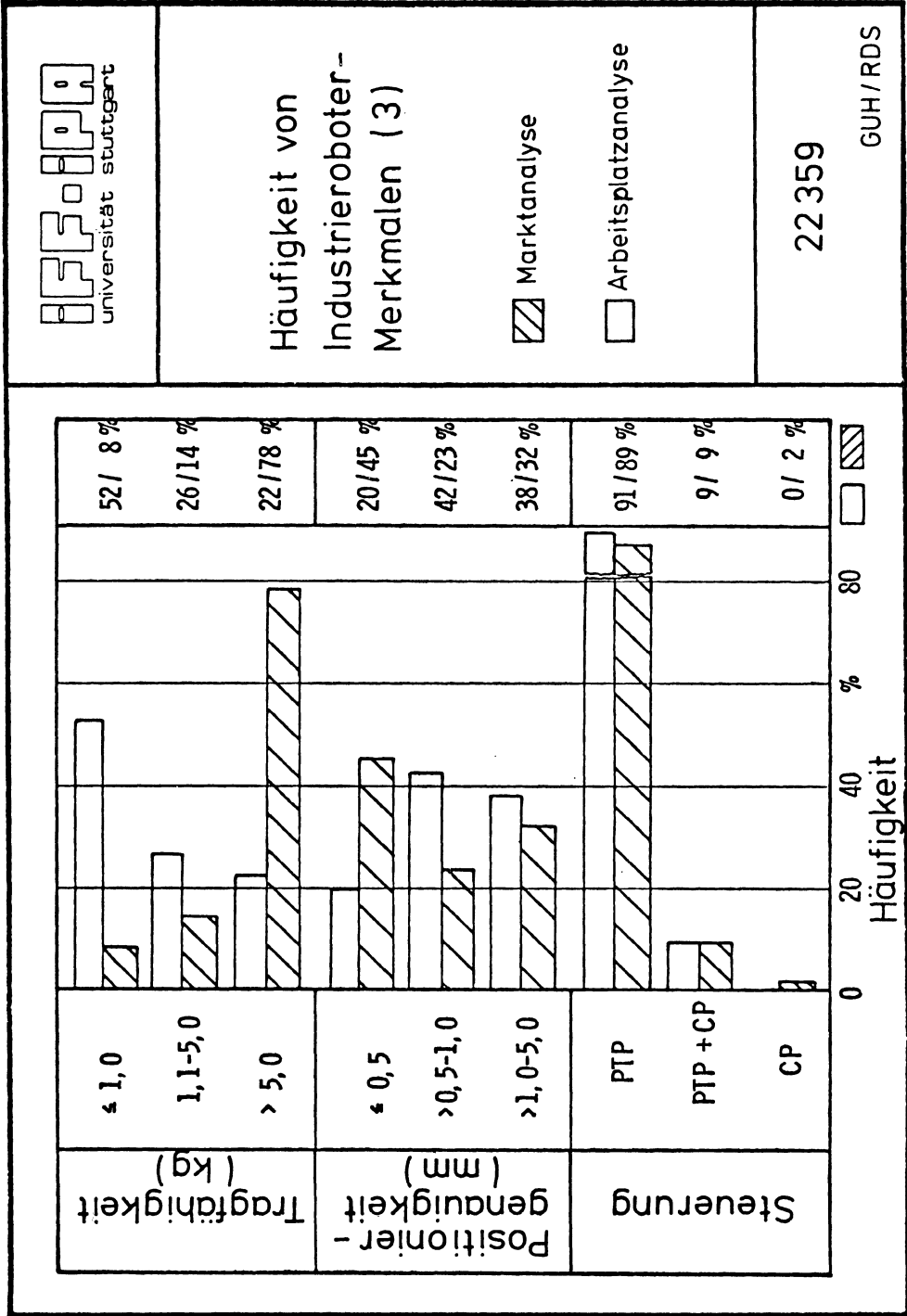


Bild 6

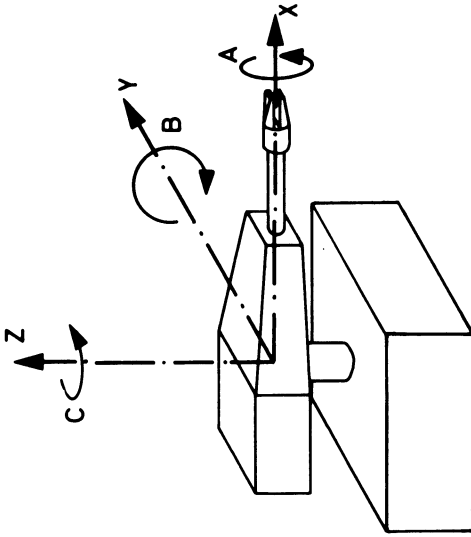


Bild 7: Bezeichnung der Bewegungssachsen bei Industrierobotern



EXEMPLE DE L'ANALYSE D'UNE PLACE DE TRAVAIL EN VUE DE  
L'APPLICATION D'UN ROBOT

par W. Chevalier, Hermes Precisa International S.A., Yverdon

1. Introduction

Que ce soit dans les secteurs de l'industrie automobile, de l'appareillage électrique, de l'électro-ménager, de l'horlogerie, enfin partout où production est synonyme de séries impressionnantes, l'automatisation s'est imposée et est effective.

A l'autre extrême là où l'on fabrique à raison de 5 à 200 ou 300 unités par mois, quantités que l'on trouve par exemple fréquemment dans l'industrie de la machine-outil, la commande numérique dans ses multiples applications a donné également la solution à nombre de problèmes de rationalisation et d'automatisation.

Qu'en est-il entre ces deux pôles, là où les quantités à fabriquer sont insuffisantes pour amortir dans un laps de temps raisonnable les investissements élevés que nécessitent machines transferts, lignes de montage automatique etc. mais où par contre, les quantités sont trop importantes pour négliger les problèmes se situant au niveau de la manutention des pièces, de l'enchaînement des opérations ?

Ce secteur de l'industrie cherche sa voie dans une automatisation propre à ses besoins, dans une rationalisation toujours plus poussée de la manutention des pièces. Aussi n'est-il pas étonnant que le robot industriel avec ses applications aux USA et au Japon, ait d'emblée attiré son attention, comme moyen universel et non plus spécifique à une pièce ou à un équipement donné.

La situation tendue sur les marchés de l'emploi, l'évolution vers le remplacement des postes de travail dangereux, bruyants, sales ou monotones par des équipements techniques automatiques sont également autant de conditions propres à stimuler l'intérêt pour le robot industriel.

Notre société s'est dès le début occupée, voire associée à certaines études visant à définir les possibilités d'introduction et d'application du robot.

Nous avons notamment constitué une petite équipe d'ingénieurs et constructeurs qui s'occupe essentiellement de problèmes d'automatisation dans le sens large du terme, problèmes tels que

- automatisation des opérations de reprise au département des presses telle que mise en chargeur, alimentation automatique par bras mécanique etc.
- lignes de traitement automatiques dans les secteurs galvanoplastie et traitements thermiques.
- introduction de robots industriels.

C'est un projet en cours de réalisation dans ce dernier domaine que je me propose d'analyser et de vous décrire. Mon exposé ne sera donc pas, bien que le titre puisse le laisser croire, une nouvelle méthode sur les techniques d'analyse d'une place de travail, ce sujet ayant déjà été largement traité à de nombreuses occasions.

Il me faut néanmoins rappeler brièvement ici la procédure généralement appliquée dans l'automatisation d'un poste de travail soit par l'apport d'un robot, soit par d'autres moyens plus conventionnels.

Phase 1 - Détermination du but à atteindre par une formulation la plus précise à ce stade

Phase 2 - Critique de la situation actuelle du poste

Phase 3 - Recherche et discussion des diverses possibilités

Phase 4 - Etablissement d'un cahier des charges fixant objectifs, moyens, limites de frais, délais

Phase 5 - Etude du projet

Celle-ci se fait en plusieurs séquences. Tout d'abord l'ensemble du projet est éclaté en éléments-clés pour chacun desquels plusieurs alternatives sont étudiées et valorisées.

L'on ne passe au détail qu'après avoir clairement défini et résolu les problèmes généraux. Il est important de contrôler à intervalles réguliers si l'étude ne dévie pas par rapport à l'objectif.

## Phase 6 - Réalisation

A notre avis il est absolument nécessaire que les personnes touchées par le projet soient consultées et associées aux phases 1 à 5 que nous venons de décrire, ceci par exemple par la constitution d'un groupe de travail.

C'est en suivant un peu le même schéma que nous allons maintenant analyser l'exemple pratique d'application d'un robot à un poste de travail.

### 2. Analyse de la situation

A ce poste nous effectuons les 2 premières opérations d'usinage du segment de la machine à écrire soit tournage 1 et 2 (Fig. 1)

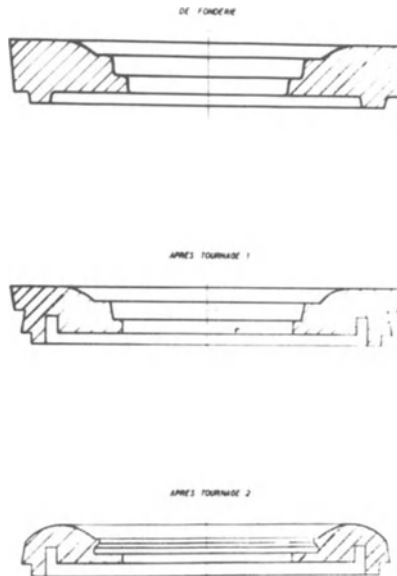


Fig. 1

Le segment est une pièce lourde à deux titres

- par son poids si on le compare à celui des autres pièces d'une machine à écrire
- par l'importance que lui confère son coût de fabrication  
12 opérations    12 min. par pièce

La pièce brute est un disque de fonte grise de

Ø ext.	141 mm	poids 1,5 kg	pour une variante et de
Ø ext.	154 mm	poids 2 kg	pour l'autre

Les stades principaux d'usinage de la pièce sont :

- tournage en 2 opérations
- perçage / taraudage
- fraisage des fentes (qui servent à guider la barre à caractère)
- séparation (1 disque donne 2 segments)
- traitement de surface

Toutes ces opérations, à l'exception du traitement de surface, se font dans le même atelier. Celui-ci offre des conditions de température et d'éclairage normales. Par contre, le bruit y est très élevé environ 85 à 90 db et le dégagement de poussière de fonte lors de l'usinage n'est pas complètement absorbé par le système d'aspiration dont sont munies les machines. Ce qui fait que les conditions de travail dans l'ensemble n'y sont pas des meilleures.

La production journalière est d'environ 500 segments en 2 variantes.

Les opérations de tournage se font sur 4 tours-révolvers automatiques dont 2 se prêtent assez bien à une charge automatique étant équipés de mandrins à serrage hydraulique et présentant une accessibilité suffisante.

Un seul opérateur dessert 2 machines. Les temps d'usinage tournage 1 et 2 sont pratiquement les mêmes, soit environ 3 minutes par disque.

Les opérations de manutention de l'ouvrier sont les suivantes :

1. Prise de quelques pièces placées en vrac dans une caisse métallique et rangement de ces dernières sur un établi.
2. Amenée d'une pièce de l'établi sur le tour 1.
3. Décharge du tour 1.
4. Mise en place d'une pièce brute dans le mandrin du premier tour pression sur boutons poussoirs "serrage" et "mise en marche".
5. Déplacement de la pièce semi-usinée du tour 1 au tour 2.
6. Décharge du tour 2.
7. Mise en place de la pièce semi-usinée dans mandrin tour 2, serrage, respectivement mise en marche.
8. Déplacement de la pièce terminée sur un établi.

L'ouvrier procède également, environ à chaque dixième pièce, à un contrôle dimensionnel et géométrique au moyen d'un outillage spécialement adapté.

Les outils de coupe sont eux contrôlés visuellement de temps à autre, leur durée de coupe est au minimum de 800 à 1000 pièces c'est-à-dire plusieurs jours de travail.

Si nous récapitulons la situation de départ, nous constatons :

- que les caractéristiques du disque-segment à usiner
- les quantités et variantes fabriquées
- l'équipement utilisé, soit les 2 tours automatiques
- la durée de coupe des outils
- les conditions de travail en ce qui concerne bruit, poussière, monotonie

bref un ensemble de facteurs importants, justifiant l'application d'une manutention automatisée sont réunis.

### 3. Objectifs

Partant de là et, après un examen préalable de diverses alternatives,

nous nous sommes fixés le cahier des charges suivant :

3.1 Utilisation d'un robot que nous possédons et qui avait été acheté antérieurement dans le but de permettre à l'équipe chargée des problèmes d'automatisation de définir, de manière pratique, les possibilités et les limites d'un tel engin. Il faut signaler que lors de son achat il avait déjà été tenu compte d'une éventuelle possibilité d'utilisation pour ce projet.

Le fait d'utiliser un appareil qui de par ses caractéristiques, ne correspond pas nécessairement en tous points à ce qui est désiré est intéressant en soi. En effet, par définition le robot est un moyen universel qui doit présenter assez de souplesse pour pouvoir s'adapter à divers postes de travail.

3.2 La pince du robot doit permettre la prise des 2 variantes de disques-segments, chaque variante présentant 3 états différents

- brut
- premier usinage
- deuxième usinage.

3.3 Autonomie du système de 8 heures au minimum, ce qui correspond à l'usinage d'environ 160 pièces.

3.4 Magasin de pièces brutes

- garantissant l'autonomie de 8 heures
- permettant une charge manuelle très simple d'une part et possible pendant le travail de l'installation d'autre part.

3.5 Magasin de pièces terminées

- de même capacité que le magasin précédent
- doit être composé de chargeurs amovibles permettant une utilisation ultérieure
- décharge manuelle doit être possible à n'importe quel moment.

3.6 Equipement des tours

Il est à prévoir un contrôle de la position des pièces dans le mandrin, le nettoyage de ce dernier et une évacuation facile des copeaux.

### 3.7 Inversion et contrôle

Après le premier usinage, la pince du robot vient prendre la pièce par le côté usiné. Or, c'est ce côté qui sera serré par le mandrin du deuxième tour. Nous devons donc faire subir un mouvement d'inversion au disque-segment. Cette inversion doit tenir compte du comportement naturel de la pièce pour éviter un processus coûteux en temps de manutention.

Quant au contrôle, il consistera essentiellement à déterminer s'il y a bris d'outils de coupe par un contrôle de quelques cotes principales selon système passe uniquement. Le passe-pas n'est pas nécessaire, une brèche à un outil ayant pour effet un  $\emptyset$  int. plus petit ou un  $\emptyset$  ext. trop grand.

### 3.8 Commande

Dès le début il était à prévoir que la capacité de la commande programmable du robot serait insuffisante. Aussi avons-nous d'emblée introduit dans le cahier des charges les conditions suivantes :

- prise de la pièce sur un même niveau à tous les postes de façon à éviter des mouvements verticaux au robot et par là les pas de commande correspondants
- synchronisation selon possibilités des mouvements de certains accessoires (magasins par ex.).

### 3.9 En cas de défaillance, panne, etc. de l'équipement, la charge manuelle des deux tours doit être garantie. Cette condition suppose également que le magasin de pièces brutes soit aisément accessible et que l'on puisse y prélever les pièces manuellement avec facilité.

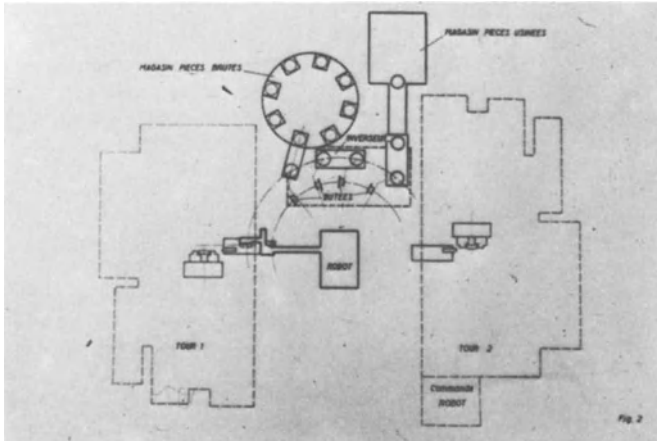
### 3.10 Aspects économiques

Dans l'exemple que nous analysons il était pratiquement impossible de diminuer le temps de charge par l'utilisation d'un robot industriel. Au contraire, nous avons même admis un certain dépassement. Ce dernier ne doit cependant pas être supérieur à 5 % du temps actuel.

Si l'on tient compte d'une durée d'amortissement de 5 ans pour le robot et de 2 ans pour l'équipement périphérique, le montant pouvant être investi dans notre opération se situe à environ Fr. 120'000.-- (l'intérêt du capital investi n'a pas été pris en considération).

#### 4. Réalisation

##### 4.1 Disposition (Fig. 2)



La disposition de la place de travail automatisée montre que les 2 tours sont placés vis-à-vis l'un de l'autre. Le robot constitue, lui, le pivot central de tout l'équipement.

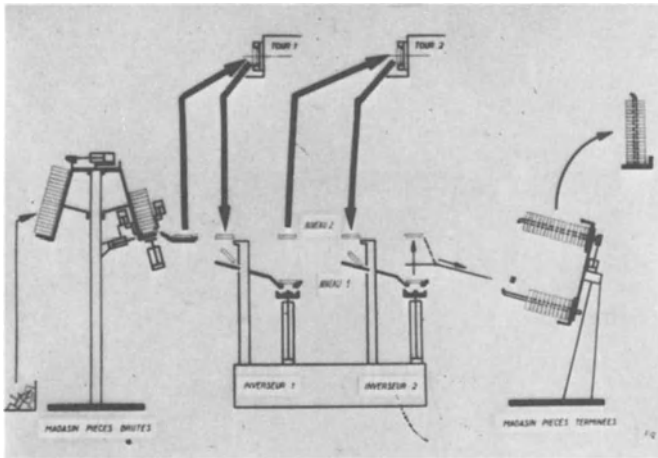
Un magasin de pièces brutes, deux inverseurs et un magasin de pièces terminées se trouvent sur l'arc de cercle décrit par le bras du robot dans sa course du tour 1 au tour 2. L'ensemble de l'équipement couvre une surface rectangulaire de 5 m. x 4,4 m. soit 22 m<sup>2</sup>.

En cas de panne du dispositif, l'implantation prévue permet sans autre la charge manuelle des tours, une des conditions du cahier des charges.

Le robot et les deux magasins sont scellés au sol. Par contre, les inverseurs et 4 butées dont les fonctions seront précisées plus tard sont fixés sur une table-support métallique.

La fig. 3 montre les diverses phases de transfert du disque-segment effectuées par le robot.

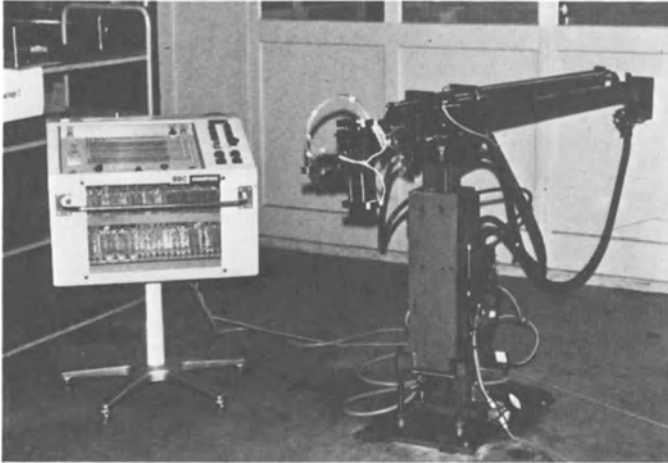




- 1) transport de la pièce du magasin de pièces brutes au tour 1
- 2) transport du tour 1 à l'inverseur 1
- 3) reprise de la pièce sur inverseur 1 et transfert au tour 2
- 4) transport du tour 2 à l'inverseur 2. De ce dernier la pièce passe automatiquement sur le magasin de pièces terminées.

Passons maintenant à l'examen des fonctions de chacun des éléments du système.

## 4.2 Robot



Ce dernier est un appareil de fabrication suédoise présentant 6 degrés de liberté,

course longitudinale max. du bras de	1000 mm (axe x)
course verticale max.	300 mm (axe z)
rotation du bras de $270^{\circ}$	(mouvement C)
course transversale de la pince de	100 mm
rotation de la pince $90^{\circ}$ ou $180^{\circ}$	
serrage de la pince	

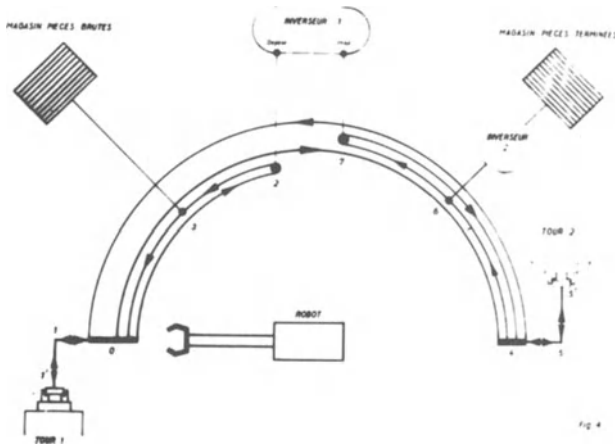
Précision de positionnement en répétition  $\pm 0,15$  mm

Poids maxi des pièces à manipuler 5 kg

Tous les mouvements sont commandés pneumatiquement.

Il est équipé d'une commande électronique programmable par diodes enfichables. Sa capacité sur laquelle nous reviendrons de façon plus détaillée est de 45 pas de travail. Elle comprend 8 canaux entrées ou sorties pour les accessoires périphériques.

Les mouvements du robot sont représentés schématiquement par la fig. 4.



En position de départ, le bras se trouve au point 0 le tour étant arrêté. Dès lors, le déroulement du cycle se présente comme suit :

- 1 - rotation de  $90^{\circ}$  de la pince
- 2 - mouvement longitudinal du bras de 0 à 1
- 3 4 5 - décharge tour 1 c'est-à-dire avance transversale de la pince de 1 à 1', fermeture de la pince du robot, (ouv. pince tour), recul transversal de la pince
- 6 - mouvement du bras de 1 à 0
- 7 - rotation de  $90^{\circ}$  de la pince
- 8 - rotation du bras de 0 à 2
- 9 - ouverture de la pince du robot (pièce tombe sur inverseur)
- 10 - rotation du bras de 2 à 3
- 11 12 13 - prise d'une pièce brute du magasin c'est-à-dire descente verticale de la pince, fermeture pince, remontée verticale pince
- 14 - rotation du bras de 3 à 0
- 15 - rotation de  $90^{\circ}$  de la pince

- 16 - mouvement longitudinal du bras de 0 à 1
- 17 18 19 - charge tour 1 c'est-à-dire avance transversale pince (serrage pince tour) ouverture pince robot, recul transversal pince
- 20 - mouvement du bras de 1 à 0
- 21 - rotation de 90° de la pince
- 22 - rotation du robot de 0 à 4
- 23 - rotation de 90° de la pince
- 24 - mouvement longitudinal du bras de 4 à 5
- 25 26 27 - décharge tour 2 soit avance transversale pince, fermeture pince robot (ouvert. pince tour) recul transversal pince
- 28 - mouvement longitudinal du bras de 5 à 4
- 29 - rotation de 90° de la pince
- 30 - rotation du bras de 4 à 6
- 31 - ouverture pince robot (pièce tombe sur inverseur 2)
- 32 - rotation du bras de 6 à 7
- 33 34 35 - prise d'une pièce semi-usinée sur inverseur 1 c'est-à-dire mouvement vertical de la pince, fermeture pince robot, recul vertical pince
- 36 - rotation du bras de 7 à 4
- 37 - rotation de 90° de la pince
- 38 - mouvement longitudinal du bras de 4 à 5
- 39 40 41 - charge tour 2 soit avance transversale pince robot (serrage pince tour) ouverture pince robot, recul transversal pince
- 42 - mouvement longitudinal du bras de 5 à 4
- 43 - rotation de 90° de la pince
- 44 - rotation du bras de 4 à 0 c'est-à-dire retour à la situation de départ.

Au total 44 séquences de mouvements.

Dans son mouvement de rotation le bras du robot prend 6 positions donc nécessite 6 butées. L'appareil en version standard n'en possédant que 3, nous avons prévu 4 butées additionnelles fixées sur une table avec les inverseurs et n'utilisons que deux des butées du robot. Ces dernières sont employées pour l'arrêt en face des tours 1 et 2. Les butées additionnelles munies d'amortisseurs doivent assurer au bras un arrêt sans vibrations.

La pince du robot est construite de telle façon qu'elle permet la prise des 2 variantes du disque-segment à tous les stades d'usinage. Les disques sont serrés par leur  $\varnothing$  intérieur au moyen de 3 chiens de serrage commandés pneumatiquement. La course linéaire est assurée par un chariot actionné pneumatiquement et fixé à l'extrémité du bras du robot.

#### 4.3 Magasin des pièces brutes (Fig. 5)

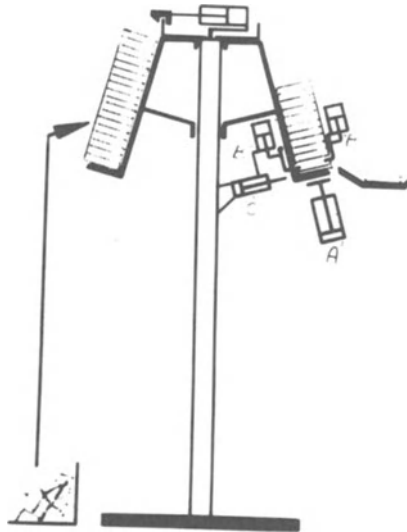


Fig. 5 MAGASIN PIÈCES BRUTES

Le magasin des pièces brutes a une contenance de 200 pièces disposées en 8 colonnes de 25 pièces chacune sur la circonférence d'un tambour conique vertical. Il comprend 1 colonne-support, le tambour porte-pièce rotatif, 1 dispositif diviseur, 1 dispositif distributeur.

Les pièces sont extraites du magasin par le bras de la colonne se

trouvant engagée dans le dispositif de distribution. La sortie d'une pièce du magasin a lieu comme suit :

Le piston pneumatique à 3 positions A se met en position haute. Dans cette position, la colonne de pièces se trouve élevée de quelques dixièmes de mm au-dessus des cliquets B. A ce moment les 2 cliquets s'effacent. Le piston A descend à sa position médiane ce qui correspond à une course égale à l'épaisseur d'un disque. Là, les 2 cliquets B reprennent leur position de maintien des pièces. Dès lors, le piston qui ne soutient plus qu'une pièce prend sa position basse et le tiroir latéral C peut pousser le disque sur une rampe d'où il tombe dans un centrage prêt à être pris par le robot.

Lorsque la colonne est vide, le diviseur fait avancer le tambour porte-pièces d'un 1/8 de tour et le cycle recommence.

#### 4.4 Les inverseurs (Fig. 6)

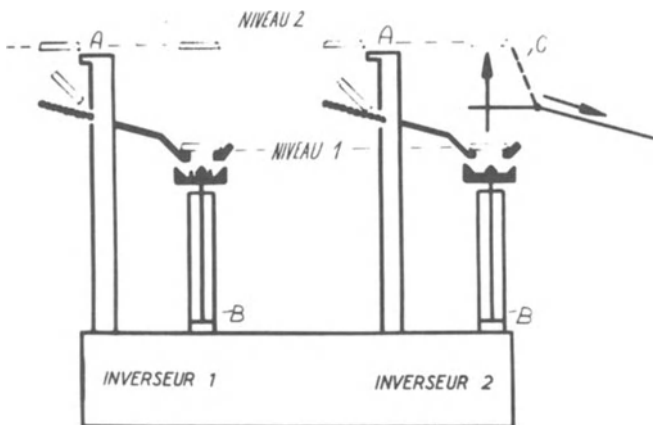


Fig. 6

L'inverseur 1 remplit deux fonctions :

- Renverser la pièce d'un demi-tour afin que la pince du robot puisse la saisir par le côté non usiné en vue de la charge sur tour 2. Ce retournement utilise le comportement naturel de la pièce lorsque, dans sa chute, elle entre en contact avec la

butée A de l'inverseur. Elle tombe ainsi côté usiné dessous sur une rampe et de là dans un centrage.

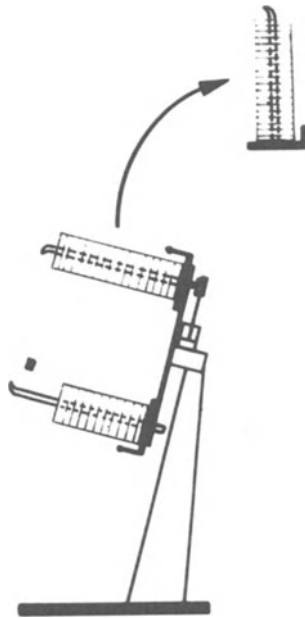
- Contrôler la face usinée.

Une fois dans son centrage, le piston pneumatique vertical qui porte le dispositif de contrôle s'élève et amène la pièce du niveau 1 au niveau 2. Durant cette course un système de palpeurs actionnant des microswitchs procède au contrôle. Si, par suite d'une brèche à un outil, l'une des dimensions contrôlées n'était pas conforme, tout l'équipement s'arrêterait.

L'inverseur 2 remplit également deux fonctions :

- Il renverse la pièce sur son autre face de façon à pouvoir contrôler la face usinée sur tour 2 de la même façon que décrit pour l'inverseur 1.
- Il transfère la pièce contrôlée dans le magasin des pièces terminées. Ce transfert s'effectue en 2 phases. Première phase, transfert du niveau 1 au niveau 2. Durant cette course le piston, dans son mouvement d'élévation, fait basculer le clapet C qui porte la pièce précédente. Cette dernière glisse par l'intermédiaire d'une rampe sur l'un des chargeurs du magasin des pièces terminées. Lors de son mouvement de descente le piston laisse, sur le clapet revenu à sa position initiale, la pièce qu'il avait élevée au niveau 2.

#### 4.5 Magasin des pièces terminées (Fig. 7)



MAGASIN PIÈCES TERMINÉES Fig. 7

Le magasin des pièces terminées a lui naturellement la même capacité que le magasin de brut c'est-à-dire 200 pièces. Il se compose d'une colonne-support, d'un diviseur et d'un plateau tournant incliné sur la circonférence duquel sont montés 8 chargeurs amovibles. Ces chargeurs peuvent être enlevés durant le fonctionnement de l'installation et déplacés par exemple auprès d'autres machines.

Les deux magasins sont synchronisés et commandés en parallèle. Il en est de même des inverseurs d'où simplification de la commande et coût moins élevé.

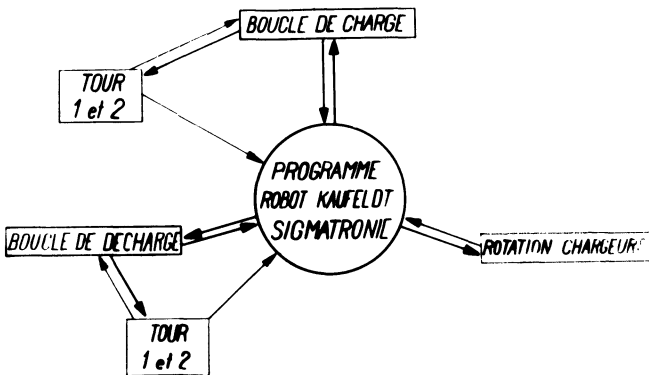
#### 4.6 La commande

Dernier élément à analyser, la commande d'une installation de ce genre doit satisfaire à deux fonctions :



- premièrement commander et contrôler le robot
- deuxièmement faire la liaison entre robot d'une part, les machines desservies et les accessoires périphériques d'autre part.

Le tableau 3 montre les divers constituants de cette commande.



TAB. A. 3

1. La commande du robot qui est l'unité centrale.  
C'est une commande faite d'éléments électroniques BBC Sigmatronic. Le tableau à fiches comprend une série de pistes pour les fonctions du robot plus une série de 8 pistes pour faire les liaisons avec son environnement.
2. 1 boucle de charge qui permet la charge du tour lorsque le robot arrive devant lui.
3. 1 boucle de décharge qui pilote le robot pour évacuer une pièce semi-usinée ou usinée du tour lorsque ce dernier a terminé son cycle.
4. 1 cascade pneumatique qui effectue la rotation des magasins d'un pas pour amener une colonne pleine du magasin de pièces brutes devant le dispositif de décharge et une colonne vide du magasin de pièces terminées devant la sortie de l'inverseur 2.

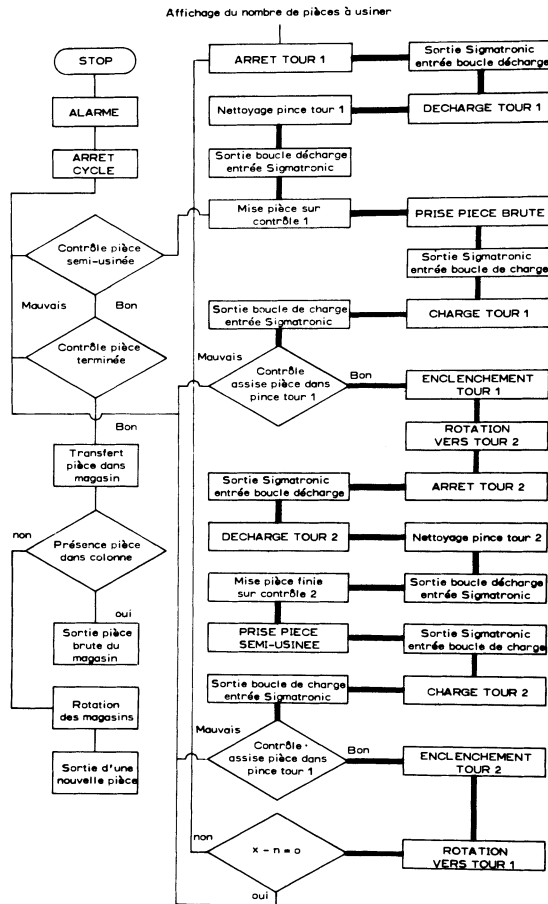


Tableau 4

L'organigramme de la commande tabl. 4 montre lui

- l'enchaînement des diverses séquences
- le champ d'activité de la commande centrale du robot
- et celui des deux boucles additionnelles.

Première phase.

Si le tour est arrêté et le bras du robot dans sa position de départ, les conditions sont réunies pour le démarrage du cycle. Celui-ci donné, sortie de la commande Sigmatronic et entrée dans boucle de décharge.

Décharge tour 1.

La décharge terminée, les conditions sont là pour le nettoyage de la pince du tour après quoi sortie de la boucle de décharge et entrée dans commande Sigmatronic laquelle assure

- le transfert de la pièce sur poste de contrôle de l'inverseur 1
- et la prise d'une pièce brute du magasin.

Deuxième phase.

Sortie de la commande Sigmatronic et entrée dans boucle de charge.

Charge tour 1.

Sortie boucle de charge et passage sur Sigmatronic.

Celle-ci pour autant que la pièce à usiner soit correctement serrée dans le mandrin (poste de contrôle)

- enclenche le tour 1
- commande la rotation du bras du robot vers le tour 2.

Troisième phase.

Si le tour 2 est arrêté, sortie de la commande Sigmatronic et passage sur boucle de décharge tour 2.

Décharge tour 2.

Nettoyage de la pince tour 2.

Sortie de la boucle de décharge et entrée dans commande Sigmatronic qui assure

- le transport de la pièce terminée sur le poste de contrôle de l'inverseur 2
- et la prise d'une pièce semi-usinée sur l'inverseur 1.

Quatrième phase.

Sortie de la commande Sigmatronic, entrée dans la boucle de charge.

Charge tour 2.

Sortie boucle de charge, entrée dans commande Sigmatronic qui pour autant que la pièce soit serrée correctement dans le mandrin du tour met ce dernier en route et provoque le retour du robot vers le tour 1. A ce moment, il y a comparaison entre le nombre de pièces affichées et le nombre de pièces exécutées. Si le nombre affiché est atteint arrêt de toute l'installation, sinon départ pour un nouveau cycle.

Il reste à examiner comment sont enchaînées les fonctions contrôle ainsi que la rotation des magasins. Comme nous le savons les deux magasins et les deux inverseurs ou postes de contrôle fonctionnent en parallèle.

Notre organigramme montre que si la pièce est bonne au poste contrôle 1 nous passons au poste contrôle 2. Si la pièce est mauvaise arrêt de l'installation. Au poste 2 lorsque la pièce est bonne les conditions sont remplies pour son prochain transfert dans le magasin des pièces terminées et pour la sortie d'une nouvelle pièce brute du magasin pièces brutes.

Dans ce dernier un contrôle a lieu si présence ou non de pièces. En cas de non présence, il y a rotation d'un 1/8 de tour des deux magasins puisque 1 colonne vide du magasin de brut signifie un chargeur plein du magasin pièces terminées.

Après rotation du tambour, sortie d'une pièce brute.

## 5. Conclusions

Par cette description de la commande j'ai moi-même fermé la boucle, tous les éléments ayant été passés en revue.

Si nous récapitulons en notation symbolique (selon VDI 3239), l'ensemble des fonctions de base assurées par l'installation réalisée se présente comme le montre la fig. 8.

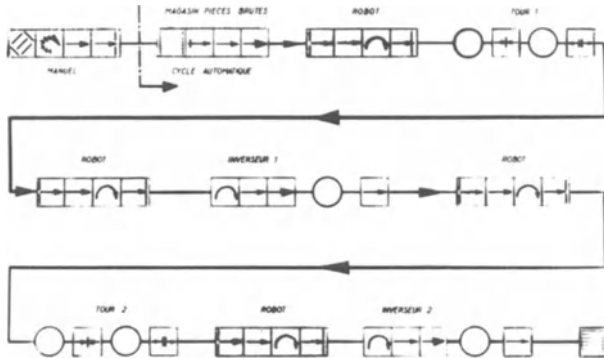


Fig 8

Nous constatons que

- les deux tours et le robot n'assurent que le 60 % environ des fonctions de base
- le solde est pris en charge par l'équipement périphérique que sont les deux magasins et les deux inverseurs / postes de contrôle.

Si, à l'universalité des deux tours et du robot, nous opposons le caractère très spécifique des appareils périphériques.

Si nous savons que le coût de ces derniers est légèrement supérieur à celui du robot...

Nous mesurons mieux l'importance que revêt l'équipement périphérique d'un robot industriel.

Or, cette importance constitue malheureusement un obstacle sérieux lors de l'automatisation de nombre de places de travail.

Une automatisation généralisée, par l'apport de robots industriels, dans notre secteur d'activité, ne sera possible qu'avec l'arrivée sur le marché de robots d'un niveau technique plus évolué qui, tout en restant d'un prix abordable, permettront ou faciliteront certaines fonctions annexes telles que sélection de pièces ou prise de pièces en vrac et par là même réduiront voire supprimeront tout un entourage spécifique coûteux.

## Automatic Assembly with the Edinburgh Arm-Eye System

R.J. Popplestone, G.F. Crawford, C.M. Brown and A.P. Ambler.

Department of Artificial Intelligence, University of Edinburgh, Scotland.

### 1. Introduction

In Edinburgh we have an arm-eye system originally developed in Professor D. Michie's Department of Machine Intelligence. We shall briefly describe here the hardware (built in the main by H.G. Barrow, G.F. Crawford and S.H. Salter), some basic software and some of the work currently being done under R.J. Popplestone's direction in the new Department of Artificial Intelligence (headed by Professor B. Meltzer). A fully integrated system for assembling composite objects (the work of H.G. Barrow, A.P. Ambler, R.J. Popplestone, C.M. Brown and R.M. Burstall) is described in more detail.

### 2. The Hardware

The Edinburgh robot (Barrow & Crawford 1972, Salter 1973) consists of a mechanical grab and two TV. cameras which are suspended above a cable-driven X-Y table, and a turntable which can be placed on the X-Y table. The working area of the table is  $1.5 \times 1.5$  m; the hoist and gape of the grab are about 27 cm. The grab has five degrees of freedom with respect to objects on the table (the rotational motion necessary to drive a horizontal screw is missing); a parallelogram linkage ensures that the raise and grasp motions are rectilinear. The moving components are powered by electric analog servos, interfaced to an H316 computer which is itself connected to a dedicated ICL 4130 POP-2 timesharing system (Burstall & Popplestone 1971). Fig. 1 shows the device.

A force sensor, consisting of foil strain gauges mounted on a phosphor bronze strip and providing three independent measurements (fig. 2) is incorporated into each wrist. The force sensors can measure forces up to some 5 kg, approximately the limit of weight the device can handle; the smallest force that can be reliably detected is about 20 grams.

The current supplied to the motors cannot indicate forces because of the inherently inefficient screw-thread drive used for linear motions of the arm. In the present configuration, the force sensing must proceed in a "move and test" regime, since the sensors must be interrogated through the highest level time-shared POP-2 programs; different electronics and low-level software could allieviate this situation.

The two TV. cameras are connected to the H316 computer by an interface using, unlike most systems, input commands referring to single picture points. Since one point may be input on each scan line, a  $64 \times 64$  array takes just over a second to read. We also have hardware for finding the first point exceeding a specified brightness on a scan line; further developed, it could provide efficient processing of silhouettes.

### 3. Basic Software

A number of basic robot packages are available in the program library. They have been developed by various members of the department, but principally H.G. Barrow, and include:

LINK EXEC which provides communication between the main computer and the satellite;

ROBOT PACK which provides the commands for moving the arm, table and turntable. They include both absolute and relative commands e.g. *moveto(x,y)* and *moveby(x,y)*;

FORCE MOVE which interprets the readings on the force sensors. e.g. *wt()* provides the downward force on the left "hand" - similar functions provide the downward, grip and lateral forces on the right and on the left hand;

PICTURE PACK which provides the functions for loading pictures from the TV. cameras;

PERSPECTIVE which allows one to determine where a point in space occurs in a TV. picture, and to which point on the table a picture point corresponds;

REGION FINDER which finds connected areas of similar grey level in a TV. picture. BLOB FINDER is a modified version which thresholds

the picture and finds white blobs on a black background, and vice versa. Each region (or blob) has its area, perimeter and centroid calculated, and its boundary is described in terms of a starting point and unit steps in the x or y direction;

REGION FINDSHAPE which segments the boundary of a region into a sequence of curved segments. It first performs a s-psi transform on the data converting straight lines to horizontal straight lines and circles into straight lines. The resulting curve is divided up by recursively finding the curve's maximum deviation from a straight line between its end points, and, if this exceeds a threshold, splitting the curve at the point of maximum deviation.

These programs are all described in more detail in the library documentation available from the Department of Artificial Intelligence.

#### 4. The Versatile Assembly Program

The arm-eye device has been used in a versatile layout and assembly system (Ambler *et al* 1974). The idea is that one should be able to tip out a boxful of toy parts into a heap on the table, and leave the system, unattended, to sort out the parts, choose those which are needed to make a particular toy, lay them out neatly on the table, and then assemble them into the toy. In order to do this the system has to be taught previously how to recognise individual parts, and how to handle them. It also has to be programmed to assemble the toy. A typical object used is a car, made up of seven parts ( 4 wheels, 2 axles and the body). Usually one hour suffices for the identification and layout of the parts, and twenty minutes for their assembly.

##### 4.1 Recognition and Layout

This phase is responsible for finding the parts and laying them out ready for assembly. Any objects that are not recognised are treated as "heaps" which might be seperable into useful parts.

The lowest priority task is scanning the table using the wide angle oblique camera to locate objects. Objects are seen as lightly



coloured blobs against a darker background, and a map of the world is built up and maintained with the objects located in imaginary 3-dimensional boxes. When any scene is examined, the system uses a relational matcher (see below) to find the best "explanation" of the scene, by making a correspondence, using the rules of projective geometry, between blobs in the picture and objects in the map. Un-matched blobs are regarded as new objects to be entered in the map.

The next priority task is to move the vertical camera over each object in order to identify it. Identification is solely by the silhouette (including any internal holes) and proceeds as follows. The silhouette is regarded as having a hierarchy of parts. It has first a region; the region has holes, an outline, an area and a perimeter; the outline has segments, and the holes themselves have properties analogous to a region. For each silhouette known to the system (one for each gravitationally stable state of each part) there is a model. This is an idealised (or rather averaged) instance of a number of presentations of the silhouettes. Thus there are averaged values for the numerically measured parts, and the outlines are pared away where they disagree. Any silhouette being recognised is simultaneously being matched against all models known to the system. The matching proceeds down the hierarchy. The area and perimeter of the silhouette are first compared with those of all the models and where these values do not match well enough the model is discarded, and the match proceeds with the remaining ones. If all models are eliminated at any stage, the object in question is classed as a heap. If the region statistics match, then the holes are matched in the same way, again using the relational matcher to obtain the best mapping of holes in the model to holes in the silhouette. If the holes match then the system compares the outlines using the relational matcher. If this is successful, then the silhouette has been recognised, and its orientation is computed from the details of the outline match. A typical model (simplified) is shown in table 1, and a typical sense datum record (simplified) is shown in table 2.

1	NAME	CARBODYONRSIDE
2	AREA	346±35 sq. cms
3	COMPACTNESS	0.4 - 0.8
4.1	HOLE-SET	
4.2	NUMBER IN SET	2 - 2
4.3.1.1	HOLE	
4.3.1.2	AREA	3.3±0.5 sq. cms
4.3.1.3	COMPACTNESS	0.7 - 0.9
4.3.1.4	HOLE OUTLINE	see 6
4.3.2.1	HOLE	
4.3.2.2	AREA	3.1±0.5 sq. cms
4.3.2.3	COMPACTNESS	0.7 - 0.92
4.3.2.4	HOLE OUTLINE	see 7
5.1	OUTLINE	
5.2	NUMBER OF SEGMENTS	11 - 14
5.3	NUMBER OF INT. CORNERS	0 - 1
5.4	NUMBER OF EXT. CORNERS	3 - 6
5.5	NUMBER OF ST. LINES	5 - 8
5.6.1.1	SEGMENT	
5.6.1.2	LENGTH IN STEPS	20 - 25
5.6.1.3	CURVATURE	0.01±0.005
5.6.2.1	SEGMENT	
5.6.2.2	LENGTH IN STEPS	31 - 42
etc		
6	HOLE OUTLINE	
6.1	NUMBER OF SEGMENTS	1 - 1
etc		
7	HOLE OUTLINE	
7.1	NUMBER OF SEGMENTS	1 - 1
etc		

Table 1. A model Data Structure

The relational matcher is used to find mappings between two relational structures, defined over as much of the structure as possible. By a relational structure we mean a set of elements together with a set of properties and a set of (binary) relations defined over them. Thus the set of segments in a model may be one structure and the set of segments in the sense datum record the other. The properties are the curvature and the length of the segment and the relations are the angle between two segments and the distance between them. The function *bestmatch* takes as arguments two relational structures, a function to test whether the properties of an element taken from one structure "match" the properties of an element from the

1	NAME	-
2	AREA	353 sq. cms
3	COMPACTNESS	0.66
4.1	HOLE SET	
4.2	NUMBER IN SET	2
4.3.1.1	HOLE	
4.3.1.2	AREA	3.11 sq. cms
4.3.1.3	COMPACTNESS	0.9
4.3.1.4	HOLE OUTLINE	see 6
4.3.2.1	HOLE	
4.3.2.2	AREA	2.97 sq. cms
4.3.2.3	COMAPCTNESS	0.8
4.3.2.4	HOLE OUTLINE	see 7
5.1	OUTLINE	
5.2	NUMBER OF SEGMENTS	12
5.3	NUMBER OF INT. CORNERS	1
5.4	NUMBER OF EXT. CORNERS	5
5.5	NUMBER OF ST. LINES	6
5.6.1.1	LENGTH IN STEPS	23
etc		
6	HOLE OUTLINE	
6.1	NUMBER OF SEGMENTS	1
etc		
7	HOLE OUTLINE	
7.1	NUMBER OF SEGMENTS	1

Table 2. A typical Sense Datum Record

other. The notion of "matching" is not one of strict equality but one that can be defined to accomodate real data. Function *bestmatch* finds the largest subset of elements of the two structures that can be mapped onto each other so that their properties and relations match.

Once a silhouette has been recognised, a standard action is applied to it. Knowledge imparted in training is used to compute the pick position of the hands, relative to the object, which may be layed out for assembly or may be reoriented if it is not possible to determine its stable state from the first view.

If an object is not recognised it is treated as a heap. The heap smashing program has three independent strategies. The goal of the first two is to pick parts out of the heap; these strategies succeed if a part is being heldat their completion. Parts so removed are place in a free space for identification. The third strategy is just to disturb the heap; this may also happen during unsuccessful attempts at the first two strategies.

The first strategy is in two stages, planning and pickoff. In the planning stage, the heap outline is examined for projections by which parts may be picked up. A projection is a peninsula-like area satisfying minimum criteria of size and slenderness. The projections are considered in order of size; hand placements are sought (with the hands in the usual position and also tilted to present a smaller cross-section) which allow the projection to be picked up but which do not intersect with the outline of the heap or with any other object. If no legal hand placements can be found, the next smallest projection is considered, until no more are left, when the second strategy is invoked.

In the pickoff stage the hands are lowered into the planned position, while monitoring the force sensors for obstructions. If a force is unexpectedly encountered attempts are made to place the hands by widening the grip and moving away from the heap along the axis of the projection. Should resistance still be encountered, the strategy fails. If the hands are successfully lowered, they are closed until resistance is felt, then raised and tilted to dislodge extra parts. If the part is still held, the strategy succeeds.

The second strategy is to make grabs at one-half and one-quarter the height of the heap; if either of these grabs results in an object being held, it is raised and tilted as before.

The third strategy is to push the hands through the heap in a horizontal direction calculated to minimize the probability of pushing parts off the working surface of the table or against other parts.

After each attempt which disturbs the heap, it is examined visually; recognised parts are dealt with appropriately.

#### 4.2 Assembly

This program works blind, using only force sensing. It is not conceptually very different from the controlling programs of industrial manipulators such as the VERSATRAN, differing mainly in the provision of two relatively complex control routines. The first of these is the constrained move routine *amoveby*. It has two parameters, both force vectors;  $f_m$  a force opposing movement and  $f_c$  a constraining force (Fig. 3). Let  $u_m$  and  $u_c$  be the unit vectors in these two directions;  $epsm$  and  $eps_c$  be

small scalar distances. The operation works as follows:-

- 1 If a force greater than  $|f_m|$  in the direction of  $f_m$  is felt then stop.
- 2 Move by  $-eps_m \cdot \underline{um}$
- 3 If a force greater than  $|f_c|$  is felt then move by  $eps_c \cdot \underline{uc}$  and goto 2. Otherwise goto 1.

The resulting movement will not necessarily be in direction  $-\underline{um}$  but along the surface according to the component of  $\underline{um}$  tangential to the surface.

The operation used for hole fitting is called *pattern*. It searches the area around where the hole is supposed to be in a rectangular spiral and has four parameters. The first,  $\underline{F}$ , is a vector with direction along the axis of the hole, and magnitude equal to the limiting force that is to be applied in pushing the shaft into the hole. The second specifies the pitch of the spiral. The third specifies the extent of the area to be searched. The fourth  $\underline{C}$ , is the distance the device must back off to clear components between thrusts.

*Pattern* begins by moving the grasped object in the direction  $\underline{F}$  until contact with another object is sensed. If the distance moved is above a threshold, the shaft is assumed in the hole and is pushed home using *moveby*. Otherwise the pattern search is continued, during which sideways resistance is periodically checked for; its existence implies the shaft is fitted and should be pushed home as above. In its absence, the hand backs off an amount  $\underline{C}$ , moves to the next spot in the spiral, and iterates pushing and testing.

For assembly a "workbench" is used, fixed to one corner of the movable table (Fig. 4). It has a "vice" for holding a wheel while an axle is inserted; this is necessary because the minimum force that the apparatus can detect is sufficient to displace a wheel. A vertical "wall" provides sideways support when putting the second wheel on each axle. the sequence of events in car assembly is:

- (i) The hand puts a wheel in the vice and inserts an axle.
- (ii) It turns the car body upside down, picks up the axle with

the wheel on it and inserts it into the body.

- (iii) Repeat (i) and (ii) for the second wheel and axle
- (iv) Put the car body against the wall, upside down with the two wheels against the wall.
- (v) Push the remaining two wheels onto the protruding axles.
- (vi) Pick up the assembled car and place it on the table.

##### 5. Ongoing and future work

The versatile assembly program indicated many possible improvements, some of which we are now working on. They are in

- (i) the application area -- doing the same thing more economically
- (ii) the intellectual area -- making a more "intelligent" assembly system, particularly one that is easier to instruct.

Concerning (i): Much of the slowness of the program is an artifact of the high-level language used in coding; timing studies do indicate two computational bottlenecks, however; force sensing and picture processing. Remedies for the force-sensing situation were mentioned earlier; for video input, there is the possibility that highly parallel picture processing machines will revolutionise recognition problems; certainly much simpler devices (such as one to find all white-black or black-white transitions in a TV.frame) could make isolating regions quite quick. Segmentation seems bound to use much computation, but there are other techniques for silhouette recognition (e.g. Heginbotham 1973) which are less expensive. In future collaboration with the School of Engineering at Edinburgh we hope to attack these control, mechanical and electronic engineering problems.

Now let us consider (ii), how to make a more "intelligent" robot assembly system. The versatile assembly system is particularly stupid when it comes to the assembly phase. This has to be programmed in terms of specific movements of the arm to bring about the required actions. We would prefer to instruct the device by giving it a sequence of commands (each of which just involve moving one object) to establish spatial relationships between features of the objects being assembled, and leaving the system to decide what arm movements, etc, these mean. Thus a command might be paraphrased as "fit the axle of the axle and wheel

sub-assembly into the rear hole of the car body so that the inner face of the wheel is against the left face of the car body", and indeed given a suitable natural language interface one might say just that. The even more ambitious goal of being able to instruct the device simply by describing the spatial relationships holding between features of sub-parts of the fully assembled object, the properties of the vice, etc and leaving it to the program to plan the sequence of commands, is not our immediate concern, but Messrs Warren and Tate (Warren 1974, Tate 1974) of this University are both developing planning programs capable of tackling this problem.

It is clear that if we are to achieve the goal of instructing the machine by using spatial relationships then the representation of bodies used in the versatile assembly program, which is basically 2-dimensional will not suffice. We are now using a representation of 3-dimensional bodies derived from those used by Lang and Braid (Braid 1973). This allows us to represent bodies that have only plane and cylindrical faces. We consider all the points  $(x,y,z)$  in 3-space, and define the primitive half space  $H$  to be  $\{(x,y,z) \mid x \leq 0\}$ , and the infinite cylinder  $C_r$  to be  $\{(x,y,z) \mid y^2 + z^2 \leq r^2\}$ . Using these primitives, and their complements, and transforming them by members of the affine group of all rotations and transformations in 3-space, and then forming boolean combinations of the resulting sets, we can represent bodies of the class referred to. Thus an axle would be an intersection of a transformed cylinder and two transformed half spaces.

Given this representation of bodies, we have set ourselves two immediate goals.

- (i) To inspect a body, using a plane of light, and form a model of it.
- (ii) To plan the assembly of two such bodies.

The "vision" program (i) works in two phases. The first locates surfaces of the body and their extents, and the second forms the body model from the surface data.

The surface finder depends on the fact that if a plane of light is cast on an object which is then viewed from a point not in the light plane, the image of the light plane (called a stripe) will be a (possibly broken) one-dimensional curve. If the plane of light falls on a plane surface, the stripe is a straight line; for a cylindrical surface, the

stripe is usually an ellipse. An important geometrical fact is that every point of the stripe seen in the T . camera can be located in 3-space; thus 3-d "vision" is possible. (At Edinburgh, K.J. Turner has integrated two-viewpoint stereo vision into a scene-analysis program which deals with complex scenes containing curved bodies (Turner 1974), and H.Baker is studying the use of motion parallax in 3-d vision).

The system locates surfaces by scanning the light plane across an object and recording the resulting stripes for analysis, repeating the process with the object in different orientations (Brown 1974). Typical data resulting from such a scan are shown in Fig.5. Each stripe is processed first to divide it into line and ellipse segments. This is done much as for the outline analysis in the versatile assembly program. Then these segments are clustered; each cluster should correspond to segments from a single surface (note that stripes from a plane surface are parallel and equidistant; similar but more complex conditions hold for ellipses from a cylinder). A least squared error fit is applied to the clustered data, and when such work has been done with the object in several orientations, the resulting surface equations and corresponding segment clusters are passed on to the second phase.

The second phase accepts surfaces and segment clusters which define the minimum extent of the surfaces of the body. It finds cells of space which are occupied by matter by examining the surfaces in decreasing order of the area they have on the body as deduced from the stripe evidence. Initially there is one cell of space under consideration - a cube *skycube*, sufficiently large to contain the whole body. This is successively divided into sub-cells by the given surfaces. Given  $n$  surfaces, one might think there would be  $2^n$  cells, but this is wrong, because some surfaces will fall entirely outside some sub-cells. In fact, the number is polynomial in  $n$ . We do not need to generate all of these - we only split a cell by a surface if there is evidence for the existence of that surface in that particular cell. When all the surfaces have been considered, we can decide which of the resulting cells have matter in them. A cell



has matter in it if at least one of the bounding surfaces has a stripe segment falling across it, or it is entirely surrounded by matter-filled cells. No matter-filled cell should intersect *SKYCUBE*. The body model is taken to be the union of the matter-filled cells.

Our approach to the assembly planning problem consists of producing a program that derives symbolic expressions for the position of the bodies in some commanded goal state (Ambler & Popplestone 1974). This is based upon the observation that, given a set of bodies, their positions in the goal state are defined by members of the affine group, and that a spatial relation between any two of them (e.g. "shaft fits hole") restricts the generality of the positions of these bodies. In fact, if a shaft on body *B1* fits a hole in a body *B2* then one can write the position of *B1* in terms of the position of *B2*, introducing two new scalar variables to correspond with the rotation of the shaft in the hole, and the sliding of the shaft in the hole. Likewise for a face being "against" a face one introduces new variables to correspond to the ability of the face to slide relative to the other. If there is a "loop" in an assembled structure (i.e. two bodies in it are connected, directly or indirectly, by spatial relations holding between more than one feature of each) then some of the introduced variables will be dependent, and can be eliminated. Since the equations involved are not usually linear, it is often the case that we cannot solve the problem analytically, and are forced into numerical techniques. However, we believe that the analytic technique is valuable, not only in that it reduces the dimensionality of the subsequent numerical problem, but also in that it allows questions like "is the piston free to rotate?" to be answered.

In dealing with the positions of bodies we also have to remember constraints such as the fact that two bodies cannot occupy the same space at the same time, and that to be "against" each other the boundaries of two faces must overlap by a certain minimal amount. These constraints give rise to inequalities on the variables, and we intend to use a hill-climbing technique on these inequalities.

The arm will need to be modelled in the assembly planning system, the notion of grasping an object being one of placing the right and left "palms" of the grab against a feature or features of the object. In order

to pick up an object and place it in some other position, the hand must be able to grasp it in the pick up position and still be holding it in the same way in the placing position. This means that the variables involved in the two states are linked and we can use this fact to further restrict and eliminate the variables (Mathur 1974).

#### Acknowledgements

We thank the Science Research Council and the Dalle Molle Foundation for support.

#### References

- Ambler, A.P., Barrow, H.G., Brown, C.M., Burstall, R.M. & Popplestone, R.J. 1974 A versatile computer-controlled assembly system. Artificial Intelligence (in press).
- Ambler, A.P. and Popplestone, R.J. 1974 Inferring the positions of bodies from specified spatial relationships. Artificial Intelligence (in press).
- Baker, H. 1974 Private communication.
- Barrow, H.G. and Crawford, G.F. 1972 The mark 1.5 Edinburgh robot facility. Machine Intelligence 7, Edinburgh University Press, Edinburgh.
- Braid, I.C. 1973 Designing with volumes. PhD Thesis, University of Cambridge.
- Brown, C.M. 1974 The stripe scanning system. DAI working paper (in preparation) Dept. Artificial Intelligence, University of Edinburgh.
- Burstall, R.M. and Popplestone, R.J. 1971 POP-2 Reference Manual in Programming in POP-2, Edinburgh University Press, Edinburgh.
- Heginbotham, W.B. et al 1973 The Nottingham SIRCH assembly robot. Proceedings of the 1st Conference on Industrial Robot Technology, University of Nottingham, International Fluidics Services Ltd., Farnham, England.
- Mathur, G. 1974 The grasp planner. DAI working paper No 1. Dept. of Artificial Intelligence, University of Edinburgh.
- Salter, S.H. 1973 Arms and the robot. BRL memo 9. Dept. of Artificial Intelligence, University of Edinburgh.
- Tate, A. 1974 INTERPLAN; a plan generation system which can deal with interactions between goals. DMI report (in press). Dept. of Machine Intelligence, University of Edinburgh.
- Turner, K.J. 1974 Computer perception of curved objects using a TV camera. PhD Thesis, University of Edinburgh.
- Warren, D.H.D 1974 WARPLAN: a system to generate plans. DCL memo 76, Dept. of Artificial Intelligence, University of Edinburgh.

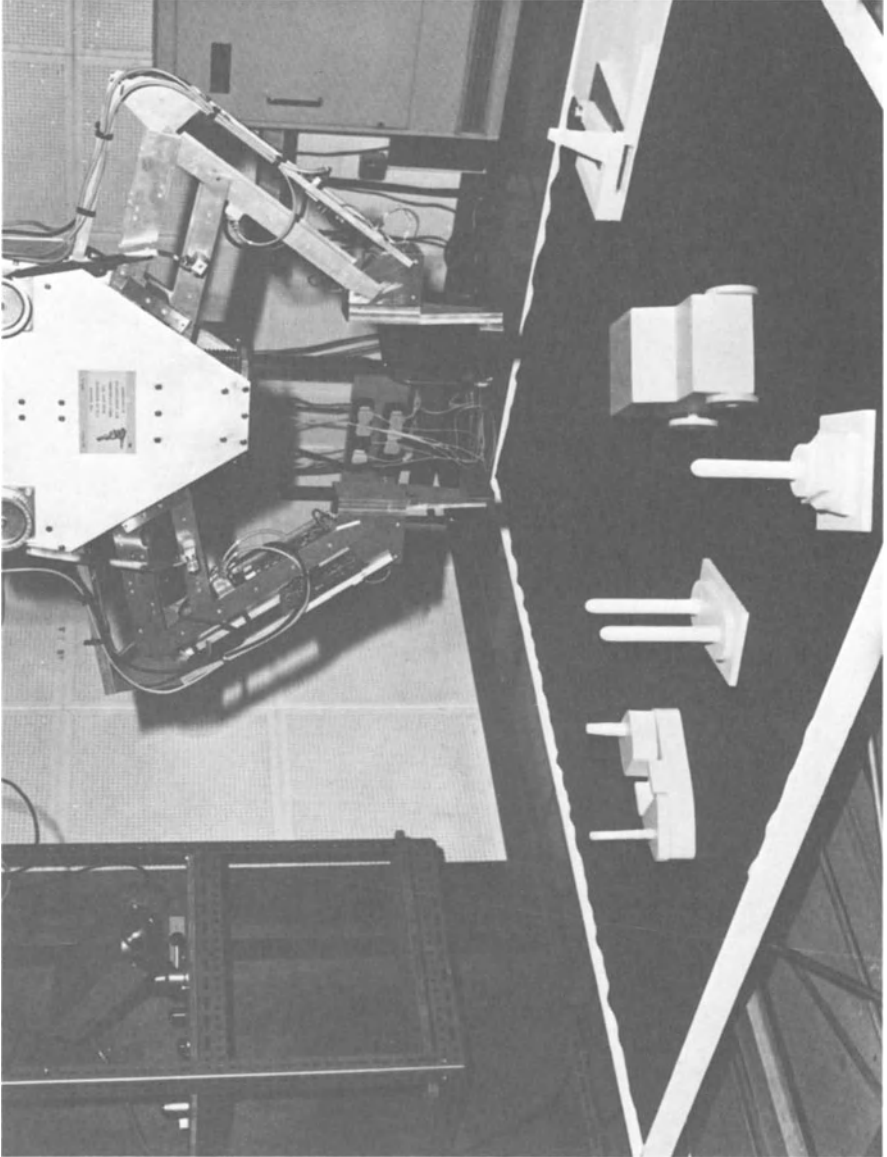
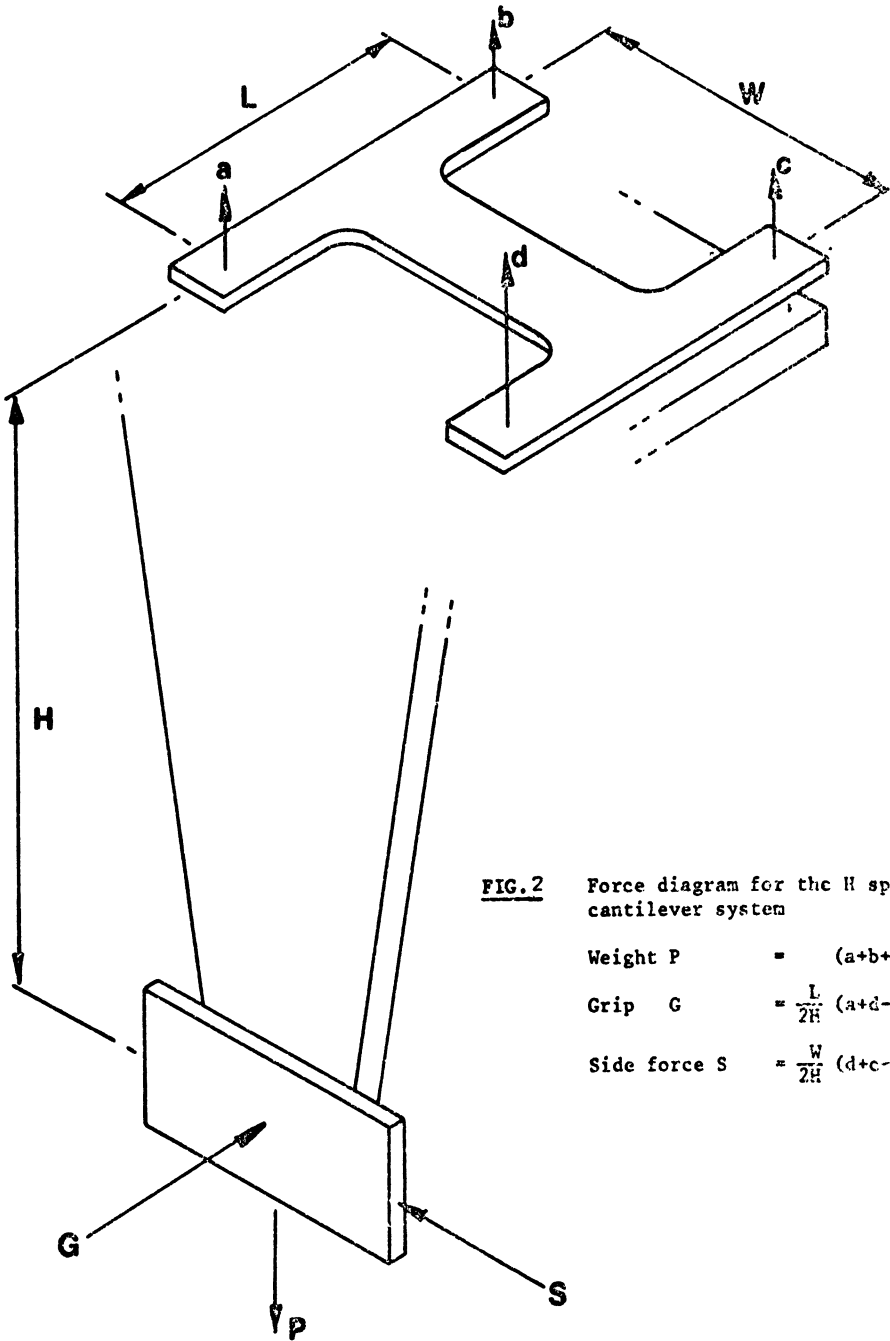


Fig. 1. The Edinburgh Arm-Eye device.



**FIG. 2** Force diagram for the H spring cantilever system

Weight  $P$  =  $(a+b+c+d)$

Grip  $G$  =  $\frac{L}{2H} (a+d-c-b)$

Side force  $S$  =  $\frac{W}{2H} (d+c-a-b)$

**A constrained move**

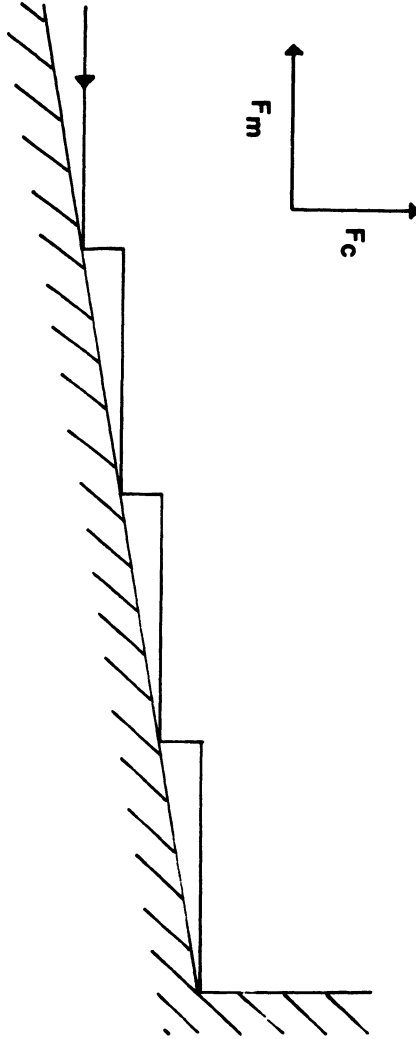


Fig. 3. Constrained move.

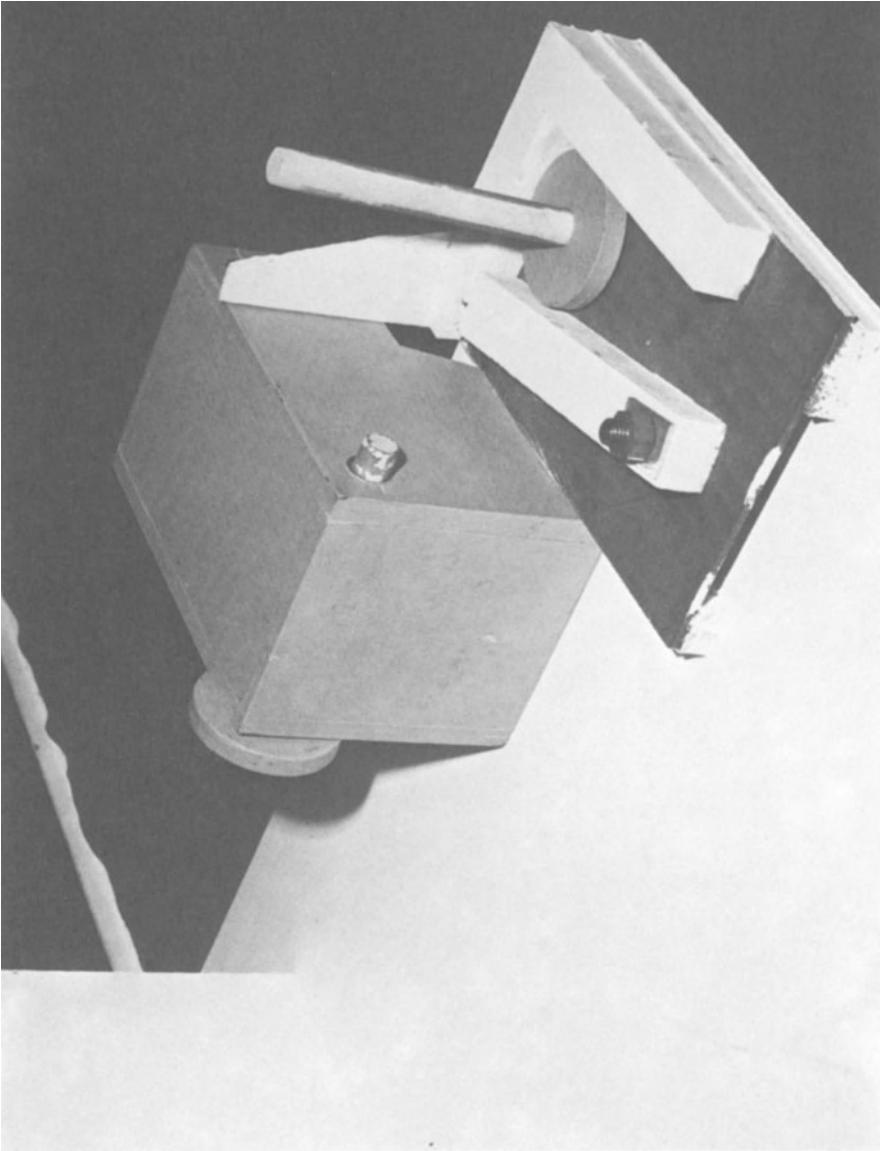


Fig. 4. The car on the workbench.

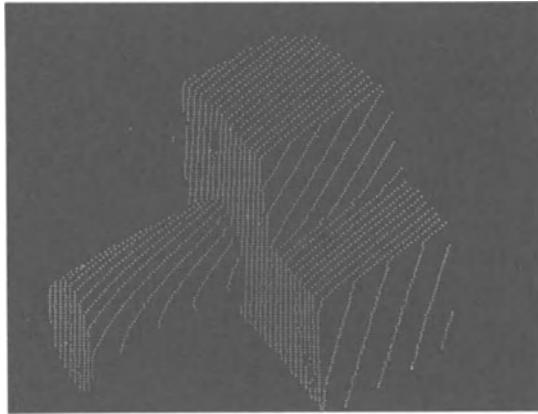


Fig. 5. Output from the stripe finding hardware.

## LA COMMANDE DU ROBOT

D. Helms, Dr ès sc. techn., Institut de Microtechnique,  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

La programmation libre du mouvement d'une pince, d'un outil ou d'un pistolet à peinture est l'une des caractéristiques du robot, si on le compare à d'autres machines automatiques. L'exécution d'un tel mouvement nécessite une structure mécanique possédant suffisamment de degrés de liberté, c'est-à-dire des articulations transversales et angulaires et des moteurs d'entraînement. De plus, le robot doit disposer d'un système de commande qui permet d'actionner les moteurs en fonction du mouvement exigé. Comme le robot fonctionne souvent avec d'autres machines automatiques ou mêmes d'autres robots, la commande doit effectuer également l'intercommunication et la synchronisation des mouvements (1).

### La commande du robot industriel actuel.

Dans le cas des robots industriels, la commande est constituée d'une entrée d'informations, d'une mémoire et de la commande des moteurs comme le montre la figure 1. En fonction des différents genres d'applications, des exigences techniques et économiques, on a réalisé une grande variété de robots qui peuvent être classés en deux groupes (1).

Le groupe I comprend les robots à programmation manuelle. La mémoire du programme est réalisée en général par des organes électromécaniques ou, moins souvent, par des modules électroniques ou pneumatiques. Le programme ne contient que la séquence des mouvements des articulations et non pas les valeurs des déplacements. La séquence peut être programmée par le réglage de la position des cames, par la pose de fiches dans un distributeur à barres croisées, par la position des interrupteurs ou par la connexion des tuyaux entre des organes logiques pneumatiques. Le positionnement, c'est-à-dire la définition de la valeur des déplacements est déterminé par des butées, des interrupteurs ajustables ou des potentiomètres qui sont réglés égale-



ment à la main, programmant en général deux positions seulement. Il s'agit donc d'un positionnement point par point. L'utilisation des moteurs pneumatiques ou hydrauliques implique donc des valves mécaniques, électro-magnétiques ou pneumatiques directes comme organes de commande des moteurs. La précision du positionnement de ces robots, relativement simple, est de l'ordre d'un dixième de millimètre. L'exemple d'un robot industriel Daini-Seiko montre que l'on peut atteindre même un centième de millimètre, ce qui suffit pour le montage automatique des montres.

Le groupe II rassemble les robots qui ont une commande plus développée. Dans ce cas, la mémorisation de la séquence et de la position s'effectue d'une façon électronique ou magnétique. Ces mémoires à grande capacité permettent la commande des modes de positionnement point par point, à plusieurs points et à trajectoire continue. La programmation s'effectue en donnant l'exemple, l'opérateur conduisant l'organe d'action dans le cycle de travail complet. Pour ce faire, il joue sur les interrupteurs ou les boutons d'un pupitre de commande ou il utilise un manche à balais. Autre possibilité: il prend directement l'organe d'action du robot, par exemple le pistolet à peinture et le guide manuellement. Ce genre de programmation demande la réversibilité des engrenages ou un servo-système avec un capteur de force mesurant la force exercée par l'opérateur et qui doit être suivie par l'organe d'action.

Pour certaines applications, comme le transport des pièces ou la soudure par point, il suffit de définir la trajectoire des mouvements par quelques points significatifs. En effectuant le mouvement, on mémorise les coordonnées de ces points, numériquement, dans certaines adresses de la mémoire. L'avantage de ce positionnement point par point ou à plusieurs points est que le programme est facile à corriger. Après la sélection de l'adresse, on peut introduire de nouvelles coordonnées. L'incorporation des sous-programmes est également possible. De plus, on peut programmer aussi la vitesse et l'accélération du mouvement entre deux points. Si le contenu de l'information d'une trajectoire augmente et si les points significatifs se trouvent proches l'un de l'autre, on utilise la technique de la commande à trajectoire continue. Dans ce cas, on enregistre les positions en

fonction du temps sur bande magnétique par exemple. Un tel programme n'est pas modifiable, il doit être refait en cas de changement. Seule l'échelle du temps peut être modifiée en faisant défiler la bande magnétique à une vitesse différente. Le tableau de la figure 2 résume les caractéristiques de ces deux groupes de robots.

Les moteurs d'entraînement des robots du groupe II sont, dans la plupart des cas, des servo-moteurs électriques ou hydrauliques avec une contre-réaction de la position et de la vitesse. La précision du positionnement dépend donc essentiellement de la précision des capteurs de position et du comportement dynamique du servo-système. La précision du positionnement est de l'ordre de 1 mm; en général, elle est moins bonne que celle des robots plus simples du premier groupe.

L'utilisation des moteurs pas-à-pas est également possible. On économise dans ce cas le capteur de position, mais, en revanche, on introduit des sources d'erreurs comme le jeu des engrenages et des paliers, erreurs qui sont compensées dans le cas de la mesure de position avec contre-réaction (2,3). La figure 3 montre les deux principes des servo-moteurs.

La précision de la mesure des positions est très importante pour une commande précise des robots du groupe II et du groupe I si l'on utilise des potentiomètres pour la définition de la course des articulations. On distingue principalement les capteurs de position analogiques et digitaux. Ces derniers peuvent être encore partagés en type digital absolu ou incrémental. La figure 4 montre une vue d'ensemble des différents types de capteurs de position (4).

Les potentiomètres de précision sont les moyens de mesure les moins chers si la quantité d'informations exigée n'est pas plus grande que 10-13 bit. Les "Resolver" et les capteurs digitaux permettent d'obtenir une quantité d'informations jusqu'à 16 bit. Les capteurs optiques ou magnétiques incrémentaux et les "Resolver" à pôles multiples sont les moins chers dans ce domaine. Pour des raisons de résistance à l'usure, de fiabilité, de prix et de grande gamme de mesure, on préfère souvent le capteur incrémental s'il s'agit d'obtenir une grande précision. La figure 5 présente un servo-

système qui utilise un tel capteur (2).

#### La commande des robots de recherche.

A part ces deux groupes de robots industriels, il y a encore une autre catégorie que l'on peut appeler robots de recherche et qui pourrait servir de base à un troisième groupe de robots industriels dans l'avenir. Un schéma de leur structure est présenté à la figure 6. La caractéristique qui distingue ces robots de recherche des robots industriels actuels est la capacité d'acquérir des informations à l'aide d'organes sensoriels et d'adapter leur comportement à un environnement non constant. Ces organes sensoriels tels que caméra de télévision et capteurs de force permettent de créer une sorte de sens de vision et du toucher.

Le sens de vision exige non seulement une caméra, mais aussi un traitement d'information complexe, ce qui requiert l'utilisation d'un grand ordinateur. Les problèmes principaux de recherche sont les suivants (8):

- l'amélioration de la reconnaissance des formes à 2 et à 3 dimensions
- la création des modèles d'environnement
- le développement d'un processus de planification
- le développement des langages de programmation approprié.

Le sens tactile demande un traitement d'information beaucoup plus modeste que celui du sens de vision. L'utilisation d'un mini-ordinateur ou même de circuits électroniques spéciaux est suffisante dans ce cas. A l'aide du sens tactile, le robot peut détecter des obstacles dans la trajectoire du mouvement et les éviter; il peut commander et contrôler la force qu'exerce la pince ou l'outil. De plus, il est capable de mouvements de recherche et peut même effectuer une reconnaissance de formes simples. Les dépenses matérielles qu'exige un tel robot, muni d'organes de vision et de toucher, sont si considérables qu'une application industrielle ne semble pas réalisable dans un proche avenir.

Par contre, l'utilisation du sens tactile seul, qui est relativement modeste en ce qui concerne les investissements, offre déjà beaucoup d'avantages et permet de nouvelles applications des robots.

Un robot de la maison Hitachi qui est muni d'un poignet sensible aux forces est capable d'introduire un piston dans un cylindre ayant une lumière de 20  $\mu\text{m}$  (5). C'est une tâche qui est même difficile pour la main humaine et qui ne peut pas être effectuée par les robots industriels actuels. Comme cet exemple le démontre, le sens tactile est d'un grand intérêt pour le montage des pièces détachées.

Dans le cadre du montage, on peut distinguer deux sortes de mouvements (6): un mouvement grossier réalisant le transport des pièces entre deux points et un mouvement fin qui est effectué si la pièce transportée est proche de l'autre ou même si les pièces se touchent comme dans les cas suivants:

- l'insertion d'un axe dans un palier
- le vissage d'une vis
- la pose d'un volume quelconque dans son logement.

Il est certain qu'un grand nombre de mouvements semblables pour des montages très différents se prêtent à une standardisation. L'élaboration des programmes pour la commande du robot effectuant ces mouvements pourrait être faite une fois pour toutes. Cependant, la possibilité d'avoir une multitude de robots d'une structure mécanique différente exigeant des signaux de commande différents pour l'exécution du même mouvement s'oppose à l'introduction des programmes de montage standardisés.

Une possibilité d'échapper à ce problème a été proposée au "Charles Stark Laboratory" du M.I.T. (7). L'idée de base est de comparer les commandes de signaux non pas au système des coordonnées individuelles de chaque robot, mais à un système imaginaire qui est lié à la pince. Dans ce cas, le système de coordonnées cartésiennes est spécialement indiqué, car il est le mieux adapté à l'imagination humaine. L'exécution du mouvement programmé dans ce système de référence standard, qui est fixé à la pince, demande une transposition des signaux de commande qui tient compte du système des coordonnées individuelles du robot. Ceci est réalisable par une transformation des coordonnées qu'on peut effectuer à l'aide d'un mini-ordinateur ou de circuits de calcul spéciaux. Ce processus de commande s'appelle "Motion Rate Control". La figure 7 montre ce principe.

Voici un exemple qui explique une façon de programmer un robot disposant d'un sens tactile et du "Motion Rate Control".

Exemple d'un montage

But: Le robot doit prendre une vis d'un chargeur et doit la visser à fond.

Programmation

Pupitre de commande: - informations préliminaires:

si forces  $F_{\max}$  }  
ou couples  $M_{\max}$  } => arrêt

- détermination de la position initiale
- début du mouvement M1

Manche à balais: (M1): L'opérateur conduit la pince de la position initiale au chargeur; il prend une vis et la guide devant le trou taraudé.

Pupitre de commande: - fin du mouvement M1  
- début du mouvement M2

Manche à balais: (M2): L'opérateur ouvre la pince et la conduit près de la position initiale.

Pupitre de commande: - fin du mouvement M2.

Sous-routines standardisées

Déplacer X ( $F_{X0}$ ) : déplacer en direction X jusqu'à  $F_X = F_{X0}$

Balayer ( $X_0, Z_0, F_{X0}, F_{Y0}, F_{Z0}$ ):

balayer sur la surface  $S(Y_0, Z_0)$  en gardant  $F_X = F_{X0}$ ;

si  $|F_Y| > F_{Y0}$  }  
ou  $|F_Z| > F_{Z0}$  } => fin

Tourner D ( $M_{X0}$ ): tourner à droite jusqu'à  
 $M_X = M_{X0}$  en gardant  
 $F_X, F_Y, F_Z, M_Y, M_Z = 0$ .

Position initiale: revenir à la position initiale.

Répéter (N): répéter le programme n fois.

En faisant la combinaison de la programmation propre au problème et des sous-routines standardisées, on obtient un programme de montage comme dans l'exemple ci-dessous:

#### Programme de montage

Début            position initiale  
                  M1;  
                  déplacer X( $F_{X0}$ );  
                  balayer ( $Y_0, Z_0, F_{X0}, F_{Y0}, F_{Z0}$ );  
                  tourner D ( $M_{X0}$ );  
                  M2;  
                  répéter (N);

#### Fin

L'acheminement de l'information correspondant à l'exécution d'un tel programme est représenté à la figure 8.

La précision des mouvements faits par le "Motion Rate Control" dépend du temps nécessaire pour calculer les coefficients de la matrice de transformation et de la vitesse du mouvement. La partie grossière du mouvement de transport des pièces ne demande pas une grande précision et peut se faire rapidement. Par contre, la partie fine du mouvement qui implique des déplacements courts peut se faire lentement, ce qui permet une plus grande précision.

Concept de la commande d'un futur robot industriel

- Distinction du mouvement dans les parties grossières et fines
- Utilisation d'un sens tactile
- Programmation se référant à un système de coordonnées cartésiennes fixé à la pince
  - en donnant l'exemple
  - par programmes standard
- Transformation des coordonnées et autres traitements de l'information par mini-ordinateur ou circuit de calcul spéciaux.

Les différentes parties de ce concept sont réalisées indépendamment dans plusieurs laboratoires de recherche. La concentration et la poursuite du développement de ces bases pourraient être un but intéressant et productif.

Pour conclure, voici une remarque concernant l'aspect économique de la commande du robot: une commande simple et peu coûteuse peut, pour certaines applications, demander de grands frais d'installation, donc un coût total élevé. Une commande avancée permettant une programmation simple et standardisée d'une grande variété de robots offre beaucoup d'avantages au point de vue entretien, formation du personnel et possibilité d'élargissement d'applications futures.

LITTERATURE

1. B. Seger: Control Systems for Industrial Robots. Proceedings of the 2nd Conference on Industrial Robot Technology. Conference B1. University Birmingham, U.K., March 1974. International Fluidics Services Ltd., Carlton, Bedford, U.K.
2. H.J. Gevatter: Elektrische Servosysteme für Industrieroboter. 3. Internationales Symposium über Industrieroboter, S. 249-261, Zürich, Schweiz, 1973. Verlag moderne Industrie, 8000 München.
3. C.W. Burckhardt: Ueberblick über Steuerungen für Industrieroboter. 3. Internationales Symposium über Industrieroboter, S. 241-248, Zürich, Schweiz, 1973. Verlag moderne Industrie, 8000 München.
4. J.L. Nevins, D.E. Whitney et al.: Exploratory Research in Industrial Modular Assembly. Report R-800, March 1974. The Charles Stark Draper Laboratory, Inc., Cambridge, Massachusetts 02139, U.S.A.
5. T. Goto, T. Inoyama, K. Takeyasu: Precise Insert Operation by Tactile Controlled Robot. 2nd Conference on Industrial Robot Technology. Conference B1. University Birmingham, U.K., March 1974. International Fluidics Services Ltd., Carlton, Bedford, U.K.
6. J.L. Nevins, D.E. Whitney, S.N. Simunovic: System Architecture for Assembly Machines. The Charles Stark Draper Laboratory, Inc. Report R-764, November 1973. Cambridge, Massachusetts 02139, U.S.A.
7. D.E. Whitney: Resolved Rate Control of Manipulators and Human Prostheses. IEEE Transactions of Man-Machine Systems, June 1969.
8. B. Meltzer, D. Michie: Machine Intelligence 7. Edinburgh, University Press, 1972.



Figure 1:

Schéma de la commande des robots industriels

---

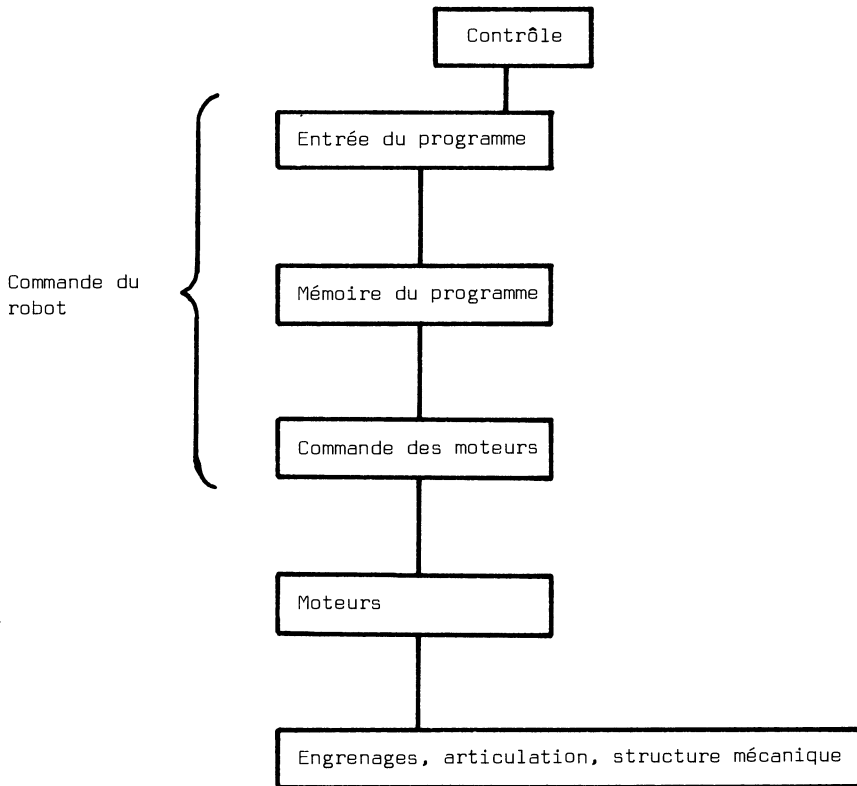


Figure 2: Groupes des robots industriels

	Groupe I	Groupe II
Programmation	- manuelle	- en donnant l'exemple
Type de positionnement	- point par point	- point par point et trajectoire continue
Genre de mémoire	de la séquence: - arbre à cames - sélecteur pas-à-pas - distributeur à barres croisées - module logique électronique ou pneumatique	- toutes sortes de mémoires magnétiques et électroniques
	de la position: - butées - interrupteurs ajustables - buses - potentiomètres	
Nombre des pas du programme	- 50	- 10000
Organes de commande des moteurs	- valves (mécanique, électromagnétique, pneumatique)	- valves - électronique de puissance
Moteurs	- pneumatique, hydraulique	- hydraulique, électrique
Prix en dollars	500 ÷ 2000	- 4000 ÷ 10000

Figure 3: Principes des servo-moteurs.

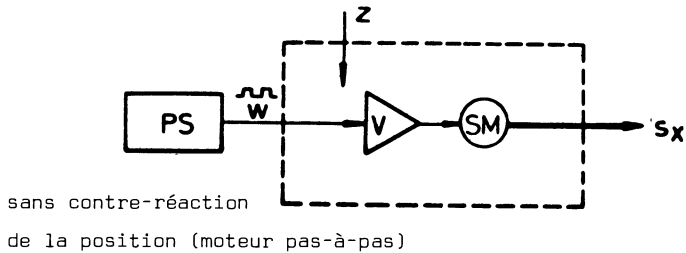
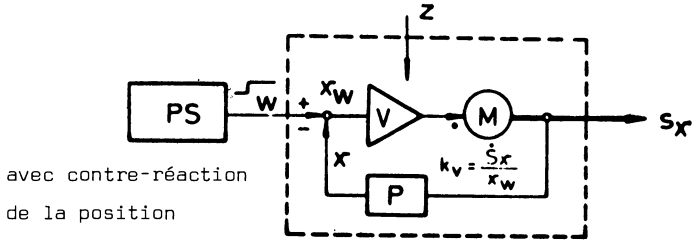
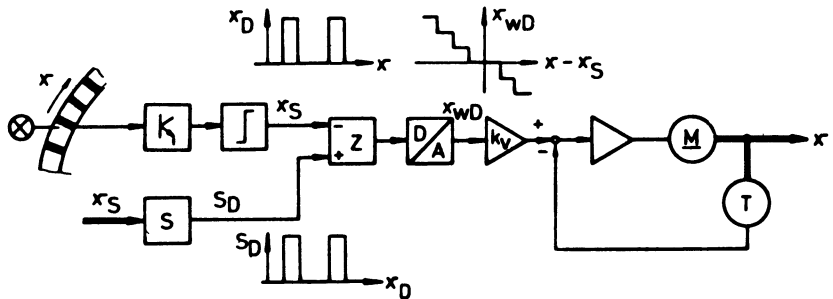


Figure 5: Servosystème incrémental.



- M SCHEIBENLÄUFERMOTOR
- T TACHO-GENERATOR
- X POSITION DER KOORDINATE
- $x_s$  SOLLWERT FÜR X
- Z ZÄHLER

INCREMENTALES SERVOSYSTEM

Figure 4: Capteurs de position.

Type du capteur	Prix du capteur en dollars	Prix de la sortie digitale en dollars	Précision en bit
Potentiomètre de précision à film conducteur (exécution commune)	50	100	10
Exécution spéciale	150	200	13
Codeur optique incrémental	1600	50	16
Codeur optique absolu	5500	50	16
"Wire wound Resolvers" à une vitesse	500	700	13
A plusieurs pôles	500	700	16
A deux vitesses	1300	2000	16

Figure 6: Schéma de la commande des robots de recherche

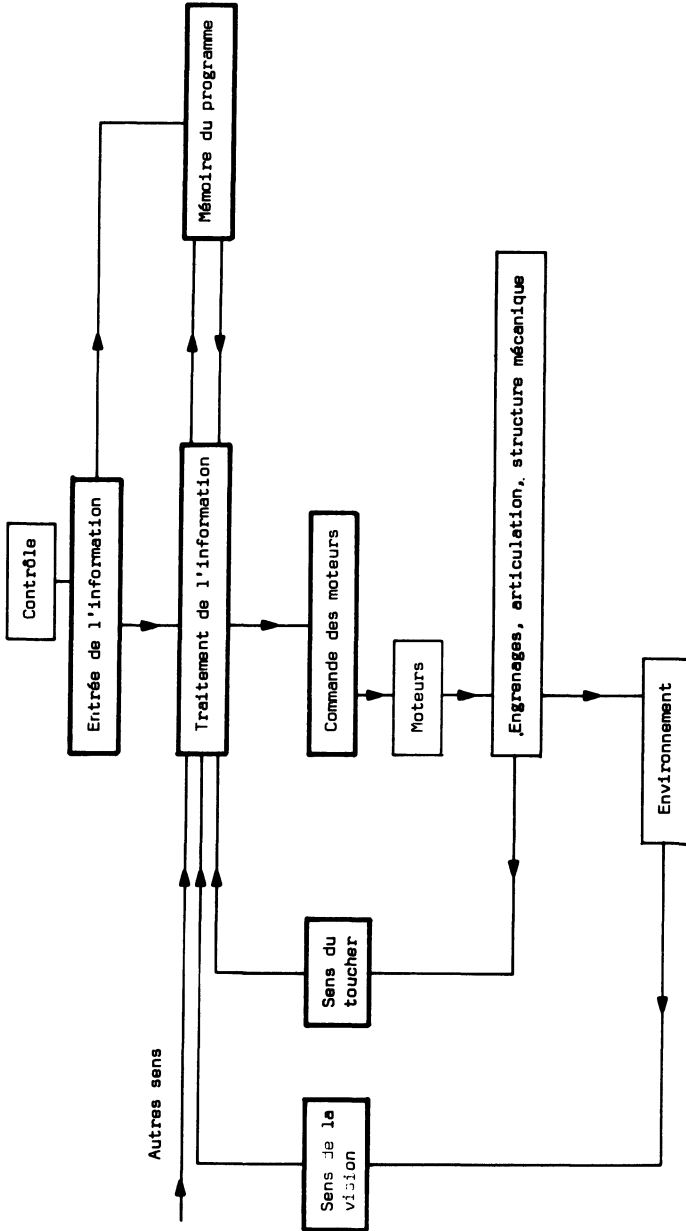
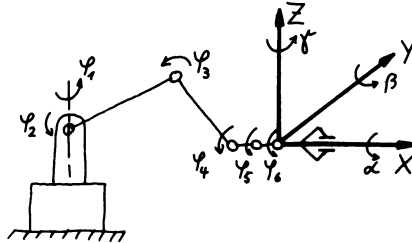


Figure 7:

Princip de la "Motion Rate Control"

(développée par le Charles Stark Draper Laboratory, MIT)



Coordonnées relatives  
à la pince:

$$\vec{X} = \begin{matrix} X \\ Y \\ Z \\ \alpha \\ \beta \\ r \end{matrix}$$

Coordonnées du robot:

$$\vec{\varphi} = \begin{matrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \\ \varphi_5 \\ \varphi_6 \end{matrix}$$

Transformation des coordonnées par la matrice de Jacobi [J] :

$$\vec{X} = [J] \vec{\varphi}$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial X}{\partial \varphi_2} & \dots & \frac{\partial X}{\partial \varphi_6} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial r}{\partial \varphi_1} & \dots & \dots & \frac{\partial r}{\partial \varphi_6} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial X_i}{\partial \varphi_i} = \frac{\partial X_i(\varphi_i)}{\partial \varphi_i}$$

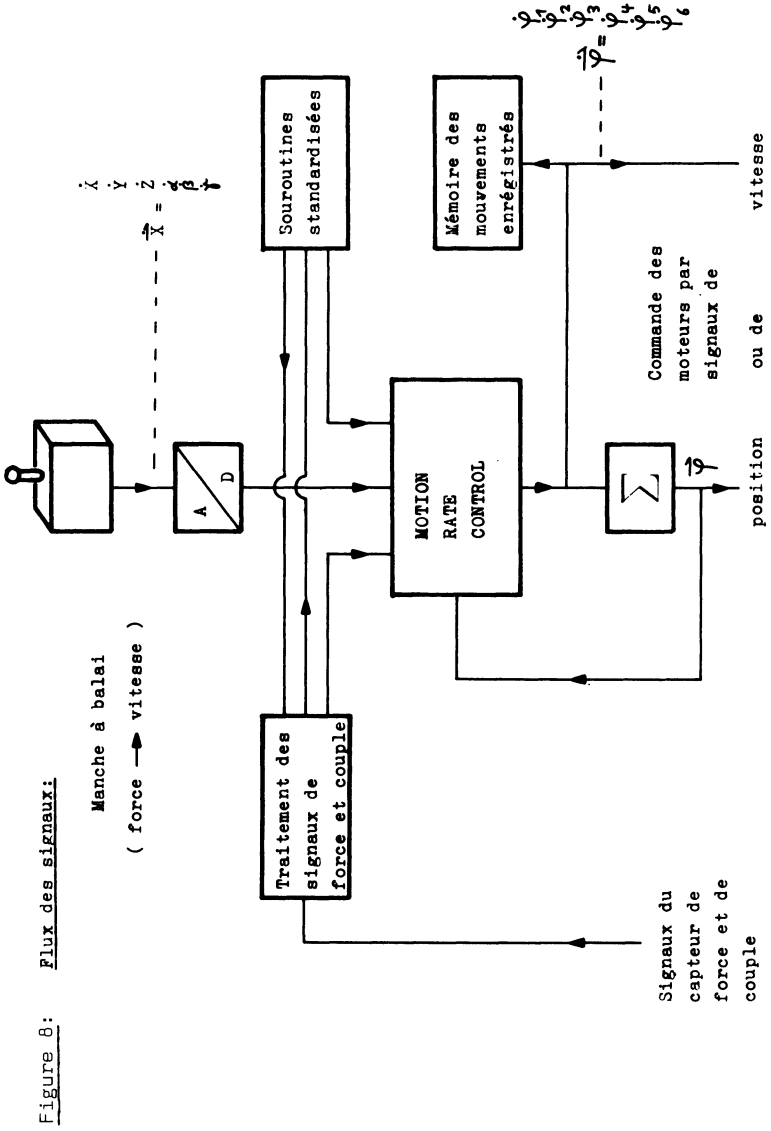
Commande des moteurs par une

Transformation des coordonnées

$$\vec{\varphi} = [J]^{-1} \vec{X}$$

Positions (ou vitesses)  
des articulations

Positions (ou vitesses) de la  
pince ou de l'outil



LE DEVELOPPEMENT D'UN ROBOT POUR LA MICROTECHNIQUE

par C.W. Burckhardt et M.-O. Demaurex,  
Institut de Microtechnique de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Les robots industriels ont trouvé des applications pour la manipulation de grandes pièces et en particulier dans l'industrie automobile. Quels sont les possibilités d'application et les problèmes qui se posent lors de la conception d'un robot pour la microtechnique ?

Pour commencer, il faut définir la "microtechnique". Sans être exhaustif, les trois points suivants caractérisent en général les produits de microtechnique:

- Il s'agit de mécanismes de petites dimensions, avec des pièces plus petites que la main humaine (exemples typiques: machines de bureau, montres, relais).
- Il s'agit de fabrication en grande série, c'est-à-dire au moins quelques milliers de pièces, ce qui distingue la microtechnique de la mécanique de précision tout court.
- Il s'agit en général d'appareils pour le traitement de l'information. Ceci montre la parenté entre la microtechnique et l'électronique: l'électronique concerne la partie électrique et la microtechnique, la partie mécanique du traitement de l'information.

On peut se demander pourquoi un institut de microtechnique désire s'occuper de robots. Il y a plusieurs raisons à cela:

- pour promouvoir l'utilisation de ces robots; si l'on étudie la fabrication rationnelle de moyennes ou de grandes séries, il faut s'occuper des moyens de production modernes et le robot en est un.
- Le robot peut devenir un produit de microtechnique. Si, vraiment, il franchit le seuil de l'acceptation, on peut prévoir une fabrication en série avec un prix de revient relativement bas. Citons comme



exemple la maison Olivetti qui emploie 6000 ouvriers pour le montage de produits de microtechnique, ouvriers qui pourraient être remplacés un jour par des robots de montage. Le robot industriel peut donc être considéré comme un produit de diversification pour l'industrie de microtechnique.

- Finalement, le développement de robots industriels est intéressant et stimulant pour le jeune ingénieur, raison de plus pour s'en occuper.

Comme actuellement, l'offre sur le marché des robots pour la microtechnique est encore quasiment nulle, il faut envisager le développement d'un tel robot. Est-ce qu'il suffit de réduire les dimensions de l'Unimate pour faire un robot pour la microtechnique ? Apparemment non. Comme le montage représente la tâche la plus importante, nous visons un robot de montage. Nous essayons de faire le pont entre les résultats de la recherche sophistiquée présentée dans l'article de R. Popplestone et les besoins de l'industrie. Y a-t-il déjà des possibilités d'adapter à court terme les résultats des recherches faites à Edimbourg ou au M.I.T. aux besoins de notre industrie ?

Dans ce qui suit, nous aborderons les problèmes de construction mécanique. Il y a quelques options à prendre pour la réalisation d'un petit robot et nous en discuterons.

Tâche	Précision (mm)	Vitesse (m/sec)	Degrés de liberté
Chargement de machines	0,05	0,1	3
Montage de platines de montre	0,01	0,3	3
Montage de machine de bureau		sens tactile	6
Chargement et montage, pièces en vrac		sens visuel	6

Tableau I: Etapes du développement d'un robot pour la microtechnique.  
Tableau I: Le tableau I montre les étapes du développement d'un robot pour la microtechnique. On passera du robot de chargement au robot de montage.

Robot de montage:

- 1) Montage de platines avec pièces ordonnées.
- 2) Montage plus compliqué avec pièces ordonnées.
- 3) Idem, mais avec pièces en vrac.

Pour le chargement d'une machine, on demande "précision et vitesse". Ce sont les deux exigences primordiales. Les chiffres indiqués représentent des ordres de grandeur. De combien de degrés de liberté faut-il munir le robot ? On constate que pour beaucoup d'applications, on peut se contenter de trois degrés de liberté. Par exemple, pour équiper des platines de montre, il faut la précision, la vitesse, mais trois degrés de liberté suffisent. Chaque degré de liberté additionnel risque de diminuer la précision. Il faut aussi bien réfléchir à la façon dont on veut accéder à certains endroits; cela détermine le choix de la nature des coordonnées. Pour cette raison, on donne souvent la préférence aux coordonnées cylindriques.

Dans l'optique de ce qui précède, le constructeur doit décider s'il préfère construire un robot modulaire ou un robot universel. Dans le premier cas, pour le montage d'une platine, par exemple, avec un robot à trois degrés de liberté et à coordonnées cylindriques, le constructeur combinerait deux modules de translation avec un module de rotation, robot qui pourrait être complété ultérieurement par des modules additionnels, afin d'arriver finalement à un robot ayant 6 degrés de liberté. Dans le deuxième cas, on choisirait probablement deux types de robots universels: un robot à trois degrés de liberté et coordonnées cylindriques et un deuxième robot à 6 degrés de liberté et coordonnées angulaires.

Nous envisageons dans l'avenir un robot universel capable de prendre des pièces en vrac, de les mettre n'importe où et facilement programmable. Ce robot aurait 6 à 7 degrés de liberté; il serait muni d'une main échangeable avec sens tactile et aurait un sens visuel. La transition entre un appareil simple et un appareil très sophistiqué est difficilement prévisible.

Essayons de mieux spécifier le cahier de charges à l'aide du tableau II précisant davantage les tâches de montage de pièces.

		Dans l'avenir	
		Sens tactile	Sens visuel
Saisir les pièces	avec un chargeur	X	XX
Transporter les pièces pièces	(précision moyen- nant des butées)		
Tester des pièces	avec un outil spécial	XX	X
Fixer des pièces	avec un outil spécial	X	
Tester des fonctions	avec un outil spécial	XX	X

Tableau II: Moyens utilisés pour les différentes tâches d'un robot de montage.

Tableau II: Le robot de montage doit pouvoir saisir les pièces, les transporter, les monter (axe dans un trou ou deux pièces ensemble), éventuellement les fixer d'une façon ou d'une autre (vissage, collage, etc.) et, enfin, tester des fonctions (par exemple, vérifier le mouvement d'une charnière). Sur la colonne de gauche du tableau II sont indiqués les moyens qui permettent au robot actuel d'exécuter ces tâches. Ce sont tous des moyens spécifiques qui doivent être adaptés à chaque utilisation, ce qui enlève l'universalité au robot. Quand l'on disposera d'un robot ayant un sens tactile, certaines tâches (comme par exemple tester les pièces et les fonctions) ne nécessiteront plus de moyens spéciaux; le robot sera donc plus universel. L'universalité sera encore accrue avec l'introduction d'un sens visuel. A ce moment là, il sera possible de saisir les pièces en vrac et de les tester d'une façon facile.

Pour revenir au problème de la précision, on constate en regardant les catalogues des robots actuels qu'en général la précision d'une coordonnée est de l'ordre de 1:1000 de sa portée maximum, quelquefois de 1:2000 et même de 1:5000. Il s'agit là d'une règle assez générale: par exemple, pour une précision de 1:1000 sur une portée de 2 m., on atteint une précision de 2 mm. En conséquence, un robot d'une grande précision devrait avoir une

petite portée, mais si l'on veut avoir une précision de 0,01 mm, la portée devrait être de 10 mm. On obtiendrait ainsi un tout petit robot qui ne serait pas d'une très grande utilité. Il ne suffit donc pas de réduire les dimensions, mais il faut aussi revoir les concepts et s'inspirer d'autres machines de précision qui ont des portées très longues et qui garantissent néanmoins les 5 µm.

D'autres problèmes existent: Il ne suffit pas de réduire l'échelle des robots. Comme le montre le tableau III, le constructeur de robots doit faire certains choix.

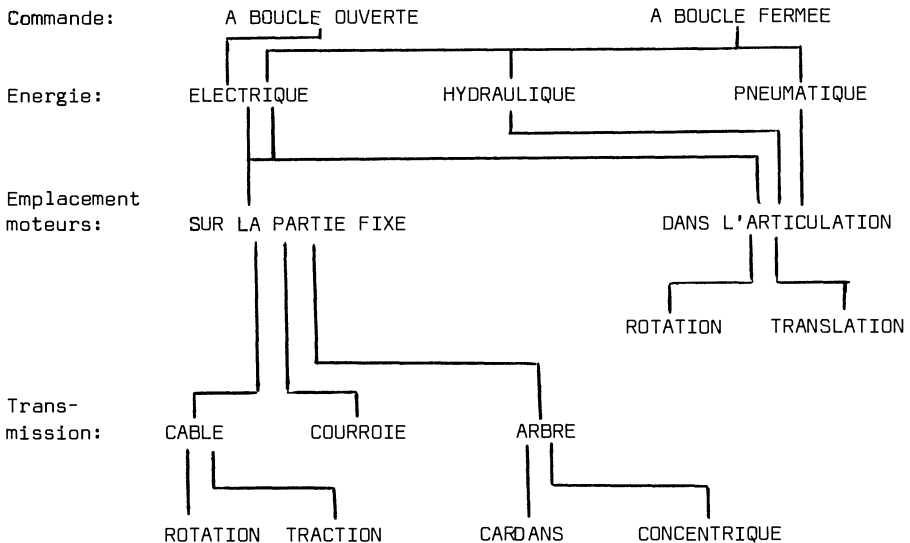


Tableau III: Quelques choix pour la construction d'un robot.

Tableau III: La partie supérieure du tableau montre qu'il est nécessaire de prendre la décision suivante: Faut-il faire une commande à boucle ouverte ou fermée (asservie)? Ces deux commandes ont des avantages: la boucle ouverte est moins chère à la base, mais elle exclut l'utilisation d'hydraulique et de pneumatique, en tout cas avec les moyens courants. Le système à boucle fermée est plus cher, mais potentiellement plus précis et on peut

utiliser l'énergie électrique, hydraulique ou pneumatique. Si l'on décide, par exemple, de réaliser un robot bon marché, on utilisera une commande à boucle ouverte employant les moteurs électriques comme les moteurs pas-à-pas. On constate alors une chose: les moteurs pas-à-pas sont lourds, ils ont un rapport puissance/poids, bas. A cet égard, tous les moteurs électriques sont moins favorables que les moteurs hydrauliques, même les moteurs pas-à-pas sont, par exemple, dix fois moins favorables qu'un moteur à courant continu. En principe, on préfère placer les moteurs dans les articulations des robots pour simplifier les problèmes de cinématique: un robot bon marché et rapide nous oblige à choisir un bras léger. Les moteurs pas-à-pas sont si lourds qu'il faut les placer à l'extérieur, sur la partie fixe. Comment transmettre l'énergie mécanique de la partie fixe aux articulations ? Il y a différents systèmes de transmission: câble, courroie ou arbre rigide. Dans le cas du robot en cours de développement à l'Institut de Microtechnique, les câbles en rotation ont été choisis pour transmettre le mouvement du moteur pas-à-pas aux 7 degrés de liberté et un câble de traction pour l'ouverture et la fermeture de la main. Ces câbles posent des problèmes de jeu, d'élasticité et d'usure qui doivent être résolus.

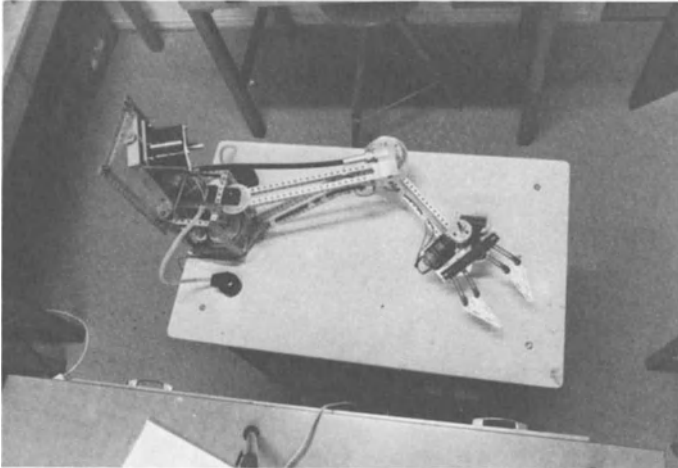


Photo no. 1

La photographie no. 1 montre un montage expérimental fait à l'institut. Il s'agit d'un robot n'ayant que deux degrés de liberté avec lequel on a pu faire des essais de programmation et d'enregistrement du programme sur une cassette à bande magnétique en utilisant un lecteur de cassette du commerce.

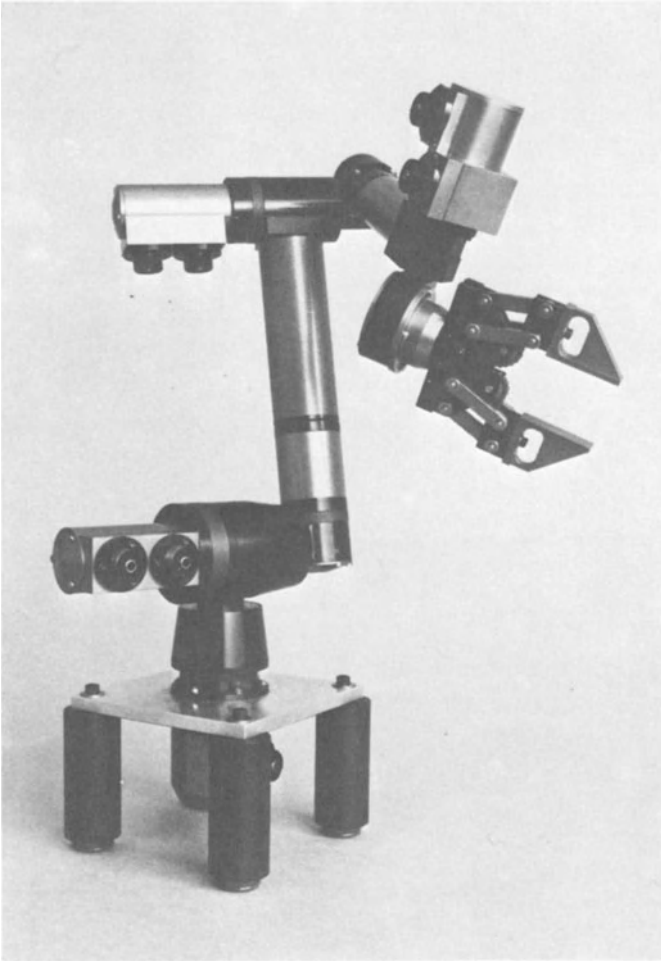


Photo no. 2

La photographie no. 2 montre un bras de robot ayant 7 degrés de liberté développé à l'institut, mais qui n'est pas encore en état de fonctionner.

Un autre robot fait actuellement l'objet de projets d'étudiants. Ceux-ci étudient un bras avec des moteurs hydrauliques placés dans les articulations.

L'intérêt porté au développement des robots est un précieux apport à la formation des ingénieurs. Une collaboration avec l'industrie permet d'élaborer des solutions intéressantes pour l'avenir de cette dernière.

LANGAGES DE PROGRAMMATION POUR LA COMMANDE DE ROBOTS

G. CORAY - EPFL

Délimitation du sujet

L'intention de cet exposé est de préciser certains parallèles entre deux types d'automates : les robots et les ordinateurs.

Cette comparaison s'inspire d'une part des recherches actuelles en "robotique" où, loin de commander numériquement une machine outil de manière déterministe, on voit simuler par des robots expérimentaux programmés une série d'actions, de décisions devant des situations nouvelles, comparables aux comportements intelligents bien que stéréotypés d'êtres vivants.

D'autre part l'évolution des machines de traitement de l'information allant de la simple mécanographie aux algorithmes mathématiques et d'analyse de documents les plus complexes, a clairement montré le rôle déterminant, parallèlement au progrès technologique, du développement de langages de programmation de plus en plus efficaces. On assiste actuellement à l'éclosion d'une multitude de langages (plus de vingt nouveaux chaque année) dont le domaine d'application peut varier entre l'interrogation et la mise à jour de fichiers, la commande de traceurs sur papier ou d'affichages géométriques sur console visuelle, la résolution numérique de systèmes algébriques ou différentiels et la manipulation de texte comme, par exemple, lors de la compilation de programmes ou de l'exploitation interactive d'un ordinateur dans un cours programmé.

L'importance de la communication homme-machine a donc été reconnue en informatique. L'avènement peut-être proche de manipulateurs programmés pour certaines opérations simples de montage, de stockage d'usinage et d'assemblage soulève un problème analogue. En outre, les petits ordinateurs auront un coût et un encombrement tellement réduits qu'ils seront probablement omniprésents. C'est dans cette perspective que nous nous



permettons de voir les robots intelligents de demain, avec un recul qui peut paraître risqué voire artificiel, sous l'angle de leur programmation.

### Caractéristique d'un langage

Ce qui caractérise un langage de programmation est, outre le domaine d'application spécifique pour lequel il a été forgé, la manière dont il permet à l'utilisateur de s'expliquer. On a observé, la dernière décennie, une tendance marquée vers l'uniformisation des notations, la libération de contraintes rigides de formats et les possibilités accrues du langage de s'étendre au gré de l'utilisateur. Nous devons nous contenter ici d'indiquer un petit nombre de ces aspects par quelques exemples rudimentaires.

Un langage (de programmation ou de commande) est un moyen de nommer et de décrire des objets et des opérations sur ces objets. Formé d'un vocabulaire de base nécessairement fini et déterminé une fois pour toutes, il devra permettre la description d'objets complexes ou d'actions imbriquées par le jeu de combinaisons à partir des éléments primitifs, présents et bien définis dans le vocabulaire de base. Ainsi tout langage pour la programmation de problèmes numériques incorpore une notation standard pour tous les nombres (jusqu'à une certaine taille) et une manière propre d'appeler les quatre opérations arithmétiques. L'un des premiers langages à prévoir la combinaison arbitraire de ces opérations à l'aide de la notation algébrique habituelle est FORTRAN II ; dans les langages d'assemblage on réalise ces combinaisons encore actuellement par l'introduction d'un nom symbolique (ou d'un repère de registre disponible) pour chaque valeur intermédiaire devant être calculée lors de l'évaluation de l'expression arithmétique composée. La définition de "langage" que nous venons de proposer permet de distinguer trois aspects caractéristiques qui varient d'un langage à l'autre :

- a) la structure du contrôle
- b) les opérations primitives
- c) les moyens d'extension

Ces caractéristiques ne sont pas indépendantes ; combinées à divers degrés dans chaque langage existant elles lui confèrent sa puissance et son élégance, souvent (mais pas toujours) au prix d'une exécution plus lente sur un ordinateur plus ou moins bien conçu pour l'interpréter.

a) Structure du contrôle

L'organisation de tâches compliquées que ce soit en calcul numérique, lors de la constitution d'un fichier informatique ou en commande de terminaux ou d'organes d'ordinateur, se fait selon plusieurs principes qui peuvent se superposer. Le mode le plus universel est certainement l'enchaînement d'opérations connues dans une séquence donnée ; à ma connaissance tous les langages représentent une telle séquence par la suite textuelle des instructions correspondantes, dans le même ordre, éventuellement avec un passage à la carte perforée suivante ou moyennant un signe de séparation ("\$" en FORTRAN CDC et ";" en ALGOL). Le "contrôle" logique de programmes consiste à rompre cette séquence afin de permettre des répétitions effectives mais non textuelles, des alternatives ou des sauts, etc.

Exemples d'itération : I et P sont des variables auxiliaires  
N est un entier donné

VAR I,P : INTEGER ;	INTEGER I,P ;	INTEGER I,P
P:=1 ;	P:=1 ;	P =1
I:=N ;	I:=N ;	I =N
REPEAT	WHILE	10 IF(I=0)GOTO 20
P:=I*P ;	I > 0	P =I*P
I:=I-1		I =I-1
UNTIL	DO	GOTO 10
I =0 ;	P:=I*P ;	20 PRINT(P)
I:=I-1 ;		
PRINT(P)	PRINT(P)	
(PASCAL)	(LALGOL)	(FORTRAN)

On distingue, sur cet exemple de calcul de  $N$  factorielle, trois manières différentes de décrire une itération. Il convient de noter que les deux premières ne sont pas équivalentes puisque la valeur calculée diffère lorsque la valeur donnée de  $N$  est nulle. La troisième réalise l'itération à l'aide d'un moyen puissant et parfois difficile à maîtriser : le saut conditionnel "GOTO".

L'évocation de "PRINT" constitue, dans les trois versions, un appel à la procédure d'impression qui affichera sur l'imprimante la valeur calculée pour  $P$ . L'exécution de procédures (routines ou sous-programmes) prédéfinis, souvent complexes, est un trait commun à la plupart des langages scientifiques ; la manière de transmettre les paramètres éventuels (la valeur de  $P$ , dans l'exemple) est toutefois sujette à des techniques variées.

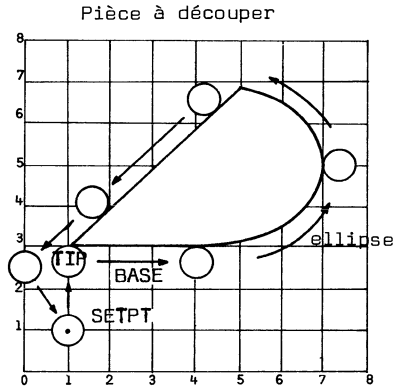
La composition de fonctions, primitives ou programmées, est l'ordonnement implicite d'opérations élémentaires et généralise ainsi les combinaisons usuelles des quatre opérations arithmétiques. Certains langages comme LISP et APL en font un usage presque exclusif.

Deux modes de contrôle pour le déroulement de programmes sont encore à mentionner. Bien que moins couramment utilisés ils sont néanmoins essentiellement différents et fondamentaux, notamment dans le contexte de la commande d'organes mécaniques. Le premier est le mode interactif d'exécution d'un programme ; le déroulement de ce dernier y est déterminé en cours de route par l'intervention d'un opérateur à certains points prévus. Le programme est ainsi "complété" par les commandes fournies sur un terminal lors de l'exécution d'une première séquence d'opérations ; par exemple BASIC, APL, PDP-2 et, dans le domaine des systèmes documentaires, AESOP sont conçus pour l'emploi interactif. L'autre généralisation du mode "déterministe" se trouve en simulation discrète de processus se déroulant parallèlement, avec certaines interactions entr'eux. Si les applications habituelles aux "files d'attente" illustrent bien les notions impliquées, la programmation de processus parallèles et interdépendants reste un problème

difficile auquel n'échappera pas la commande, par exemple, d'un robot à deux bras ayant des fonctions distinctes mais voisines dans l'espace.

b) Les opérations primitives

Il est évident que la panoplie d'actions élémentaires prédéfinies dans le langage laisse transparaître l'usage pour lequel il a été conçu. Ainsi FORTRAN, ALGOL, BASIC ont incorporé les opérations arithmétiques et quelques fonctions élémentaires courantes. APL va jusqu'à fournir au mathématicien la possibilité de multiplier et inverser des matrices, dans la notation algébrique usuelle pour le calcul matriciel. PL/1, PASCAL et SIMULA permettent d'opérer, en outre, sur des textes considérés comme chaînes de caractères pouvant être concaténés, comparés, lus et imprimés. COBOL, créé de toutes pièces en 1960 pour les applications commerciales est pauvre mathématiquement mais se prête à la manipulation et à l'édition de fichiers. Depuis, des systèmes spécialisés ont été conçus plus rationnellement, tels que AESOP, INFOL, SOCRATE pour n'en citer que trois au hasard. Dans une mesure plus modeste, tout langage doit pourvoir en outils de spécification pour les entrées et les sorties d'informations numériques ou textuelles, ainsi que pour la gestion de ces informations en mémoire centrale. Les "instructions d'affectation"  $P:=I * P$  ou  $I:=1$  dans l'exemple 1, remplissent cette tâche pour la copie ou la mise à jour des valeurs stockées temporairement ; en FORTRAN et ALGOL chaque instruction se limite à un registre ou une valeur numérique. Les langages plus récents tels que PL/1, par exemple, permettent de modifier toute une matrice numérique ou toute une ligne de texte avec la même notation compacte. Dans un langage de commande numérique pour machine-outil tel que APT les opérations primitives concernent, entre autres, le choix de l'outil, sa lubrification et ses mouvements d'un point à l'autre de la pièce à usiner.



PROGRAMME	COMMENTAIRES
CUTTER/1	Employer une fraise d'un pouce de diamètre
TOLER/.005	La tolérance du fraisage est de 0.005 pouce
FEDRAT/80	La vitesse d'avancement de l'outil est de 80 pouce/mn
HEAD/1	Sélectionner le porte-outil
MODE/1	L'outil sera employé en mode 1
SPINDL/2400	Mettre en marche l'outil, à 2400 tr/mn
COOLNT/FLOOD	Verser le lubrifiant en quantité
PT1=POINT/4,5	Définir le point de repère PT1 ayant les coordonnées (4,5)
FROM/(SETPT=POINT/1,1)	Positionner l'outil au point SETPT ayant les coordonnées (1,1)
INDIRP/(TIP=POINT/1,3)	Orienter l'outil vers TIP, le point ayant les coordonnées (1,3)
BASE=LINE/TIP,AT ANGL,0	Définir la droite BASE qui, passant par TIP, fait un angle de 0° avec l'horizontale
GO/TO,BASE	Aller à la droite BASE
TL RGT,GO RGT/BASE	Avec l'outil à droite, aller à droite le long de BASE
GO FWD/(ELLIPS/CENTER,PT1,3,2,0)	Suivre l'ellipse centrée au point PT1 dont le grand axe fait un angle de 0° avec l'horizontale, demi-grand axe=3, demi-petit axe=2
GO LFT/(LINE/2,4,1,3),PAST,BASE	Suivre la droite passant par les points (2,4) et (1,3), au delà de BASE
GOTO/SETPT	Aller directement à SETPT
COOLNT/OFF	Arrêter lubrifiant
SPINDL/OFF	Arrêter l'outil
END	La fin de l'opération
FINI	La fin du programme

c) Les extensions

Tout langage symbolique prévoit la possibilité de nommer, à l'aide de noms symboliques, le contenu d'une mémoire c'est-à-dire une valeur stockée temporairement. La tradition mathématique conçoit ces symboles, auxiliaires efficaces de la programmation, comme des variables. L'exemple 1 fait apparaître "I" et "P" comme des variables dont les valeurs possibles sont limitées aux entiers. L'exemple 2 montre que "PT1" est une variable désignant le point de coordonnées (4,5), alors que la droite horizontale passant par le point TIP a été baptisée "BASE". D'autres objets gagnent à être nommés, soit temporairement, soit pour toute la vie du programme qui l'utilise. Ainsi, APT permet d'appeler (c'est-à-dire baptiser) une séquence de points donnés, à l'aide d'un nom choisi ad libitum, mais annoncé par la déclaration "PATTERN". La simple rédaction du nom du "pattern" décrit appelle (c'est-à-dire remplace) effectivement la description donnée et permet ainsi d'éviter des répétitions fastidieuses comme le ferait une abréviation. Le pas suivant, franchi dans tous les langages scientifiques modernes, consiste à appeler des tableaux tels que des matrices des coefficients, des listes d'enregistrements d'un fichier de données, voire des graphes ou réseaux portant des informations distribuées, d'une manière uniforme. Bien entendu, il s'agira de retrouver, à partir du nom d'un tableau et de la valeur numérique des indices, l'élément particulier auquel on se réfère. De même on aura, pour les listes et autres structures d'informations prévues, des fonctions d'accès adéquates, permettant la référence aux données ainsi organisées. Cette forme d'extensibilité se retrouve dans les langages évolués relativement récents tels que PASCAL, PL/1 et SIMULA ; c'est le fruit de l'expérience acquise dans le métier, encore jeune, de la programmation d'ordinateurs.

Une autre forme d'extensibilité, essentielle pour le contrôle logique des opérations, est la possibilité de définir et nommer des "ensembles d'instructions" ou "procédures". APT fournit, par l'insertion de deux

lignes encadrant une partie de programme d'usinage (la première contenant le nom choisi et le terme "MACRO", la seconde marquant la fin de la séquence par le vocable "TERMAC") la possibilité de remplacer toute répétition ultérieure de la suite d'instructions délimitées, par le nom donné à la "macroinstruction". Sauf pour les langages d'assemblage, utilisés notamment pour la programmation de miniordinateurs actuels, (ainsi que FORTRAN, BASIC et COBOL) la majorité des langages de programmation prévoient une généralisation puissante et élégante à cette manière d'enrichir le langage de base. L'élégance contribue ici à l'efficacité puisqu'elle simplifie la décomposition modulaire d'un programme volumineux. A titre d'exemple rudimentaire nous reprogrammerons la fonction factorielle en profitant de la récurtivité, c'est-à-dire de la possibilité présente en ALGOL d'utiliser le nom de la fonction que l'on veut définir, à l'intérieur de sa propre définition.

Exemple : Définition récursive de procédure

```
INTEGER PROCEDURE FACT(N) ; INTEGER N ;  
BEGIN FACT : = IF N=0 THEN 1  
ELSE N * FACT(N-1)  
END
```

### Exemple 3

Exemple analogue : inversion de l'ordre des éléments dans une liste.

```
LIST PROCEDURE INVERSER(LISTE) ; LIST LISTE ;  
BEGIN INVERSER : = IF (TRIVIALE(LISTE)) THEN LISTE  
ELSE INVERSER(RESTE(LISTE)) * TETE(LISTE)  
END
```

On suppose définies les fonctions suivantes :

TRIVIALE : permet de tester si la liste n'a qu'un élément

TETE : extrait le premier élément de la liste pour en former une liste triviale

RESTE : enlève la premier élément de la liste.

D'autres formes d'extension sont à l'étude actuellement et concernent la syntaxe même des instructions du langage : technique précieuse pour le développement de nouveaux langages, adaptés à des besoins ou travaux spécifiques.

#### Comparaison avec la commande de robots

Les langages de commande numérique présentent l'aspect rigide de la mise en page et des instructions de contrôle typiques des premières langages de programmation mis sur le marché. La commande de machines automatiques en boucle fermée exige une plus grande souplesse. La présence de constructions telle que : tantque "condition n'est pas réalisée" faire "un pas ou cycle programmé" (en anglais : while "condition" do "one step"), de définitions récursives et d'opérations d'ont l'exécution est prévue en parallèle nous paraît une exigence minimum.

Si des langages tels que POP-2 ou PLANNER ont été utilisés expérimentalement, l'un pour la commande en temps réel d'un bras, l'autre pour la commande simulée d'un "automate" déplaçant intelligemment les objets qui gênent ou facilitent son passage, il faut se rendre compte des deux inconvénients majeurs des solutions examinées.

D'une part les implantations connues de langages évolués utilisent toutes de gros ordinateurs. Ceci est aussi le cas de nombreux langages de commande numérique, bien que la séquence des instructions finalement interprétée lors de l'usinage soit entièrement stockée sur un support inerte (ruban de papier). L'inconvénient est plus grave dans le cas de commande en boucle fermée car les informations venant en retour devront être traitées par un ordinateur "on-line" dont le coût doit être limité au minimum.

D'autre part l'inefficacité des programmes expérimentaux actuels est exorbitant. Le traitement d'images visuelles pour l'identification d'objets et leur disposition est l'un des facteurs de ce coût en temps d'exécution. L'autre est le manque d'optimisation dans l'implantation des langages universels utilisés, optimisation qui pourrait bien réussir en la



taillant sur mesure pour une configuration connue.

Si les remarques précédentes sont encore de l'ordre de la spéculation ou de la recherche de "laboratoire", il faut néanmoins se poser la question du développement intégré des robots mécaniques et des outils intermédiaires servant à faciliter leur commande par un opérateur humain. Les machines à manipuler l'information (sous toutes ses formes : bits, nombres, textes), que sont les ordinateurs actuels ont bien montré l'importance du problème et les possibilités de le résoudre au moins dans le contexte des applications informatiques.

#### Conclusion

Si l'universalité et la flexibilité des ordinateurs actuels a conduit l'informatique à concevoir des moyens de plus en plus perfectionnés pour la communication homme-machine nous pensons que la commande simple et sûre d'un automate mécanique asservi devra suivre une évolution analogue. Plus les actions et les tests interactifs d'une machine seront élaborés et disponibles pour une réorganisation adaptable, plus il sera important de pouvoir instruire la machine dans un langage évolué. Le développement de tels langages est donc une question d'efficacité ; l'opérateur gaspillera d'autant moins de patience et de temps que sa machine est moins stupide et pointilleuse.

#### BIBLIOGRAPHIE

- BURSTALL, R.M., COLLINS, J.S. and POPPLESTONE, R.J., "Programming in POP-2", Edinburgh University Press, 1970.
- COLES, L.S., "Categorical Bibliography of Literature in the Field of Robotics", Artificial Intelligence Center Technical Note 88, Stanford Research Institute, 1974.
- CDC., "APT Reference Manual", Publication No 60174500, Control Data Corporation, Documentation Dept., 1970.
- SAMMET, J.E., "Programming Languages : History & Fundamentals", Prentice-Hall Series in Automatic Computation, 1969.

LES CHANCES DU ROBOT DANS L'INDUSTRIE HORLOGERE

G. Bullat, Fabrique d'Horlogerie de Fontainemelon S.A.

Afin de mieux situer l'avenir du robot dans l'industrie horlogère, nous aimerions en préciser brièvement ses caractéristiques :

la fabrication des montres se subdivise essentiellement en 3 groupes :

l'ébauche - les fournitures d'établissage - l'habillage

L'ébauche que nous produisons, constitue la majeure partie des pièces entrant dans la composition du mouvement de la montre. Comme nous terminons également une partie de nos ébauches sous forme de mouvements, dans des ateliers fortement automatisés, nous allons faire notre analyse simultanément sous deux aspects : fabrication et montage.

Pour éviter tout risque d'erreur, nous ne traiterons pas les groupes, fournitures d'établissage et habillage. Leur fabrication peut toutefois être en bonne partie assimilée à celle des ébauches.

Le produit

Une ébauche est faite d'une ossature, en laiton, comprenant la platine et les ponts, ainsi que d'une quantité plus ou moins grande de fournitures diverses (fig. 1 et 2), généralement en acier, qui sont découpées, fraisées ou encore décolletées et taillées.

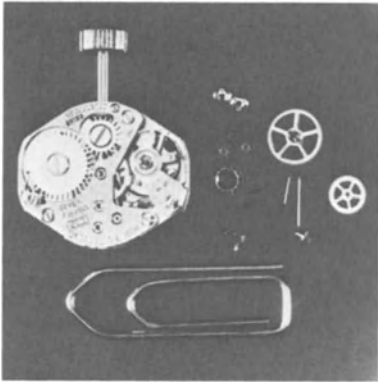
On dénombre, par exemple, dans une ébauche de montre homme, selon son exécution :

En version simple	:	72 pièces
En version automatique	:	137 pièces

Les 137 pièces de l'ébauche automatique avec double calendrier, auquel-

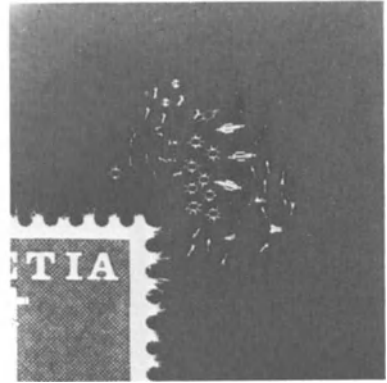
les il y a lieu d'ajouter les 33 fournitures d'établissage, soit au total 170 pièces, sont logées dans un volume de  $2,6 \text{ cm}^3$  dont la hauteur voisine 5 mm.

Il s'agit, en fait, d'un empilage savamment dosé de pièces extrêmement petites, dont l'usinage et le montage requièrent des procédés et des outillages très particuliers. La préhension des fournitures est souvent fort délicate et leur montage se fait pratiquement sur un seul plan.



(fig. 1)

Mouvement de montre dame  
dim. 15,3 x 18,2 mm



(fig. 2)

Quelques fournitures décolletées, agrandies 2,6 fois

Il n'est donc plus question d'espace dans le sens qu'on lui donne habituellement et ces quelques considérations doivent nous rappeler que l'horlogerie exigera des robots, une somme de performance peu commune, dont il serait dangereux de sous-estimer l'importance.

### La production

La montre est aujourd'hui un produit de masse et pour s'en convaincre, il faut relever que notre seule usine avec ses succursales, fabrique annuellement 14,5 millions d'ébauches complètes, comprenant au total, pas moins de 860 millions de pièces de tous genres.

Seule, une automatisation très poussée permet d'atteindre un tel chiffre de production.

Il y a 15 ans à peine, notre parc de machines était constitué uniquement de machines unitaires, dont une faible partie seulement disposait d'un chargeur automatique. Nous nous sommes bien vite rendu compte, qu'il fallait modifier complètement notre philosophie de travail. Depuis lors, la production a pris l'orientation suivante :

- Machines unitaires automatiques pour les opérations simples (fig. 3)
- Machines-transfert linéaires pièces à pièces pour les pièces compliquées exigeant de nombreuses reprises (fig. 4)
- Machines-transfert en bande pour les pièces de petites dimensions comportant des opérations multiples (fig. 5)
- Machines-transfert d'assemblage pour le montage de certains éléments ou des mouvements complets (fig. 6)



(fig. 3)

Machines unitaires automatiques



(fig. 4)

Machine-transfert linéaire  
pièce à pièce



(fig. 5)

Machine-transfert en bande



(fig. 6)

Machine-transfert d'assemblage

Nous disposons ainsi, aujourd'hui, d'une gamme complète de machines qui exécutent un grand nombre d'opérations en chaîne, soit par usinages successifs de pièces individuelles, soit par usinage en bande.

Les nouvelles machines-transfert ont évidemment réduit sensiblement nos besoins en chargeurs automatiques.

Cependant, parmi les 3'000 machines de tous genres constituant notre équipement actuel, il reste une quantité appréciable de postes de travail à automatiser.

Nous verrons, par la suite, que le problème du chargement automatique n'a pas été supprimé par les machines à postes multiples. Les robots devraient logiquement compléter d'heureuse manière nos équipements, qu'ils soient transferts ou unitaires.

Il nous paraît intéressant de signaler également que le montage ne représente que le 20% du prix du mouvement.

Certes, les opérations d'assemblage sont loin d'être toutes automatisées, mais il serait erroné de porter notre attention uniquement sur le montage, lorsque l'on parle de robots.

Il ne faut pas oublier que les chargeurs ou les robots, tout en augmentant la productivité, libèrent l'homme de ses attaches étroites avec la machine.

Cela représente une amélioration sensible des conditions de travail et, de chargeur qu'il était, l'ouvrier devient surveillant d'un groupe d'unités automatiques.

Cette promotion ne va d'ailleurs pas sans difficultés, les appareils nécessitant souvent des connaissances techniques trop grandes pour du personnel non qualifié.

Enfin, nous aimerions dire que l'horlogerie, comme bien d'autres industries d'ailleurs, a dû constamment améliorer ses prix de revient pour lutter contre une concurrence toujours plus forte.

Ainsi, le prix d'un mouvement courant devrait être vendu aujourd'hui, compte tenu de l'évolution des salaires, 8 fois plus cher qu'il ne l'est en réalité. Les prix actuels sont, en effet, 2 fois moins élevés qu'il y a 25 ans.

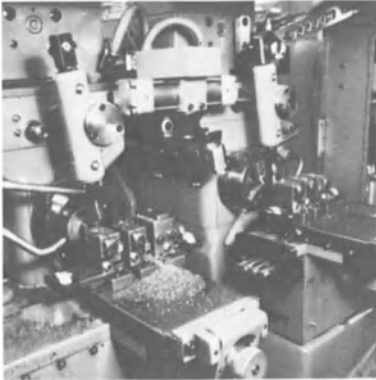
Cette tendance est loin de s'arrêter et nous oblige à poursuivre nos efforts d'automatisation.

#### Les chargeurs automatiques

L'automatisation des machines de production ne date pas d'hier. Nous avons eu, dans notre entreprise, des chargeurs mécaniques vieux de 50 ans qui fonctionnaient encore ces dernières années.

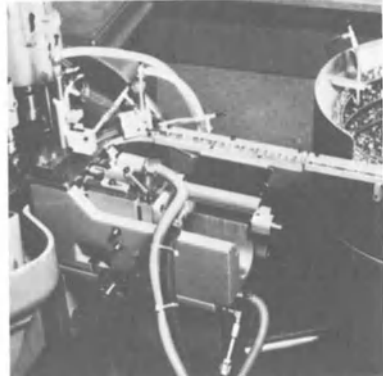
Ce sont les vibreurs électro-magnétiques, nettement plus récents, une vingtaine d'années environ, qui sont à l'origine de l'essor considérable des chargeurs.

Il y en a certainement plus de 80 types de tous genres utilisés actuellement dans l'industrie horlogère. Pour notre seule entreprise, sur 650 chargeurs en activité, nous dénombrons au moins 20 modèles différents. Ce chiffre reste préoccupant et nous aimerions, bien entendu, le réduire notablement. Malgré tous nos efforts de rationalisation, nous devons reconnaître que cette situation ne s'est guère améliorée ces dernières années (fig. 7 - 8 - 9 - 10).



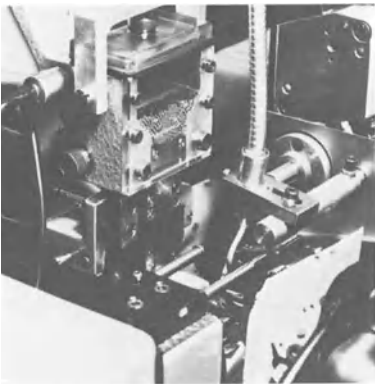
(fig. 7)

Machine automatique de tournage de masses oscillantes, avec chargeur intégré.



(fig. 8)

Combinaison d'un chargeur mécanique de platines avec un vibreur d'alimentation.



(fig. 9)

Chargeur à bain d'huile pour pièces de révolution sur machine à tailler.



(fig. 10)

Opérations de montage manuel combiné avec chargeurs automatiques sur une chaîne d'assemblage.

A quoi cela tient-il? D'abord, au principe même des chargeurs qui ont presque tous été étudiés en fonction d'un type particulier de machine, ou bien d'une certaine catégorie de pièces. Il faut aussi rappeler que nous

produisons une très grande variété de pièces et de dimensions. La platine, par exemple, est 46'293 fois plus volumineuse qu'un rivet, et parfois d'autres fournitures sont encore plus petites. Chercher à utiliser le même modèle de chargeur pour ces deux pièces, ne paraît pas raisonnable.

A tout cela, il faut encore ajouter l'évolution des machines et des chargeurs eux-mêmes. Lorsque de nouveaux appareils sont mis en service, ils sont forcément adaptés aux techniques du jour et ils viennent, ainsi, sous l'auréole du progrès, renforcer les rangs de la diversité des équipements.

Cette situation se retrouve généralement dans les industries de grande production, où les machines sont très spécialisées et souvent construites d'après la pièce à usiner. (fig. 14)

Pour éviter toute confusion, précisons enfin que notre expérience s'arrête aux chargeurs automatiques. Nous n'avons fait, jusqu'à présent, aucun essai de production avec les robots.

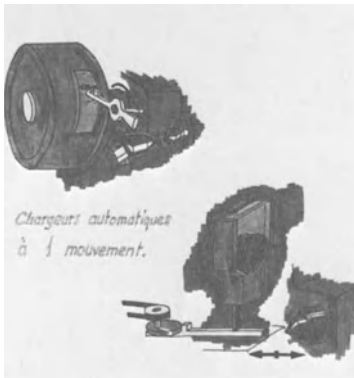
#### Leurs caractéristiques

Les caractéristiques des chargeurs sont à l'échelle de leur variété de modèles. Il ne sera donc pas possible d'en faire un inventaire complet, d'autant plus que toutes les combinaisons existent sur le marché. Pour mémoire, nous les résumerons ainsi :

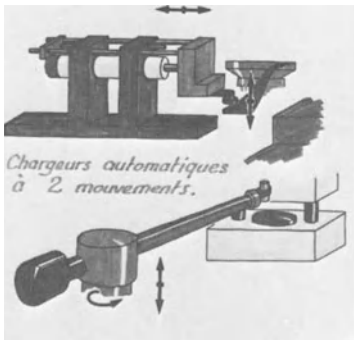
caractéristiques des chargeurs actuels	
- mouvements	: de 1 à 3 degrés de liberté (fig. 11 - 12 - 13)
- organes	: linéaire et rotatifs
- disposition	: dans la base et la tête
- commande	: en boucles ouverte ou fermée, électrique ou pneumatique
- transmission	: électrique, pneumatique ou mécanique



A cette constellation de systèmes se greffent les dispositifs de triage et d'orientation des pièces. Le vibreur électro-magnétique vient très largement en tête de liste. Il est monté généralement seul avec le chargeur, mais il arrive parfois qu'il soit associé à un appareil supplémentaire d'orientation mécanique. La combinaison des 2 éléments est sans doute la meilleure solution, mais c'est aussi la plus coûteuse.



(fig. 11)  
Chargeurs à 1 degré de liberté,  
l'un rotatif, l'autre linéaire.



(fig. 12)  
Chargeurs à 2 degrés de liberté,  
l'un rotatif, l'autre linéaire.



(fig. 13)  
Chargeurs à 3 degrés de liberté,  
tous deux rotatifs.

D'un autre côté, nous nous devons de signaler les trieurs de pièces travaillant dans l'huile. Il s'agit d'un procédé incomparable pour orienter les très petites pièces de révolution. Parmi les exécutions existantes, nous citerons tout spécialement le tambour tournant ainsi que la chambre de barbotage où les pièces sont acheminées par pulsion d'huile. Une description aussi superficielle des agrégats équipant les chargeurs ne saurait refléter la somme extraordinaire d'ingéniosité qu'ils renferment.

Cadences relatives de production		
Machines	Cadence possible machine	Cadence possible machine
Presse découpage pièce à pièce	150 p./min.	*40 p./min.
Presse découpage en bande	100 p./min.	pas de ch.
Transfert fraisage en bande	40 p./min.	pas de ch.
Transfert empierrage pièce à pièce	40 p./min.	40 p./min.
Transfert fraisage pièce à pièce	30 p./min.	40 p./min.
Transfert assemblage pièce à pièce	15 p./min.	20 p./min.
Machine à tailler pièce à pièce	8 p./min.	40 p./min.

\* seul genre de machine dont la cadence est limitée par le chargeur

(fig. 14)

Comme les chargeurs travaillent habituellement en temps masqué, c'est-à-dire pendant que l'opération proprement dite s'effectue, ils satisfont assez bien aux vitesses usuelles de production. Les rythmes de chargement en fabrication sont très différents selon les systèmes, ils varient de 20 à 60 p./minute.

Le montage des mouvements n'est, par contre, pas encore complètement automatisé. Aucune solution satisfaisante n'a été trouvée pour la mise en place de certaines pièces délicates, telles que les rouages, et c'est à

ce niveau que les chargeurs s'identifient le plus aux opérations qu'ils effectuent. L'accès relativement facile au poste de travail permet d'employer des systèmes à 2 ou 3 degrés de liberté seulement. La cadence de chargement au montage ne pose pas particulièrement de problèmes, car les temps opérationnels sont relativement lents. Un rythme de 20 p./min. suffit.

### Leurs faiblesses

L'infinie variété des techniques utilisées est très gênante lorsqu'il s'agit d'instruire le personnel d'entretien. La fiabilité n'est pas toujours très bonne et comme il faut souvent spécialiser les mécaniciens sur tel ou tel type de chargeur, les temps d'arrêt sont parfois assez longs.

Nous rencontrons toujours plus de difficultés à assurer le renouvellement des outillages qui doivent être faits sur mesure. Aucune action préventive efficace, telle que la préparation des pièces de rechanges, ne peut être entreprise.

D'un autre côté, les vibreurs qui orientent intégralement les pièces travaillent le plus souvent dans des conditions aléatoires. Ils sont faits d'astuces plutôt que de technique et un rien peut modifier leurs performances. Le milieu ambiant a également une grande influence sur leur comportement; ils ne tolèrent pas du tout les pièces grasses et ils sont, par ce fait, à l'origine de la majeure partie des interventions.

La qualité des pièces, les impuretés jouent aussi un très grand rôle dans la régularité de fonctionnement. Il est fréquent que des fausses pièces se trouvent mélangées aux bonnes et les moyens pour les détecter sont totalement insuffisants.

De l'ensemble des problèmes d'automatisation, l'alimentation et l'orientation des pièces sont les points les plus faibles. Les chargeurs dans l'huile sont les plus stables, mais ils ont le défaut de ne fonctionner que pour un genre bien déterminé de pièces.

Pour conclure ce chapitre, parlons un peu de prix. Ils se situent actuellement dans une fourchette allant de Fr. 13'500.-- à Fr. 35'000.--. Ces prix s'entendent pour une machine complètement automatisée, prête à produire ..., disons presque prête!

Dans l'exemple à Fr. 13'500.--, nous avons un vibreur et un bras rotatif de transport; dans celui de Fr. 35'000.--, il y a un équipement électromécanique d'orientation des pièces.

Les automatisations impliquent toujours des difficultés de mise au point, et il est à souhaiter que les robots simplifient par la suite cette tâche ingrate.

#### L'homme

Avec ses 27 degrés de liberté de mouvements, répartis dans ses bras, ses mains et ses doigts, l'être humain dispose d'un outil de travail extraordinairement polyvalent.

Dans une production de grande séries, la répétition de certains gestes se traduit parfois par des cadences stupéfiantes.

Mais bien vite la fatigue fait baisser le rendement et provoque une augmentation en flèche des erreurs de travail.

Ce phénomène bien connu peut être évité par l'emploi de robots industriels. Il leur faudra donc, non pas égaler l'homme, mais le compléter.

#### Le robot industriel

Nous avons vu que l'automatisation de l'industrie horlogère ne date pas d'hier.

Le robot se distingue en définitive des chargeurs, par son pouvoir d'adaptation. C'est en fait un outil infiniment plus perfectionné que ses prédécesseurs et il peut aisément réaliser, à partir d'un programmeur contrôlé par un mini-ordinateur, les fonctions les plus diverses. Muni d'éléments sensoriels, il doit pouvoir "visualiser" les pièces, et après traitement des données fournies par les capteurs, intégrer celles-ci au programmeur de travail.

C'est un atout majeur qui doit conduire à la réalisation d'un appareil standard fabriqué en série.

Même s'il n'est pas question d'identifier parfaitement le robot à l'homme, nous savons que 6<sup>0</sup> de liberté de movts, complétés d'un élément de préhension (par exemple une pince), suffisent au robot pour déplacer un objet, d'un point à un autre de l'espace.

Ainsi conçu, le robot doit tout de même disposer d'un trieur préorientant les pièces. Car sans cela, avec une seule pince, il se trouvera plus ou moins dans l'obligation de s'y reprendre à deux fois pour charger correctement la pièce.

#### Les exigences de l'horlogerie

Pour répondre complètement aux besoins de l'industrie horlogère, les robots devront donc s'accommoder de conditions de travail fort différentes. Le milieu ambiant varie d'un extrême à l'autre, selon qu'il s'agit de l'usinage des pièces dans l'huile ou du montage dans une atmosphère parfaitement propre.

A cet égard, le choix des moyens de transmissions est important et nous déconseillons les moteurs courant continu.

Cela implique un certain nombre de difficultés, d'autant plus qu'il faut aussi satisfaire à 2 impératifs de taille qui sont indispensables dans la production horlogère. Nous voulons nommer la vitesse et la précision. Ces 2 critères, à eux seuls, représentent un obstacle non négligeable dans la conception du robot propre à ce genre d'industrie.

On ne pourra très certainement pas reporter les systèmes adoptés sur les grands robots, sans tenir compte des lois de similitude.

En relation avec les vitesses de déplacements du bras, l'inertie jouera aussi un rôle important et compliquera la construction d'une main tactile. D'un autre côté, il semble que la précision des robots soit de l'ordre de 1/1000 du Rayon opérationnel. En prenant le cas d'un bras articulé se mouvant dans un espace sphérique de  $R = 500$  mm, on obtient une précision virtuelle de 0,5 mm. Ce n'est évidemment pas suffisant.

La "main" doit être précise et son positionnement ne peut dépasser une tolérance de  $\pm 0,02$  mm. Parfois, lorsque les pièces sont fragiles, il sera nécessaire de descendre jusqu'à  $\pm 0,01$  mm.

Dans certains cas, les conditions seront favorables à l'utilisation d'une pince légèrement flottante qui se centrera sur le point de travail. Il ne peut être question, par ailleurs, de faire appel à un spécialiste des bureaux pour programmer et mettre en service les robots. Les ateliers doivent pouvoir le faire eux-mêmes.

Le parcours de chargement étant généralement secondaire, un système de commande PTP (point par point) suffira très largement.

Pour terminer ce cahier des charges, précisons qu'en utilisant des moteurs "pas à pas", dans la commande des mouvements, il sera possible de faire varier facilement les vitesses des organes de transmissions.

Cela confère aux robots un avantage indéniable, que les chargeurs n'ont pas. Ces derniers font appel à des amortisseurs fin de course, à air ou à huile, qui ne donnent malheureusement pas toujours satisfaction.

### Conclusions et suggestions

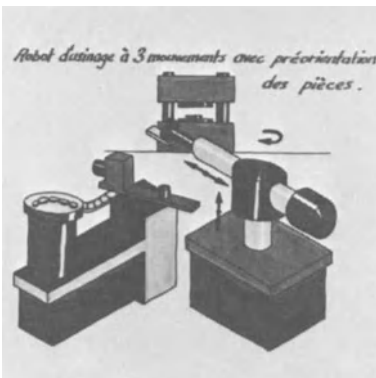
Ainsi que nous l'avons vu, pour être d'un prix abordable et par là même compétitifs, les robots devront obligatoirement être fabriqués en séries. Deux voies, alors, s'ouvrent à nous :

1. Celle qui consiste à faire un robot universel, capable de répondre à tous les besoins de l'horlogerie. Cette solution ne nous paraît malheureusement pas réaliste dans l'immédiat et nous risquons d'obtenir un outil à la fois compliqué et délicat, qui ne sera exploité intégralement qu'en de rares occasions.  
Sa mise au point prendra de nombreuses années et il exigera un investissement initial considérable avant qu'il soit possible de le fabriquer industriellement à des prix compétitifs.
2. Pour ces raisons, nous préférons la construction modulaire, permettant d'offrir des robots "à la carte". Là encore, il s'agira d'être très prudent, afin de couvrir les besoins avec un nombre minimum de modules tout en disposant de toute la souplesse désirée.

Afin de ne pas alourdir le bras en le munissant, à son extrémité, d'une pince tactile très sophistiquée, nous suggérons de réaliser un dispositif programmable alimentant et orientant les pièces avant leur transport. En effet, dans l'analyse des performances que nous avons faite, la partie la plus délicate des chargeurs se situe presque invariablement dans le dispositif de triage et d'orientation des pièces. En subdivisant le robot en deux éléments distincts, on simplifie d'une part son bras transporteur et on offre, d'autre part, un complément indispensable au chargeur actuel.

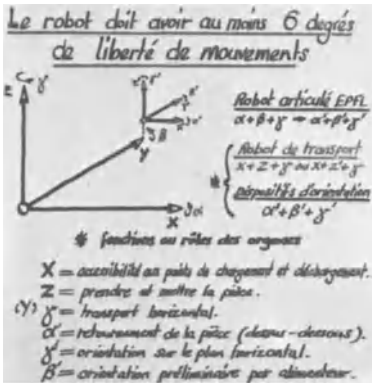
Quelque soit la conception adoptée, nous proposons 2 grandeurs de robots répondant aux caractéristiques suivantes :

	<u>Grandeur I</u>	<u>Grandeur II</u>
Base	150 x 300 mm	100 x 150 mm
R maxi	400 mm	200 mm
Course x	150 mm	58 mm
Course z	50 mm	30 mm
Rotation	180 degrés	180 degrés
Vitesse linéaire	300 mm/s	300 mm/s
Vitesse angulaire	180°/s	180°/s
Précision	$\pm 0,02$ mm	$\pm 0,01$ mm
Charge maxi	0,2 kg	0, 2kg



(fig. 15)

Robot d'usinage à 3 degrés de liberté avec dispositif programmable de préorientation des pièces.



(fig. 16)

Répartition des fonctions entre le dispositif d'orientation et le robot de transport.



(fig. 17)

Robot articulé à 6 degrés de liberté dans une opération de montage.



(fig. 18)

Deux exemples de robots à 3 degrés de liberté dans des opérations de montage.

Avant de conclure, nous aimerions préciser, qu'à notre avis, l'horlogerie électronique aura aussi un grand besoin de robots, à divers stades de sa fabrication.

Ainsi, malgré des conditions de travail particulières, nous pensons que les robots disposent d'un potentiel de ressources assez élevé, pour qu'ils aient les plus grandes chances de s'implanter dans l'industrie horlogère.



L'AVENIR DU ROBOT DANS UN SYSTEME DE PRODUCTION

Prof. François Pruvot, chaire de machines-outils, Ecole Polytechnique  
Fédérale de Lausanne.

I. Introduction

Il n'y a aucun doute que le robot sera très largement utilisé dans l'industrie. Il sera surtout utilisé pour les tâches répétitives que l'on trouve dans les chaînes de fabrication en grande série, mais en même temps on voit que sous ses diverses formes, il sera bien adapté à des tâches comportant des variantes et même des indéterminations. Remarquons au passage que le retard de l'Europe sur les U.S.A. dans le domaine des robots n'est pas aussi inquiétant qu'on veut bien le dire. Les 2000 robots que l'on attribue aux U.S.A. remplacent environ 6000 ouvriers sur une population active de plusieurs dizaines de millions. Quant à leur technique, nous verrons plus loin qu'elle est extrêmement mal adaptée aux tâches futures. Presque tout reste donc à faire dans ce domaine. Tous les augures s'accordent donc pour prédire au robot un brillant avenir. Je ne vois pas très bien ce que je pourrais apporter de nouveau dans ce sens. Par contre, ce que l'on nous dit beaucoup moins est ce que les robots devront réellement faire et conséquence des tâches qu'ils feront, quelle devra être leur morphologie. Quand on le fait en général, on suppose que les pièces et ensembles à fabriquer resteront ceux que nous connaissons aujourd'hui alors qu'ils n'ont été conçus, à l'évidence, qu'en vue de leur fabrication par des êtres humains. Ce sont donc ces deux points, qui me paraissent essentiels, que j'aimerais tenter de documenter quelque peu. Ils me paraissent d'autant plus importants que tout le monde se lance en ce moment dans l'étude et la réalisation de robots et laisse au client potentiel la tâche guère commode et encore moins agréable d'essayer de se débrouiller avec un robot qui n'a été conçu en vue d'aucune tâche spécifique et est donc mal adapté à toutes. Ensuite, après avoir défini les robots, dont nous pensons avoir besoin, et ceux que nous serons capables de faire, il nous faudra examiner

si leurs qualités ne nous permettront pas de faire évoluer le produit à fabriquer et le système de fabrication lui-même, amorçant ainsi une chaîne bouclée d'interactions entre produits et moyens de production qui devrait se traduire à terme par une diminution du prix de revient des pièces et des investissements faits par les sociétés. Le plan de cet exposé devient alors clair.

Dans la première partie, nous définirons les tâches que devront accomplir les robots dans une usine de fabrication en grande série de petite et moyenne mécanique. Nous nous intéresserons particulièrement à l'exemple de l'industrie automobile.

Dans la deuxième partie, nous essaierons de déduire les caractéristiques essentielles des robots et nous aborderons le problème de leur conception.

Dans la dernière partie enfin, nous essaierons de montrer les changements que l'apparition d'automates imposera tant aux produits fabriqués qu'aux moyens de fabrication.

## II. Tâches que devront accomplir les robots dans une usine de fabrication en grande série de petite et moyenne mécanique.

Les types d'action de fabrication dans une usine de mécanique en grande série sont essentiellement au nombre de 5 si on néglige les tâches auxiliaires:

- a) la manutention et le stockage des pièces produites (depuis l'élaboration du brut jusqu'à la phase finale de conditionnement pour la livraison),
- b) le contrôle des pièces et des installations,
- c) les interventions sur machines,
- d) le montage des sous-ensembles et ensembles,
- e) la fabrication proprement dite.

Je vais maintenant reprendre plus en détail chacun de ces points:

a) La manutention et le stockage des pièces

La manutention est certainement l'une des activités coûtant le plus cher à l'entreprise tant en matériel qu'en personnel. En effet, la matière étant apportée à l'usine par camion ou train, il faut la décharger et la stocker. Ensuite, chaque stade de la fabrication est précédé en général d'une sortie de stock et d'une manutention et est suivi d'une manutention et d'une mise en stock. Dans le processus de fabrication lui-même, il y a de nombreuses manutentions dues parfois au fait que certaines opérations se font à des cadences très différentes d'autres ou dues à la nécessité de constituer des stocks pour minimiser l'importance des arrêts de machines.

On peut distinguer plusieurs classes de pièces à manutentionner :

- les pièces qui se traitent toujours à l'unité tant en manutention qu'en stockage. Ce sont en général des pièces de taille importante. Exemple: les carrosseries assemblées de véhicules automobiles et les véhicules terminés;
- les pièces manipulées à l'unité, mais stockées en lots "ordonnés". Ce sont en général des pièces de taille inférieure à celles des pièces précédentes qui présentent des caractéristiques particulières de géométrie. Par exemple, on peut citer les carters cylindres, les culasses, les vilebrequins de moteurs, etc. Dans cette classe se mettent aussi les pièces fragiles et celles dont la précision et l'aspect sont importants;
- les pièces manipulées en vrac. C'est le cas de toutes les petites pièces de tôlerie et de mécanique peu précise: les vis, les rondelles, écrous, axes, etc. La caractéristique principale des deux premiers groupes est que la position des pièces peut être relativement bien et facilement définie et repérée dans l'espace.

Une caractéristique essentielle des deux derniers groupes est que les pièces sont mises dans des conteneurs dont le format est en général standard ou peut être standard.

Une règle générale à ne pas méconnaître est que la position d'une pièce

que l'on sort du processus de fabrication est en général très bien et précisément définie. Par contre, la position d'une pièce que l'on veut remettre dans le processus de fabrication est souvent imprécise, car elle a été manipulée et déplacée par rapport à son conteneur.

En règle générale aussi, s'il est très satisfaisant pour l'esprit qu'un dispositif automatique puisse permettre de distinguer des pièces les unes des autres, ce cas est assez peu fréquent dans l'industrie. Il est rare en effet (sauf peut-être en fonderie) que des pièces de natures différentes soient faites sur une même chaîne de fabrication. Il n'y a donc pas lieu de les mélanger ensuite. La seule chose dont il faudra se protéger sera la confusion volontaire ou involontaire des conteneurs de différentes pièces et le mélange dans un même conteneur de pièces de nature différente. Cela sera en général très facile.

Quant au stockage, il est aussi l'un des problèmes clés de l'industrie. Il est si mal traité à l'heure actuelle qu'on voit sur toutes les chaînes de fabrication fleurir un grand nombre de stocks sauvages (sur une chaîne de carters cylindres de voiture on peut avoir jusqu'à 100.000 pièces stockées à des stades divers de leur fabrication). Les conséquences financières du stockage des pièces sont très mal connues, mais sans aucun doute importantes. Les pièces stockées constituent une immobilisation et sont source de rebuts, car elles rouillent, reçoivent des chocs et nécessitent souvent des retouches ou sont simplement inutilisables.

Quelle peut être la part du robot dans ces différentes tâches ? Dans la sortie des pièces du processus de fabrication: il s'agit en général de prendre une pièce en un endroit précis et de la déposer dans un conteneur. Les dimensions et la position de ce conteneur sont relativement précises, mais si la pièce est relativement petite par rapport à ses dimensions, on y mettra de nombreuses pièces disposées souvent sur plusieurs niveaux. On aura alors le choix entre un robot et une machine spécialisée capable d'effectuer chacune des tâches définies. De toute façon, qu'on s'oriente vers l'une ou l'autre des solutions, il est évident que la "machine" de manutention devra avoir un certain sens tactile lui permettant d'interrompre ou de modifier son fonctionnement et de signaler son arrêt si le

conteneur qu'on lui a donné n'est pas vide ou si elle rencontre un obstacle quelconque durant son travail. Comment faire son choix entre machine spécialisée et robot ? Ce sera en général très simple, dans le cas d'une production entièrement automatisée, car seul le prix de revient ramené à la pièce produite sera à prendre en considération. Si le nombre de points de prélèvement est assez grand mais les prélèvements peu fréquents, on aura en général intérêt à prendre un robot que l'on déplacera suivant les besoins d'un point de prélèvement à un autre. Si chaque point de prélèvement nécessite une machine spéciale nouvelle, on aura d'autant plus d'intérêt à prendre un robot dont les qualités d'universalité permettront de diminuer prix des études et prix de fabrication. De plus, si le point de prélèvement est unique, le point de dépose est variable et peut avoir de nombreuses positions. Une machine de manutention spéciale risque dans ce cas d'être d'une très grande complication. La séquence des points de dépose comme la description des trajectoires seront dans le cas des robots mis en mémoire de préférence sous forme d'algorithme plutôt que sous forme d'une suite de points afin de minimiser le volume d'information définissant le travail à effectuer.

Pour la rentrée des pièces dans le processus de fabrication, le problème se pose un peu différemment dans ce sens que si la position de dépose de la pièce est précise, sa position de prise ne l'est pas. En effet, les pièces mises en conteneur auront certainement bougé lors de leur manutention et le robot devra sans aucun doute être doué d'un sens tactile plus évolué que celui décrit précédemment afin d'être capable de définir la position de la pièce là où elle est et ensuite de l'amener à la position de dépose. L'organe de préhension devra être capable de contrôler si un conteneur est complètement plein ou non et pourra alors faire modifier le programme de façon à minimiser le temps de réponse du dispositif de chargement. A ceci près, le problème du chargement se posera exactement de la même façon que pour le prélèvement de pièces. Il est à signaler qu'en général, les points de chargement et les points de déchargement seront les mêmes.

Quant au stockage proprement dit, il peut se décomposer en deux opérations

distinctes: le stockage-destockage proprement dit qui se fera toujours dans des magasins en hauteur du type transtockeur bien connu et le transport de la pièce ou du conteneur, du stock vers le point de prélèvement ou de rentrée dans le processus et vice-versa. En effet, il est facile de montrer que le stockage proprement dit devra être banalisé afin de minimiser son coût. Il sera donc commun à un assez grand nombre de pièces différentes et le volume de stockage consacré à chaque type pourra être variable et dépendra de l'instant présent et de l'histoire passée des chaînes de fabrication (par exemple évolution des fréquences et temps d'arrêt). Dans ces conditions, les stocks seront assez éloignés des points de prélèvement de pièces. Or on conçoit mal aujourd'hui que le travail de transport et de stockage puisse être fait par des robots doués d'un certain nombre de sens, y compris celui de la politesse pour savoir s'arrêter si quelqu'un croise leur chemin, en allant chercher les pièces où elles sont et quand il le faut pour les emmener jusqu'aux casiers de stockage. A l'évidence, il faudra distinguer transport de stockage. Le transport se fera vraisemblablement à l'aide de chariots autopropulsés et autoguidés dont les déplacements seront ordonnancés par un mini-ordinateur. Quant au stockage proprement dit, on voit assez bien pour le faire des robots du style "ANDROMAT" de la General Electric. Ils devront allier extrême vitesse, puissance, précision et fiabilité. Le programme de chargement-déchargement du stock sera lui aussi optimisé afin de minimiser les temps et déplacements des robots.

#### b) Contrôle des pièces et des installations

Le contrôle dimensionnel des pièces est déjà à l'heure actuelle presque entièrement automatisé. Il pourra l'être bientôt complètement. Pour ce type de contrôle comme pour les autres (chimique, métallurgique, physique, etc.), on ne voit pas du tout comment un robot pourrait être utilisé avec bénéfice par rapport aux systèmes actuels. Il en est de même du contrôle des installations. Celui-ci est rarement automatique à l'heure actuelle, mais le robot ne semble pas devoir être d'un grand secours. En effet, on peut généralement diagnostiquer la panne d'un élément mécanique, électrique, électronique ou hydraulique par un processus purement logique d'analyse

du moment du cycle de la machine auquel s'est produite la panne et en associant à cette analyse un certain nombre de tests. Il est donc certain qu'un ordinateur se tirera bien mieux d'affaire pour cette tâche qu'un robot.

c) Les interventions sur machines

Les interventions sur machines sont de trois types: les interventions programmées: c'est-à-dire les opérations d'entretien préventif, les changements programmés d'outils. Les interventions se produisent à des instants aléatoires: ce sont essentiellement celles correspondant aux casses d'outils et aux pannes. Enfin, les interventions décidées compte tenu des conditions de fonctionnement de la machine et de la chaîne de fabrication: ces interventions sont essentiellement des opérations d'entretien ou de changement d'outil que l'on peut entreprendre sans y être obligé - pour utiliser au mieux le temps perdu suite à une intervention aléatoire.

Les opérations d'entretien préventif consistent essentiellement à changer certaines pièces d'usure, certaines pièces que l'expérience a montré ne pas durer plus d'un certain temps. Il s'agit en général de pieds de centrage, des appuis de pièce, d'organes de transmission (courroies, engrenages) et de paliers. On peut difficilement penser que de telles opérations puissent être effectuées par des robots, car l'accessibilité des pièces n'est pas toujours très bonne (on pourrait sans doute remédier à ce défaut), alors que la précision demandée est toujours élevée, ainsi que le nombre d'opérations élémentaire. De plus, malgré les simplifications toujours possibles, le nombre de pièces différentes sur lesquelles on doit agir est tellement grand qu'aucun robot universel ou spécialisé ne paraît pouvoir dans un avenir proche (à 20 ans au moins) être capable d'exécuter économiquement ces fonctions.

Il n'en est pas de même des changements d'outils. En effet, il serait parfaitement concevable qu'un robot puisse, la casse d'un outil étant détectée, aller chercher en un endroit précis un outil de remplacement et opérer le changement d'outil, si la machine a été prévue pour cette fonction (machine "aérée" dont tous les outils sont accessibles et munie de tous les contrôles et commandes automatiques nécessaires). Le problème se pose un peu différemment dans le cas des changements programmés d'outils,

car il faut en général changer à la fois un grand nombre d'outils (tous ceux d'une même famille). De plus, ces outils peuvent être soit groupés, soit à des positions très différentes sur la machine. On conserverait donc l'un des inconvénients du système actuel qui est le changement séquentiel d'outils qui entraîne de longs arrêts (à titre d'exemple, les changements d'outils sur des lignes transfert coûtent en moyenne de 10 à 17% de la production théorique).

Quant aux pannes proprement dites, les robots pourraient apporter une aide certaine pour certains types de fabrication. Dans l'industrie automobile ou l'électro-ménager, une pièce de tôlerie (un "unit") est souvent composée d'une pièce principale sur laquelle on vient rapporter successivement par soudure (ou par collage) d'autres pièces. Il est déjà prévu que certains robots iront chercher et tiendront en position ces pièces pendant que d'autres les pointeront ou les souderont en position. La panne d'un robot entraîne évidemment l'arrêt de toute la chaîne. On pourrait alors imaginer dans certains cas qu'une machine puisse comporter un robot supplémentaire qui ferait après coup, si cela est possible, les opérations non faites par le robot en panne ou qui s'inscrirait dans la gamme normale de fabrication après décalage des programmes dans les robots qui continuent de marcher. Le dépannage du robot en panne pourrait alors se faire sans arrêt de la machine, donc sans perte de production. La même chose est plus difficilement adaptable à l'usinage, mais il semble pourtant possible de disposer à la fin d'une machine transfert de production, une machine à commande numérique et à changement automatique d'outil qui viendrait momentanément remplacer l'outil ou les outils défaillants.

#### d) Le montage des ensembles et sous-ensembles

Le montage constitue, dans la littérature classique, le domaine d'élection des robots, non pas d'ailleurs parce qu'ils y sont plus à l'aise ou plus utiles, mais vraisemblablement parce que cette possibilité d'assembler automatiquement des organes fascine l'ingénieur depuis longtemps. Cet enthousiasme a vraisemblablement caché la plus grande partie des difficultés de la tâche et il n'est pas douteux qu'on éprouve de sérieux déboires



quand on voudra faire passer l'assemblage automatique de la phase expérimentale à la phase industrielle. Quoi qu'il en soit, sans atteindre et de loin l'importance des tâches de manutention, les tâches de montage sont très importantes. Dans l'industrie automobile, on automatisera - le processus est déjà en cours - le montage de sous-ensembles mécaniques tels que boîtes de vitesse, ponts arrière, moteurs ou simplement parties de moteurs telles qu'assemblage de bielles sur un vilebrequin, assemblage des pistons sur les bielles, trahs avant et arrière, freins, etc. Ensuite viendront les assemblages de carrosserie: montage des portières et des capots, montage des sous-ensembles mécaniques sur la carrosserie, montage des pare-chocs, des phares et feux AR, etc.

Viendra finalement le montage des garnitures intérieures: sièges, garnitures de portes et de pavillons, tableaux de bord, etc. Quelle sera la part des robots dans tout cela ? Notons d'abord qu'à des exceptions près, le montage des pièces mécaniques telles qu'elles sont conçues actuellement, nécessite une assez haute précision. Le robot anthropomorphe, par définition peu raide, n'y sera donc pas à l'aise. Il sera sans doute généralement largement inférieur aux machines spéciales. Essayons d'imaginer ce que pourrait être le montage d'un moteur d'automobile actuelle à un poste équipé de un ou plusieurs robots. Il est évident que la variété de pièces exigerait de leur part un échange si fréquent (et automatique) de leurs outils ou pinces et des capacités si diverses de force, de précision, de rapidité, etc. que ces robots coûteraient sans aucun doute beaucoup plus cher que les machines spécialisées correspondantes. Ils ne supprimeraient pas pour autant tous les dispositifs d'alimentation automatique et de positionnement des pièces constitutives. Par contre, le robot pourrait assez simplement effectuer des opérations simples et peu précises d'assemblage d'accessoires tels que dynamos, alternateurs, démarreurs, essuie-glace, etc.

Le montage de carrosserie (ferrage) et le montage final des véhicules paraît nettement à la portée du robot du point de vue précision. Notons cependant un point qui lui compliquera sensiblement la tâche. La plupart de ces opérations continueront de se faire sur des chaînes se déplaçant de façon continue. L'unité de commande des robots s'en trouvera passablement compli-

quée. Cette condition est indispensable, car les robots devant s'intercaler entre des opérateurs humains; on ne peut condamner ceux-ci à suivre une cadence de production absolument fixe. De plus, les chaînes à déplacement continu permettent de supprimer la perte de temps due au transfert des pièces (qui est quelque peu remplacée cependant par le déplacement de l'opérateur). Enfin, le montage de l'habillage intérieur des véhicules est, dans l'état actuel de la technique automobile, pratiquement impossible à faire automatiquement. Il faudra, pour qu'il devienne possible, une très profonde transformation des produits fabriqués (par exemple le montage d'une garniture de pavillon, d'un siège de véhicule, d'un tableau de bord sont rigoureusement impossibles sans un être humain).

En conclusion de ce paragraphe, notons que l'assemblage automatique a, dans l'ensemble de l'industrie, infiniment moins vite progressé que la fabrication automatique. Ce n'est pas un hasard et ce n'est certainement pas parce que les ingénieurs qui y travaillent sont moins compétents. La raison en est simplement la très grande difficulté. Or, on ne voit aucune raison pour que le remplacement de machines spécialement étudiées par des robots universels rende la tâche plus aisée, bien au contraire.

#### e) La fabrication

En fabrication mécanique, le rôle des robots pourra difficilement dépasser la manutention, ainsi que nous l'avons dit au paragraphe a).

En emboutissage, on pourra utiliser les robots pour les opérations de chargement et de déchargement des presses. Là encore, ils devront comporter un programme de travail complexe, donné sous forme d'algorithme et un sens tactile, afin de permettre le chargement à partir de piles et le déchargement en pile. On pourra parfois les utiliser pour des opérations simples telles que perçage d'un trou.

En tôlerie, les robots trouveront un domaine privilégié puisque, sous certaines conditions que nous verrons plus loin, ils pourront être groupés pour former des machines d'assemblage d'"units" comportant des robots de présentation de pièces et des robots de soudure.

En forge et en fonderie, on ne peut guère imaginer pour les robots un autre

domaine que la manutention.

Enfin, un autre de leurs domaines possibles d'action sera la peinture. Il existe déjà certains robots de peinture, les uns appelés à tort robots ne sont que des mécanismes élémentaires et extrêmement peu souples puisqu'ils ne peuvent en général peindre qu'un seul type de pièce et à l'aide d'une seule peinture. D'autres, beaucoup plus évolués, tels que le TRALLFA par exemple permettraient de s'adapter facilement à différents produits si leur mode de programmation et le type de mémoire utilisés étaient plus évolués qu'ils ne le sont. Pour l'heure, ces engins ne peuvent accomplir que des tâches grossières.

### III. Caractéristiques essentielles des robots devant être utilisés dans un système de production

La première constatation que nous pouvons faire concerne la très grande diversité des tâches que les robots devront accomplir. Même dans le cas de la manutention seule, les pièces à manipuler iront de quelques grammes à quelques centaines de kilogrammes, voire à plusieurs tonnes. (Je ne parle pas bien sûr des applications en microtechnique où la variation est moindre, mais les masses encore plus faibles).

Les performances seront ainsi très variables: la vitesse sera de quelques dizaines de centimètres à la seconde jusqu'à peut-être 10 mètres par seconde et plus. Les puissances mises en jeu varieront donc de quelques dizaines de watts à plusieurs dizaines de kilowatts. Les précisions varieront dans les mêmes proportions et le fonctionnement des pièces devra aller de  $\pm 0,01$  mm à quelques millimètres, voire quelques centimètres pour les opérations de stockage. Tout cela nous amène à la première conclusion qu'un robot n'est qu'une machine comme une autre et qu'elle doit donc suivre la même loi. La situation des robots actuels est exactement celle des machines-outils il y a 30 ou 40 ans. On prétendait alors faire toutes les opérations d'usinage à l'aide de machines universelles - et il y en avait une grande variété -. On est pourtant venu à la conception de machines spéciales, mais formées presque entièrement d'éléments modulaires. Les robots, je le pense réellement, devront suivre la même loi. Suivant la tâche à accomplir,

on composera un robot à l'aide d'éléments standard pris en catalogue et du plus petit nombre d'éléments spéciaux faits à la demande. Il en sera de la mécanique et des organes de puissance comme de l'unité de commande. Selon que l'on voudra un nombre plus ou moins grand d'axes ou de degrés de liberté, on fera appel à un plus ou moins grand empilage de modules interconnectés. Pour les cas très spéciaux, on étudiera des robots complètement spéciaux, mais l'étude elle-même sera composée de modules préétudiés. Cette solution seule me paraît possible si l'on ne veut pas restreindre les robots à quelques tâches bien spécialisées et très élémentaires. Par exemple, il paraît évident que les robots futurs devront pouvoir être montés dans n'importe quelle position et de façon très simple sur des bâtis, afin de constituer de réelles machines transfert. La solution du robot bloc comportant mémoire, groupe hydraulique, ses propres organes de programmation et ne pouvant qu'être posé au sol ne me paraît pas pouvoir dépasser un stade de diffusion confidentielle.

De même le fait qu'un robot puisse être amené à travailler sur des pièces fixes ou mobiles, de position précise ou non, en trajectoire continue ou point à point interdit absolument que les différents modes de travail et les différentes fonctions soient présents dans chacun des robots. Leur prix de revient serait beaucoup trop élevé malgré la baisse de prix spectaculaire des unités de commande. Leur complication serait aussi beaucoup trop grande et leur fiabilité en souffrirait.

Des réflexions du même genre peuvent être faites en ce qui concerne la programmation des robots. Pratiquement tous les robots actuels travaillent par répétition de mouvements que leur a fait effectuer pour la première fois un opérateur. Dans ce domaine aussi, la comparaison avec la machine-outil est instructive et l'on se souvient que General Electric proposait avant 1950 un dispositif répéteur des déplacements des différents axes d'une machine-outil par enregistrement sur une bande magnétique des mouvements effectués par un ouvrier alors qu'il faisait lui-même la première pièce. Le système, proposé à nouveau dix ans après par CEM, n'a jamais connu le moindre succès et a été remplacé avant que de naître par la commande numérique que nous connaissons. Pour le robot, cela signifie à

mon sens que sans pour autant abandonner l'apprentissage par recopie, il faudra trouver des moyens de programmation à partir de cotes, de dessins et on pourra alors en quelques minutes ou secondes charger un programme qui aura été prétraité en dehors du robot. Le cas est particulièrement évident pour le robot de peinture pour lequel la précision n'est pas très grande, mais les règles pour accomplir un bon pistolage sont très strictes: on introduira dans la mémoire du robot la surface à peindre sous forme d'un certain nombre de points, les algorithmes de définition des trajectoires et les règles de pistolage étant implicites, le robot définira de lui-même sa trajectoire de travail et les moments d'interruption et de rétablissement du jet de peinture. On gardera, bien sûr, la possibilité de programmation par recopie des mouvements d'un opérateur humain, mais sa tâche essentielle sera dans la majorité des cas réduite à la retouche. Celle-ci sera d'ailleurs d'autant moins nécessaire que le robot sera capable de s'auto-adapter à sa tâche, donc d'annuler les erreurs de la programmation (cas de la soudure par point ou de la soudure à la molette, par exemple). En effet, si l'on veut souder par point des tôles, il faut que les forces exercées sur chacun des deux côtés des tôles soient sensiblement identiques. Or, des robots très rapides seront obligatoirement assez raides; toute erreur de position de la pièce se traduira donc par des forces différentielles importantes sur les électrodes. Le seul moyen d'éviter cette erreur qui interdirait d'effectuer une bonne soudure sera de disposer d'une cellule dynamométrique qui annulera, par action sur les asservissements du robot, la force différentielle. Cela démontre à nouveau, à mon sens, cette nécessité de modularité dont je parlais précédemment. En effet, seule la force normale à la surface des tôles à souder compte, une cellule dynamométrique ne mesurant les forces que dans une seule direction est donc suffisante. Il serait coûteux et dangereux d'utiliser une cellule universelle capable de mesurer l'intensité et la direction d'une force quelconque dans l'espace. Là encore donc, on devra disposer de dispositifs capteurs d'efforts adaptés aux besoins. Ceci montre aussi à mon avis que toute étude de robot doit obligatoirement commencer par l'étude des besoins actuels et futurs, ce qui n'empêche pas, bien sûr, d'aller nettement plus loin dans les buts

que l'on se fixe.

Au niveau de l'unité de commande, le principe de modularité exigera que le rôle de celle-ci soit limité aux fonctions essentielles et générales du robot, telles que: la possibilité de se déplacer d'un point à un autre, les lois implicites de mouvement, au démarrage et à l'arrivée, permettant de minimiser les temps de déplacement sans mouvement oscillatoire, la mise en mémoire d'un certain nombre de points définissant la trajectoire. Quant aux autres fonctions, elles devront se faire par apport de modules, par exemple module de recherche de la position d'un trou ou de la normale à une surface. Chacun de ces modules sera composé d'un microprocesseur travaillant le plus possible de façon autonome et ne communiquant avec l'unité centrale de commande que pour les tâches mettant en oeuvre plusieurs modules. On se souviendra surtout de la règle économique qu'il faut respecter scrupuleusement si l'on veut qu'un système modulaire connaisse le succès: le coût supplémentaire d'une option ou d'un module ajouté doit exclusivement se porter sur l'option elle-même et non sur le système de base. Cette règle si simple et pourtant si souvent oubliée explique l'échec fréquent qu'ont rencontré de nombreux constructeurs quand ils ont voulu remplacer des machines spécialisées par des machines universelles, modulaires ou non. Bien entendu, cette exigence de modularité dont nous avons parlé précédemment n'est valable, comme en machines-outils, que tant qu'on n'a pas été capable d'isoler certaines fonctions bien définies qui peuvent économiquement donner lieu à des réalisations à la fois particulières et universelles. Il en est ainsi en machine-outil des tours, des fraiseuses.

#### IV. Influence des automates en général et des robots en particulier sur la conception des produits.

A l'évidence, ceci constitue un immense sujet que je ne saurais traiter par manque de connaissances et aussi un peu par manque de temps. En effet, on peut déjà dire, par simple inspection de la plus grande quantité de produits industriels complexes, que ceux-ci n'ont guère été conçus pour être fabriqués par les machines automatiques modernes. Le cas est particulièrement flagrant dans l'industrie automobile dont le personnel de bureau

d'études, depuis le dessinateur jusqu'au directeur, n'a en général que des notions très vagues, et qu'il estime souvent d'ailleurs sans intérêt, sur la fabrication. Il faut dire que certains fabricants, surtout américains, ont lutté contre cette lacune et cela se ressent au prix extraordinairement bas, par rapport à ceux que nous connaissons en Europe, de leurs produits. C'est donc dire que les concepteurs de produits qui n'ont pas encore tous intégré les machines automatiques connues pourtant depuis trente ans seront encore plus déphasés devant l'apparition des robots. A ce point, je crois qu'il vaut mieux procéder par étude d'exemples. Quand on construit un nouveau véhicule, les techniques que l'on utilise sont généralement complètement différentes de celles utilisées pour le véhicule précédent. Ce changement est parfois justifié par des considérations techniques (cas de la VW Coccinelle et de la nouvelle GOLF qui correspondent à des conceptions fondamentalement opposées) ou économiques. Parfois au contraire, aucune nécessité technique ou économique importante n'a imposé le changement. On voit alors que sur 5 modèles de la gamme d'une marque, 4 sont radicalement différents les uns des autres du point de vue de la carrosserie. Certains utilisent une plateforme, d'autres une carrosserie coque, d'autres une structure mixte. Les portières sont d'une pièce ou en deux pièces soudées, etc. Il en est de même au niveau de la mécanique. Certains moteurs ont un arbre à cames dans le carter, d'autres en tête. Celui-ci est entraîné par chaîne sur certains modèles et par pignon sur d'autres, alors que les suivants utiliseront des courroies. Des pièces de fonctions identiques sont dans des matières différentes. Chaque modèle a donc ses propres chaînes de fabrication. On voit alors ce que peut donner sur les entreprises ainsi équipées un événement tel que la crise du pétrole. Certains modèles voient leur cadence chuter brutalement et leurs moyens de production deviennent sous-employés de même que le personnel qui y est attaché. D'autres modèles, au contraire, récoltent plus de commandes qu'on n'en peut fournir et tous les expédients sont bons pour augmenter les cadences. Le coût de ces deux opérations est fort élevé. Il le sera encore bien plus si ce qu'on appelle maintenant l'enrichissement des tâches se développe, ce qui augmentera dans de fortes proportions investissements et coût du produit.

L'utilisation de robots sur des chaînes de carrosserie permettrait une économie entièrement différente. En effet, à la seule condition que tous les produits fabriqués utilisent une technique identique, et cela ne veut pas dire une apparence identique, or celle-ci est la seule chose que voit le client, on pourrait créer une chaîne par organe pour tous les produits et non plus une chaîne par organe et par produit. Ces changements de cadence se traduiraient alors au niveau de la chaîne de production (cela poserait bien sûr d'autres problèmes au niveau des approvisionnements et de la gestion générale de l'entreprise) par un changement automatique des programmes de travail des automates. Il est clair que ce qui vient d'être dit est applicable à l'automobile, mais aussi à un grand nombre d'autres produits tels que machines à laver, lave-vaisselle, réfrigérateur et en règle générale tout l'électroménager. On voit immédiatement une conséquence assez nouvelle de ce que nous venons de voir. On a toujours accusé la fabrication en série d'engendrer l'uniformité dont l'ennui naquit un jour. Or, cette adaptabilité du robot à des tâches différentes permettrait facilement au contraire de changer, sans changement technique profond, la seule chose qui compte vraiment pour l'utilisateur, c'est-à-dire l'apparence.

Un deuxième type de modification du produit devra apparaître: c'est la conception modulaire en sous-ensembles indépendants. Pour donner un exemple, un train avant, un train arrière de véhicule se montent en général non pas pièce à pièce, mais presque, sur le véhicule. Les réglages ne sont souvent faits que le véhicule entièrement monté. Inutile de dire qu'ils ne peuvent alors être faits que par des hommes. Il deviendra nécessaire de faire de chacun de ces organes un sous-ensemble, montable et réglable séparément, qu'on n'aura plus qu'à fixer d'une façon très simple sur le véhicule. Cette conception sera bien entendu valable pour tous les organes du véhicule.

Enfin, un troisième type de modification s'appliquera à la finition des produits terminés, afin de la rendre exécutable par un robot ou une machine automatique; l'exemple du garnissage du pavillon d'une voiture est typique: beaucoup de véhicules utilisent encore un garnissage en tissu



tendu sur des arceaux métalliques. Ce travail de montage ne peut à l'évidence être fait que par un homme; il n'est ni commode, ni reposant. La généralisation de garnitures de pavillon moulées et collées permet l'exécution par un automate de cette opération. La seule contrainte supplémentaire est que la garniture doit pouvoir être introduite simplement dans le véhicule. Il faut donc que l'ouverture du pare-brise ou de la lunette arrière soit suffisamment large. Un autre exemple est celui du pare-brise ou de la lunette arrière; beaucoup de véhicules utilisent encore des pare-brises et lunettes arrière montés par l'intermédiaire de joints en caoutchouc. Leur pose est certainement l'une des opérations les plus spectaculaires de la fabrication d'une automobile, car elle se fait en tirant une ficelle qui est dans une gorge de caoutchouc quand on appuie le pare-brise sur la carrosserie, ce qui a pour résultat de faire passer une lèvre du caoutchouc de l'autre côté de la tôle. L'opération se termine en tapant à tour de bras au maillet sur le pare-brise pour assurer sa mise en place. A l'évidence, une telle opération est pratiquement impossible à faire automatiquement, au moins économiquement. L'utilisation de pare-brise collé, qui deviendra sans doute bientôt obligatoire pour interdire son éjection en cas de choc, permettrait facilement sa pose automatique par un robot, un autre robot ayant au préalable encollé la surface d'appui sur la carrosserie.

Les exemples de ce type abondent, que ce soit en fabrication mécanique, en emboutissage ou en tôlerie. Je ne peux pas assurer que ce qui est possible pour l'automobile l'est pour tout, mais je serais bien surpris du contraire. Une chose est absolument certaine, et cela sera ma conclusion, l'automatisation de la fabrication de produits non conçus pour cette automatisation coûte très cher et justifie la position, que l'on pourrait qualifier de rétrograde, de nombreux industriels. L'automatisation de la fabrication de produits conçus pour une fabrication automatique est et deviendra de plus en plus économique. Elle doit devenir, de plus, une source de progrès et de liberté pour l'homme. Le robot peut être un élément important de cette évolution.

DISCUSSION A LA TABLE RONDE

C.W. Burckhardt: Dans le développement des robots industriels, nous constatons l'alternative suivante en ce qui concerne la programmation: programmer par l'exemple et programmer à l'avance. Il était intéressant de connaître le point de vue de Monsieur PRUVOT qui ne croit pas à la programmation par l'ouvrier. Dans notre institut, nous avons analysé le problème et nous sommes arrivés à la conclusion qu'il faut garder des systèmes assez souples pour qu'ils puissent même combiner ces deux façons de programmer. Si un robot doit décharger une pile de pièces, on ne connaît pas l'emplacement exact de la palette à l'avance et le premier mouvement sera fait par un ouvrier et le reste par une sorte de sous-routine. Nous ne devons pas dire ici: il y a une solution ou une autre solution; il y a de la place pour les deux solutions et surtout pour des combinaisons des deux.

G. CORAY: J'aimerais peut-être rectifier un peu la critique très délicate que Monsieur PRUVOT a faite tout à l'heure quant au point de vue de la programmation de la commande du robot. Je crois que la programmation est justement une technique qui ne fait que rendre modulaire tout ce qui peut l'être. La notion même de sous-programme est un exemple typique. Dès que l'on peut programmer une série d'opérations dans le domaine du software, cela signifie que l'on peut les regrouper de la manière la plus judicieuse possible. On commence par le faire par écrit, sur carte perforée. Dès le moment où une routine prend suffisamment de permanence et d'existence propre, on peut alors penser à la réaliser soit en hardware, soit sous forme de micro-processeur et la normaliser sur le circuit commercial.

D. HELMS: Il a été dit qu'un robot trouvera un champ d'application pour des tâches simples. Je pense plutôt que pour des tâches simples, nous n'avons justement pas besoin d'un robot universel. Cependant, dans le cadre des montages de montres, de machines à écrire ou d'automobiles, il y a des mouvements compliqués et seul un système avancé de commandes peut être in-

téressant dans ces cas. Parce qu'il y a une certaine uniformité dans ces tâches, une standardisation de la programmation vaut la peine. Ceci n'est pas le cas pour les petits manipulateurs qu'on utilise pour le chargement des machines, comme Monsieur BULLAT l'a mentionné. Naturellement, une commande avancée n'est pas intéressante dans ce cas. Je vois plutôt une division entre manipulateurs et robots. Cela nous conduit à une définition plus exacte du robot. Pour les manipulateurs, on n'a pas besoin de commandes avancées et une programmation standardisée n'est intéressante que pour des applications vraiment difficiles.

F. PRUVOT: Sans vouloir contredire Monsieur HELMS, il me semble qu'il y a une certaine contradiction, puisqu'on veut faire des tâches compliquées et difficiles avec des engins qui seront compliqués. Tout le monde sait qu'un engin compliqué, sauf exception, est toujours moins précis qu'un engin simple. Cela reviendrait donc à dire que plus la tâche est difficile, plus il faut la faire avec un engin difficile à exploiter ou peu précis. Là, à mon avis, il y a une large contradiction; il me semble qu'il y a, d'une part, une évolution des produits et, d'autre part, une évolution des idées. L'individu qui penserait que tout peut être fait avec un robot anthropomorphe pourrait se casser la figure sans aucun doute et je ne crois pas qu'il faille dire que les tâches compliquées sont faites avec des robots. Au contraire, j'aurais fortement tendance à dire, comme je le mentionnais tout à l'heure: les tâches très compliquées et spécifiques pourraient et même devraient peut-être être faites avec des machines spécialisées et, au contraire, des tâches relativement simples pourraient être faites avec des robots. Je confirme bien ce que je disais tout à l'heure.

C.W. BURCKHARDT: Il y a beaucoup de choses qui nous semblent compliquées aujourd'hui, mais qui ne le seront plus demain. Je pense que l'électronique fera des progrès beaucoup plus rapides que la mécanique et que des problèmes qui sont encore compliqués aujourd'hui seront simples demain. Je crois que si nous pouvons charger davantage l'électronique que la mécanique, il sera possible avec une mécanique moins précises d'arriver à faire

néanmoins des opérations précises en utilisant une information appropriée.

Je me permets de poser une question à Monsieur BULLAT: Le montage d'un mouvement d'horlogerie doit se faire manuellement. Est-ce bien à cause de l'engrènement des rouages ? Il faut la finesse d'une main féminine pour éviter le crochement des dents, n'est-ce-pas ?

G. BULLAT: En partie, si vous voulez, mais c'est la seconde étape. La première étape est de séparer des pièces entre elles. Les rouages sont ajoutés pour être légers et ils s'interpénètrent. Le problème est extrêmement compliqué lorsqu'il faut les séparer et par le simple système actuel de vibreurs, cela ne va pas du tout. C'est là que le robot en tant que trieur évolué pourrait aider cette fonction. La mise en place n'est pas en soi extrêmement compliquée et je ne crois pas qu'il faille rechercher quelque chose de très élaboré pour cette opération, comme pour les autres d'ailleurs. Comme Monsieur PRUVOT l'a relevé, il n'y a aucune nécessité de faire quelque chose d'universel dans les fonctions d'usinage.

C.W. BURCKHARDT: Je pose une question délicate à Monsieur BALMER: Vous avez vu ce que vient de montrer Monsieur BULLAT. Vous avez vu une chaîne de fabrication de montres impressionnante par sa grandeur. C'est, au fond, une machine d'une longueur de 10 mètres ou même davantage, mais vous-même vous pensez plutôt à des machines simples reliées par des robots qui peuvent être remplacés par des hommes. Si je comprends bien, cette machine de 10 mètres de long est contraire à la conception d'avenir que vous esquissez.

S. BALMER: Je vous rappelle que j'ai signalé qu'il y avait des exceptions à la règle: des privilégiés disposaient de produits qui avaient une durée de vie relativement longue. Monsieur BULLAT ne me contredira pas si j'affirme que les montres et les ébauches qu'il a présentées aujourd'hui ne sont pas nées d'hier et que le privilège d'avoir des produits qui durent relativement longtemps et celui de la grande quantité permettaient de faire la machine taillée sur mesure qui exécutait un seul type de pièce. L'horloger a donc tous les avantages qui rendent possible ce mode de production. Il

est évident que le problème est très différent pour le produit qui a une durée de vie relativement courte et des séries relativement faibles.

G. BULLAT: Malgré cela, j'aimerais ajouter que les solutions actuellement en cours relatives à la machine-transfert, spécialement dans l'assemblage où le personnel est encore lié à la machine ayant des éléments automatiques, ne peuvent plus être envisagées, même pour des produits privilégiés comme les nôtres qui durent longtemps. Nous prévoyons, au contraire, une philosophie dans le sens d'un enrichissement des tâches, c'est-à-dire fractionnement du travail et automatisation partout où on le peut: au lieu d'avoir un grand ensemble de 10 mètres de long sur lequel on répartit, selon les circonstances, des automates et des femmes qui font le travail à la main et qui sont obligées de tenir la cadence de l'automate, on aura des groupes automatiques de plus petite importance. En outre, nous prévoyons pour les opérations qui ne sont pas immédiatement automatisables des éléments manuels où l'ouvrière n'est plus enchaînée à la machine. Cependant, pour la production automatique, les grands ensembles restent, étant donné que le tout est automatisé. On aura besoin de robots de chargement pour les montages.

C.W. BURCKHARDT: L'auditoire a-t-il encore des questions à poser ?

A. MERCIER (Schäublin S.A., Bévillard): Je désire répondre à Monsieur PRUVOT. Je suis entièrement d'accord avec la conclusion de sa conférence: il faut modifier la conception des machines et des produits plutôt que chercher à sophistiquer un robot. En ce qui concerne la normalisation, il s'agit d'une question d'éducation ou de réforme culturelle dans le pays où l'on se trouve; ce n'est pas mon problème. Cependant, j'en viens à ma question: Pouvez-vous en quelques mots m'indiquer votre conception nouvelle de la machine-outil, parce que vous avez dit que la programmation faite par l'ouvrier a tendance à diminuer ? Je crois que c'est le contraire. On a vu des machines à commande numérique développées avec d'immenses processeurs de grandes firmes telles que Renault. Par contre, une évolution se prépare depuis deux ans: c'est justement la programmation par l'ouvrier

pour motiver ce dernier, pour améliorer le climat social, sa position à son poste de travail, ce qui est aussi un phénomène très important.

F. PRUVOT: Je ne peux pas vous répondre pour deux motifs: premièrement, cela nécessiterait une longue réponse et deuxièmement, c'est en dehors de nos propos actuels. Le véritable enrichissement des tâches ne se situe pas au niveau de la quantité d'opérations à faire, mais au niveau des initiatives, de la décision et de la réflexion.

A. CHAPPUIS (Ecole Technique Supérieure de l'Etat de Vaud): A la fin de ces deux journées, je me pose une question: les robots tels que Monsieur BURCKHARDT les a définis au début ne sont-ils pas appelés à jouer un grand rôle dans la petite mécanique ? Nous pouvons remarquer que pendant ces journées nous ne nous en sommes pas toujours tenus à la définition donnée primitivement du robot; nous avons parlé de la construction qui devrait éviter justement la complexité des robots; puis, nous nous sommes éloignés de la petite mécanique et nous avons abouti à l'industrie automobile. Je me demande si nous n'assisterons pas tout simplement au développement considérable des robots dans la petite mécanique elle-même. Ces robots pourraient avoir un sens tactile, un sens visuel, peut-être encore d'autres sens plus affinés qui permettraient de remplacer avantageusement l'homme dans certaines opérations.

C.W. BURCKHARDT: Je vous remercie, Monsieur CHAPPUIS. Je crois que vous avez tiré les conclusions de ces journées. Ce qui est important pour moi c'est que l'intérêt pour les robots ait été éveillé. Beaucoup de bons constructeurs vont rentrer maintenant chez eux; ils vont penser au problème, réfléchir, envisager de nouvelles solutions. Je crois qu'il est important que ces voies soient ouvertes et que l'on sache quels spécialistes nous avons en Suisse ou pas trop loin de notre pays. Je suis très content du succès de cette conférence et je me permets de conclure en remerciant tous les participants et en espérant qu'ils ont tous appris quelque chose.

Just published:  
Bisher erschienen:

**ISR 1**

René Hirsig  
**Menschliches Konformitätsverhalten – am Computer simuliert**  
Ein dynamisches Prozessmodell  
1974, 165 Seiten, 43 Abbildungen, 3 Tabellen.  
ISBN 3-7643-0712-9

**ISR 2**

Werner Hugger  
**Weltmodelle auf dem Prüfstand**  
Anspruch und Leistung der Weltmodelle von J. W. Forrester und D. Meadows  
1974, 178 Seiten, 51 Figuren, 2 Faltblätter.  
ISBN 3-7643-0749-8

**ISR 3**

Claus Schönebeck  
**Der Beitrag komplexer Stadtsimulationsmodelle (vom Forrester-Typ) zur Analyse und Prognose großstädtischer Systeme**  
1975, 129 Seiten. ISBN 3-7643-0750-1

**ISR 4**

Christof W. Burckhardt (Editor)  
**Industrial Robots – Robots industriels – Industrieroboter**  
Tagungsberichte der Journées de Microtechnique  
1975, 224 Seiten. ISBN 3-7643-0765-X

**ISR 5**

Kuno Egle  
**Entscheidungstheorie**  
Eine strukturtheoretische Darstellung  
1975, 240 Seiten. ISBN 3-7643-0766-5

**ISR 6**

Dieter Ruloff  
**Konfliktlösung durch Vermittlung: Computersimulation zwischenstaatlicher Konflikte**  
1975, 228 Seiten. ISBN 3-7643-0777-3

**ISR 7**

Salomon Klaczko  
**Systemanalyse der Selbstreflexion**  
Eine inhaltliche Vorstudie zu einer Computersimulation mit einem Computerprogramm von Karl-Heinz Simon  
1975, 358 Seiten. ISBN 3-7643-0778-1

**ISR 8**

John Craig Comfort  
**An Efficient Flexible Computer Program to Answer Human Questions**  
1975, 145 pages. ISBN 3-7643-0779-X

**ISR 9**

Richard Rickenbacher  
**Lernen und Motivation als relevanzgesteuerte Datenverarbeitung**  
Ein Computer-Simulationsmodell elementarer kognitiv-affektiver Prozesse  
1975, 247 Seiten. ISBN 3-7643-0787-0

In preparation:  
In Vorbereitung:

Wolfgang Rauschenberg:  
**Computereinsatz bei der Planung von betrieblichen Layouts**  
Kritische Analyse gegebener Algorithmen und Entwurf eines neuen dreidimensionalen Verfahrens

Helmut Maier:  
**Computersimulation mit dem Dialogverfahren SIMA**  
Konzeption, Dokumentation, Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes in der wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Forschung, Planung und Planungspraxis mit zwei Anwendungsbeispielen

Rüdiger Färber:  
**Gewerkschaftliche Streikstrategien in der BRD**  
Unter spezifischer Berücksichtigung der Tarifaussensandersetzung in der Hessischen Chemie-Industrie im Sommer 1971. Eine systematische Studie

S. Klaczko:  
**Vorlesungen über künstliche Intelligenz**

Reinhold Siegel:  
**Zur Anwendbarkeit von System Dynamics in der Lagerhaltung**

Charles Dunning:  
**Graph Theory and Games**

Manfred Wettler:  
**Computersimulation des Verstehens von Sprache**  
Ein Reader über neue Forschungen auf dem Gebiet der Computational Semantics

F. Pohlers:  
**Computersimulation eines nationalen Bildungssystems am Beispiel der BRD von 1950 bis 2000**

Salomon Klaczko (Hrsg.):  
**Kybernetik und Psychologie**  
Tagungsberichte eines Symposiums der Schweizerischen Vereinigung für Kybernetik und Systemwissenschaften an der Universität Zürich, Oktober 1974

Ulrich Moser:  
**Formale Modelle und Computersimulation in der Psychologie**  
Ein Reader mit Artikeln diverser Autoren zum affektiv-kognitiven Verhalten des Menschen

Rolf Kappel:  
**Überprüfung prozesspolitischer Strategien an einem Simulationsmodell**  
Kybernetische Ansätze zur Steuerung von Volkswirtschaften

G. Matthew Bonham and Michael J. Shapiro:  
**Thought and Action in Foreign Policy**  
Proceedings of the London Conference on Cognitive Process Models of Foreign Policy, March 1974

Dagmar Schlemme:  
**Vergleich verschiedener Unternehmerstrategien in der Personalförderung**  
Ein dynamisches Simulationsmodell von Leistungsmotivation am Arbeitsplatz

C. V. Negoita and D. A. Ralescu:  
**Applications of Fuzzy Sets to Systems Analysis**

Jean Vuillemin:  
**Syntaxe, Sémantique et Axiomatique d'un Language de Programmation simple**

Alexander van der Bellen:  
**Formale Ansätze zur allgemeinen und kollektiven Präferenztheorie**  
Pfad-Unabhängigkeit und andere Kriterien für Auswahl-funktionen, unter besonderer Berücksichtigung kollektiver Entscheidungsregeln