



NEID 図書・資料室

財団法人 日本産業技術振興協会

昭和 57 年 3 月

(高度自動化機械に関する調査研究)

今後の大規模技術開発の方向について

## まえがき

昭和56年度の工業技術院の委託による「今後の大型技術開発の方向についての調査研究」は「今後の大型技術開発の方向についての検討に、「高度自動化機械」に関する調査が加えられて一つの課題となっており、本報告書は後者の課題で、工業技術院大型技術研究開発官室及び通商産業省機械情報産業局産業機械課の御指導のもとに行ったものであります。近年コンピュータの発達と、制御理論、自動化機械の普及により、ロボットの発展は目覚しく、産業の高度自動化に大きく貢献しております。

さらに最近においては、人間に近い知能をもった機械としてのロボットも開発され、産業用ロボットの利用分野は一段と前進している。

本報告書は、このように進歩の著しい高度自動化機械に関し、高度自動化機械調査委員会を設け委員長には、渡辺 茂先生にまた委員には高度自動化機械に関する学識経験者をお願いしてとりまとめました。報告書では、アンケート調査の結果についても解析してあります。

調査研究の実施にあたっては、(社)日本産業用ロボット工業会(知能ロボット調査研究専門委員会(委員長 梅谷陽二東京工業大学教授))の御支援をいただいたことを付記して、謝意を表すものであります。

当調査研究の成果が、わが国高度自動化機械工業の発展に寄与することができれば、本調査研究を受託した当協会にとって誠に幸甚のいたりであります。

昭和57年3月

(財)日本産業技術振興協会  
専務理事 鈴木 三 男

高度自動化機械調査委員会

(委員長)	渡 辺	茂	東京都立工科短期大学 学長
(委員)	窪 田	雅 男	(財)機械振興協会技術研究所長
〃	加 藤	一 郎	早稲田大学理工学部 教授
〃	吉 川	弘 之	東京大学工学部 教授
〃	梅 谷	陽 二	東京工業大学工学部 教授
〃	金 山	裕	筑波大学 教授
〃	垣 田	行 雄	(財)日本システム開発研究所 理事
〃	稲葉	清右衛門	富士通ファナック(株)社長
〃	吉 岡	忠	(社)日本電子工業振興会 専務理事
〃	米 本	完 二	(社)日本産業用ロボット工業会 専務理事
〃	中 嶋	清 一	(社)日本プラントメンテナンス協会 専務理事
〃	吉 田	豊 明	日本経済新聞社 編集局産業第二部長
〃	若 松	清 司	電子技術総合研究所 制御部長
〃	清 水	嘉十郎	機械技術研究所 システム部長

協力者

(社)日本産業用ロボット工業会

(知能ロボット調査研究専門委員会)

(委員長) 梅 谷 陽 二 東京工業大学工学部機械物理工学科 教授

(ニーズ調査分科会)

(分科会長) 早 馬 修 野村総合研究所 産業経済研究部長

(委員) 村 上 智 昭 (株)小松製作所 技術研究所主幹研究員

〃 森 田 桂 三 日本電気(株) 生産技術開発センター第二開発部長

〃 林 原 勝 也 日立造船(株) メカトロプロジェクト

〃 平 田 和 博 川崎製鉄(株) 技術本部管理部部長補

〃 後 藤 繁 (株)三秀テクノラボ

〃 柴 田 勉 (株)柴田技術研究所 所長

〃 神 宮 知 安 ディーゼル機器(株) 研究開発本部企画部部長

〃 高 橋 昭 夫 (株)日本能率協会 RD&E本部

〃 福 沢 六 郎 戸田建設(株) 原子力技術部

〃 加 藤 実 (株)大林組 機械部技術課長

〃 田 口 伸 夫 東芝精機(株) ロボット部部長

〃 荒 川 宇 平 東光(株) 営業本部営業推進G副参事

〃 福 地 文 夫 (株)日立製作所 商品事業本部副技師長

(感覚・認識分科会)

(分科会長) 高 瀬 国 克 電子技術総合研究所 システム制御研究室主任研究官

(委員) 三 笠 一 男 立石電機(株) 中央研究所FRJ

〃 吉 田 健 一 住友電気工業(株) 研究開発本部主任研究員

〃 西 輝 幸 (株)不二越 工作機械製造所ロボット部主任技師

〃 根 本 新 住友金属工業(株) 計測制御技術室主任

〃 西 浜 幸 夫 ダイキン工業(株) 研究所ロボットグループ

〃 鈴 木 威 一 沖電気工業(株) 生産技術部課長

〃 稲 葉 肇 ファナック(株) ロボット技術部長

〃 森 恒 雄 日本車両製造(株) 技術研究開発部部長

〃 白 城 嗣 久 三菱重工業(株) 精機事業部主務

〃 原 田 正 尚 (株)山崎鉄工所 技術部システム設計課課長

〃 阿 部 章 男 日本テキサス インストルメント(株) フロントエンドRSM

〃 田 中 健 治 多摩川精機(株) 技術部部長

- // 三宅 勇次 石川島播磨重工業 制御システム技術室開発G課長
- // 入江 善朗 富士電機製造(株) メカトロ事業部業務部課長代理
- // 野村 省三 松下電工(株) 総合技術研究所主査
- (メカニズム・材料分科会)
- (分科会長) 中野 栄二 機械技術研究所 生産工学部ロボット工学課課長
- (委員) 高橋 利行 三機工業(株) 産業設備本部業務部専門部長
- // 平野 善弘 豊田工機(株) 第一研究開発部部長
- // 吉国 宏 吉国技術士事務所 所長
- // 斉田 洋一 三菱金属(株) 商品開発室室長
- // 遠藤 五一 東京芝浦電気(株) 生産技術研究所部長
- // 戸田 日出夫 川崎重工業(株) 油圧機械事業部ロボット技術部部長
- // 小野 信吉 (株)日本工機 取締役・東京支店長
- // 久保田 健司 日揮(株) 原子力事業本部機械設計部
- (制御・情報処理分科会)
- (分科会長) 井上 博允 東京大学工学部機械工学科 助教授
- (委員) 都崎 武祥 松下産業機器(株) 生産システム機器(事)技術部課長
- // 大野 栄一 三菱電機(株) 応用機器研究所電子制御開発部長
- // 光沢 邦男 トヨタ自動車(株) 生産技術開発部主担当員
- // 黒沢 豊樹 黒沢R&D技術事務所 所長
- // 谷 満輝 (株)谷製作所 代表取締役
- // 成瀬 利幾雄 コンサルティング・ブレーン・アソシエイツ主任研究員
- // 田畑 秀光 神鋼電機(株) 研究部
- // 井関 義弘 三井造船(株) システムエンジニアリング(事)技術部課長
- // 小山 英夫 新明和工業(株) 技術室課長
- // 大倉 公一 久保田鉄工(株) 研究第一部
- // 倉員 昌一郎 (株)明電舎 取締役 メカトロ事業本部副本部長
- // 藤村 幸雄 (株)三協精機製作所 工機事業部開発課長
- // 久良 修郭 (株)安川電機製作所 開発研究所制御技術主事
- // 沢野 進 トキコ(株) 研究所主管研究員

## 目 次

1. 高度自動化機械の定義及び概念	1
1-1 定義	1
1-2 人工知能とロボット	2
1-2-1 人工知能とロボット	2
1-2-2 人工知能ロボット	3
1-2-3 高度自動化機械	3
2. 高度自動化機械のニーズ	6
2-1 高度自動化機械が求められる背景	6
2-1-1 労働力需要と生産性の向上の必要性	6
2-1-2 労働安全と労働災害のコスト	6
2-1-3 社会資本のメンテナンスコスト	8
2-1-4 先端技術分野のニーズ	8
2-2 高度自動化機械のニーズ分析	9
2-2-1 システム別にみたニーズ	9
(1) ニーズの内容と分布	9
1) 組立作業	9
2) 悪環境作業	10
3) 介助作業	10
4) 保全作業	14
5) 危険作業	14
6) 検査作業	14
7) 搬送作業	14
(2) 開発を必要とする理由	14
(3) 開発必要時期	14
(4) 実用化の期待価格	14
(5) ニーズから見た要素技術	17
2-2-2 産業別に見た高度自動化機械のニーズ	18
(1) 産業全体でのニーズ	18
(2) 製造業でのニーズ	19
1) 電気機械器具製造業	19
2) 自動車製造業	19
3) 化学工業	19
4) 金属製品製造業	19
(3) 非製造業でのニーズ	19
1) 建築、土木、鉱業	19
2) 電力、通信	21
3) 原子力	20
4) 海洋開発、水産業	21
5) 運輸、倉庫、荷扱	20
2-3 高度自動化機械の需要規模	22
2-4 ニーズから見た今後の開発の方向について	24
2-4-1 概要	24
2-4-2 極限作業ロボットのニーズ	24
(1) 極限作業ロボットのニーズと主要用途	24
(2) ニーズ調査からみた政府による極限作業ロボットの開発の必要性について	25

1)	極限作業ロボットの価格	25
2)	極限作業ロボットの普及予想	26
3)	極限作業ロボットの要素技術	26
4)	極限作業ロボットの開発の方向について	27
3.	システムの構成要素	27
3-1	感覚、認識	27
(1)	位置、速度センサの現状	27
(2)	位置、速度センサの問題点と課題	27
3-1-1	視覚	28
(1)	立体認識	30
(2)	色認識	30
(3)	多階調	30
(4)	高速追跡性、自動焦点、自動感度調節	30
(5)	高分解能	30
(6)	小型、軽量	30
(7)	処理プロセッサ	30
(8)	認識技術	31
3-1-2	距離覚	34
(1)	近接覚センサ	34
(2)	超音波距離センサ	34
(3)	その他	34
3-1-3	触覚	34
(1)	接触覚	34
(2)	圧覚	35
(3)	力覚	35
(4)	すべり覚	37
(5)	複合型触覚	37
1)	多層感圧導電ゴムによる複合型触覚	37
2)	半導体歪ゲージによる複合型触覚	39
3-1-4	聴覚（含発声機能）	40
(1)	音声認識	40
(2)	音声合成	41
(3)	音響認識	41
(4)	異常者の検出システム	42
(5)	障害物探知システム	43
(6)	監視システム	43
(7)	品質管理システム	43
3-1-5	平衡覚	44
3-1-6	非接触型温覚（赤外線小形高速二次元認識センサ）	45
3-1-7	臭覚・味覚（化学的反応を利用した感覚）	46
3-2	メカニズム・材料	46
3-2-1	腕・手の要素技術	46
(1)	小型・軽量化	47
(2)	高精度化	47
(3)	多自由度化	47
(4)	高剛性化	47
(5)	高速化	47
(6)	手の技術	48
(7)	指の技術	48
(8)	手首の技術	48

3-2-2	移動機能	48
	(1) 表面移動機能	48
3-2-3	アクチュエータ	49
	(1) アンケート結果の概要	49
	(2) 方式・媒体別にみたシーズ指向の特質	50
	(3) ニーズから見たアクチュエータ技術における開発課題	50
3-2-4	ロボットの構造用材料	53
3-3	制御・情報処理	54
3-3-1	制御機能	54
	(1) 協調制御	54
	(2) 遠隔制御	56
	(3) 階層制御	56
	(4) 分散制御	56
	(5) その他	56
3-3-2	知能機能	57
	(1) 問題解決システム	57
	(2) 学習機能	57
	(3) 作業・環境に関する知識の利用	57
	(4) 知識の利用	57
3-3-3	ロボット言語	57
	(1) 動作レベル	57
	(2) 対象レベル	58
	(3) 作業レベル	58
	(4) その他	58
3-3-4	情報処理機能	58
	(1) 高速処理	58
	(2) 並列処理	58
	(3) ロボット用オペレーティングシステム	59
	(4) その他	59
3-3-5	ロボット制御方式の事例	59
	(1) 軌道制御とそのソフトウェア・サーボ	59
	(2) 力ベクトルを制御するソフトウェア・サーボ	60
	(3) 仮想メカニズム(ソフトウェアによる作業向き自由度の実現)	61
	(4) その他	62
3-3-6	ロボット言語の事例	62
	(1) AL(スタンフォード大AIラボ)	62
	(2) AUTOPASS(IBM トーマス・ワトソン研究所)	64
	(3) LAMA(MIT, AIラボ)	65
	(4) ALL(東大機械工学科)	66
	(5) VAL(ユニメーション)	67
	(6) ROBEX(アーヘン工大)	68
	(7) LM(仏・IMAG)	69
	(8) RAPT(エジンバラ大学)	69
4.	システム化に対応する1つのアプローチ	73
4-1	概要	73
4-2	「システムロボット」の構成ユニット	74
4-2-1	移動ユニット	74
	(1) 表面移動ユニット	74
	(2) 空中移動ユニット	76
	(3) 水中移動ユニット	77

(4) 地中移動ユニット	77
4-2-2 視覚ユニット	77
(1) ユニバーサルビジョン	78
(2) ローカルビジョン	78
(3) センサ材料	78
4-2-3 作業ユニット	79
(1) アームの開発	79
(2) リストの開発	80
(3) ハンドの開発	80
(4) ツールの開発	80
(5) 機械加工工場用マニピュレータ	80
4-2-4 ボディユニット	80
(1) 高性能無公害無騒音エネルギー	81
(2) 省エネルギーシステムの開発	83
(3) 補助作業具収納技術の開発	84
(4) 材料開発	84
4-2-5 情報処理ユニット	84
(1) ロボット用プロセッサの開発	85
(2) 情報通信方式の確立とその標準化	85
(3) 分散方ロボット用OSカーネル	85
(4) 故障・異常状態の監視と対応処理	85
(5) 知能及びロボット作業用データベース	85
4-2-6 マン・マシン・インタフェース	85
(1) ロボット動作言語	85
(2) 環境モデルの教示と表示	86
(3) 各種の情報伝達の手段の充実	86
4-3-1 建設ロボット「ロボボーザ」	86
(1) 「ロボボーザ」の使用目的	86
(2) 「ロボボーザ」の概略イメージ	86
(3) 作業用マニピュレータ	87
(4) ボディアの役割	87
(5) 情報処理装置	87
(6) マンマシンコミュニケーションユニット	87
4-3-2 原子力ロボット	87
4-3-3 宇宙ロボット	88
4-3-4 災害救助ロボット	89
(1) 災害救助ロボットに必要な機能	89
(2) 災害救助ロボット開発上の問題点	89
4-3-5 ロボット組立工場	89
5. 今後の課題および結言、提言	91
5-1 海外における状況	91
5-2 ニーズから見た高度自動化機械の開発課題	93
5-3 シーズから見た高度自動化機械の開発課題	93
5-4 結言	93

# 1. 高度自動化機械の定義および概念

## 1-1 定義

高度自動化機械とは、高性能の感覚機能と認識機能を有し、自己の持つ知識データにより行動決定のできる実用的な自動化機械である。

上記の定義に従うと、高度自動化機械は従来の（広義の）の機械を超える新しい概念をもった機械であると言える。すなわち、一言で表現するならば、高度自動化機械は自律性と能動性を兼ね備えた自己完備形の強いものである。もし、これにエネルギー自己保有を加えれば、操作者とのコミュニケーションを通じて知識、命令、報告を交換しつつ、環境や外界の変化に適応しつつ自律的に行動・作業のできる理想的な機械と考える。このような機械を現在の既存最先端技術および工学のカテゴリで位置づけるならば、人工知能、ロボット、生物機械などを総合した姿が浮かび上がってくる。

このことは1-2で述べる。

高度自動化機械は大別すると次の機能要素から構成される。

### ① 感覚機能

環境・外界センサ、体内センサ、など

### ② 人工知能機能

パターン認識、自然言語、問題解決、意志決定、知識、など

### ③ 効果器機能

マニピュレータ、移動装置、特殊作業機、など

さらに、支援システムとして以下のものが必要とされるが、これについてはここでは主たる調査対象とはしていない。

#### a エネルギー源

自己保有形、遠隔供給形、直結供給形、など

#### b コミュニケーション系

外部の操作者との情報交換、データ伝送、など

以上の要約として図1・1・1に高度自動化機械の概念図を示す。

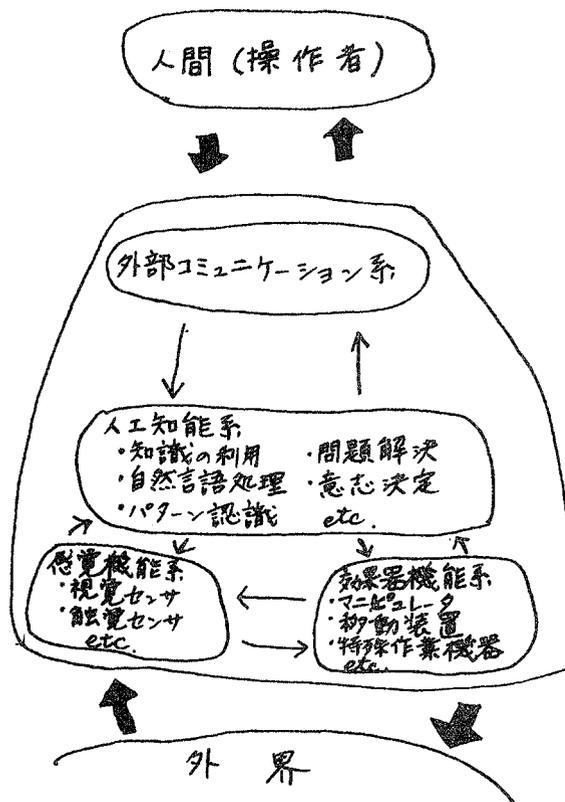


図1・1・1 高度自動化機械の概念図

## 1-2 人工知能・ロボットから見た位置づけ

### 1-2-1 人工知能とロボット

遠く神話の時代から人類は、人間と同じ働きをする機械の実現を夢見てきた。そして、多くの自動人形やカラクリ人形が製作され、“機械人間”の活躍する物語も数多く生み出された。中でもチェコの作家チャペクの戯曲「R. U. R. (ロッサム万能ロボット社会)」の中に登場する人造人間“ロボット”は、その知能の故に自動人形やカラクリ人形を超えた新しいタイプの人造人間として、その後多くのSF小説などにより我々にとっておなじみのものとなった。しかし、これらSFに登場するロボットは夢物語であり、“真面目な”工学者の研究の対象とはならなかった。

ところが戦後のコンピュータの発達と多くの制御理論、自動機械の普及によって、ロボットに新たなタイプが登場した。これは前記のロボットとは異なり、人間に替って危険な作業や退屈な仕事を代行する目的でロボットを開発しようというもので、これらが現在、我が国が世界的にもトップレベルにあると言われる産業用ロボット (Industrial Robot) である。これはほとんどの場合、一本の腕と教えられた作業プログラムを記憶する記憶機能を持つ簡単な構造のものであるが、この記憶機能が他の自動機械とロボットとの大きな相違点である。最近では各種のセンサの開発によってより細かな作業内容もこなすものが製作されている。

しかしながら、これらの産業用ロボットでは、“知性”はあまり感じられない。産業用ロボットのようなハードウェアの研究とは別に、従来のコンピュータや“人工知能”の研究から、より自由で、しかも人間に近い知能を持ち機械としてのロボットを研究しようとするソフトウェアからの研究もほぼ時を同じくして行われ始めた。これらの分野における“ロボット”は人間の知的機能の抽象化であり、多くの場合コンピュータ内のシミュレーションであった。この分野での研究は自然言語の処理、問題解決や意思決定、パターン認識に代表される入力情報処理、学習や適応、知識の表現とその利用などひとつずつの分野でさまざまな研究がなされてきたが、真の意味での“知能”はこれらの分野の総合したもの、あるいは総合する能力であろう。情報科学でこのような人工知能の研究は今後ますます大きく飛躍すると期待されている。

図1・2・1に人工知能を有する知能ロボットへの各種のアプローチを模式的に示す。

## 1-2-2 人工知能ロボット

情報科学での人工知能の研究は、前述のように人間の知的能力に対する基礎科学的興味からなされてきたが、その過程で得られた技法は、ハードウェアの発達とともに産業用ロボットの高度化に利用されようとしている。

現在、多くの人々が生産の現場で、加工、組立、検査などの工程に従事しているが、どのような作業でも人間は目と手がなしでは仕事をすることができない。人間の目が物を見わけ、手が器用に動くのは人間の脳の神経系の巧妙な仕組のおかげである。この機能を我々は漠然と知能と呼んでいるわけである。

従来の産業用ロボットはこの点が劣っていたので、きわめて簡単な仕事しかできなかったのである。産業用ロボットの分野では、ロボットに視覚を初めとする各種のセンサを導入し、手の制御の技法とコンピュータ技術、システム技術が一体となって新しいオートメーション用ロボットシステムを実現する努力が続けられている。このようなロボットシステムを仮に“人工知能ロボット”と呼ぶこととする。その目的によってシステム構成は異なるが、図1・2・2にそのハードウェア構成例を示す。

この各部を人間の各器官に対比すれば

頭脳……………中央コンピュータ  
視覚……………TVカメラ、前処理コンピュータ  
聴覚……………マイクロホン、前処理コンピュータ  
音声……………スピーカ、音声発生用コンピュータ  
手 ……………多自由度マニピュレータ、制御用コンピュータ  
触覚……………接触、力センサ、前処理コンピュータ  
足 ……………車、制御コンピュータ

となろう。

このような“人工知能ロボット”が実現するためには、ハードウェアの実現はもちろん必要であるが、前述の人工知能の研究分野と対比して次のような次のような機能のソフトウェアが必要である。

### 1) 自然言語処理

人間がロボットの与える指令は、できるだけ普通の言葉であることが望ましい。ロボットは、あいまいなところを含む指令の内容を理解し、判らない点は問い返して、その指令を実行しなければならない。

### 2) 問題解決

知能ロボットは、与えられた指令を実行する計画を独力で考えねばならない。

### 3) 入力情報の解析

ロボットは、その目で外界を見、触覚で対象に触れるが、これらの感覚器からの情報を解析して、対象が何であるか、自分の周辺がどうなっているかを知らねばならない。

これは、いわゆるパターン認識の問題であるが、現在よく行われている文字読み取りのパターン認識のような解答の決まった対象ではないので、質的に異なる問題である。

### 4) 運動制御

問題解決の結果得られた“行動”を、各運動器官のアクチュエータの動きに変換して指令を送る。ロボットの自己保護と円滑な運動のためには、各器官の制御をかなり自律的に行うことが必要である。したがって、人間の手足の運動の場合のような多重の制御ループを巧妙に組み合わせることが必要不可欠となる。

### 5) 知識の表現と利用

人工知能ロボットは前述のように、大まかな指令さえ与えれば、一々細かい指図をしなくても、後は“常識的”に仕事を片づける。この一見簡単な“常識”をどのようにロボットに持たせるかは、人工知能問題で最も難しい問題である。感覚情報から物体を認識するのも、日本語や英語のような自然言語の意味をつかむのも、仕事の計画をつくるのも、ロボットの頭脳の中にある多くの知識を利用しなければならない。また、過去の経験は以後の計画作成に大いに役立つ。

ここに示したような機能は、本質的には互いに深いかわりがあり、総合的にはこれらの機能を実現しなければならない。

これらの関係を図1・2・3に示す。

## 1-2-3 高度自動化機械

産業構造の変化に伴って、各生産現場では従来の多量生産のオートメーションから、多品種生産への移行が起りつつある。これに対処するために新しいタイプの生産システム（FMS）が開発されつつある。

FMSでは各種の機械が高度に自動化されるとともに、各種の作業に適応できる高いフレキシビリティが要

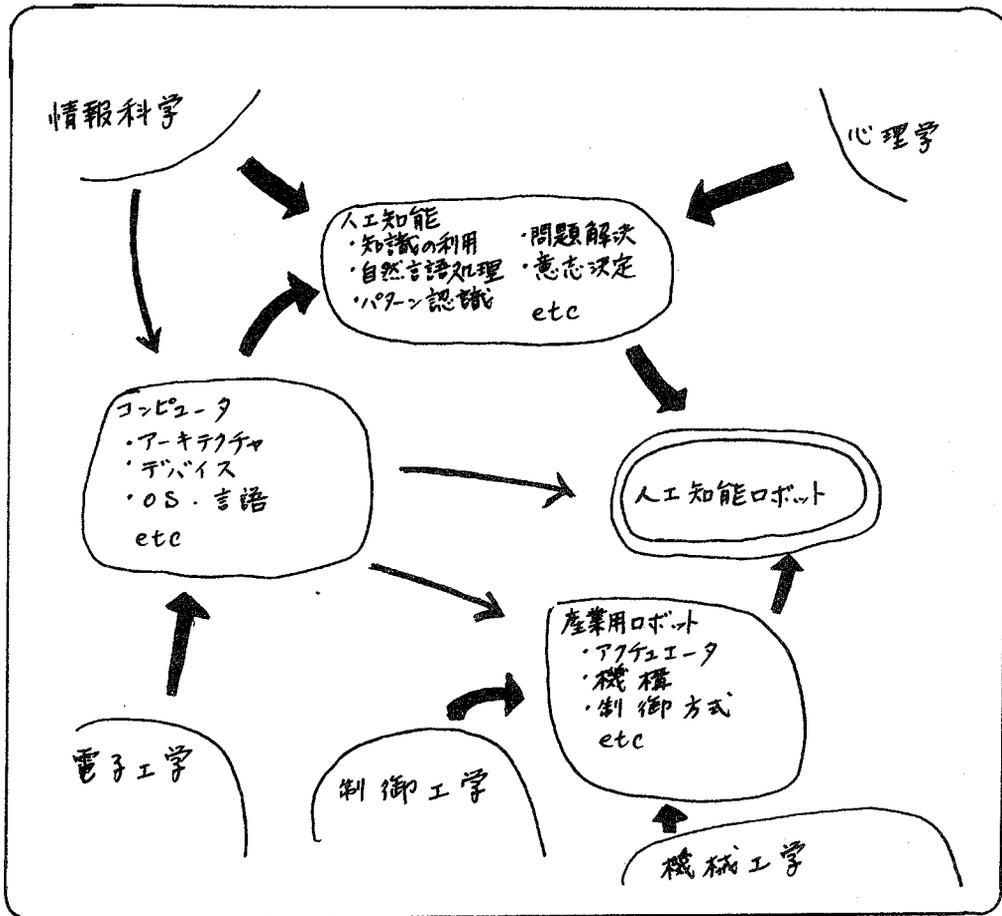


図1・2・1 人工知能ロボットへのアプローチ

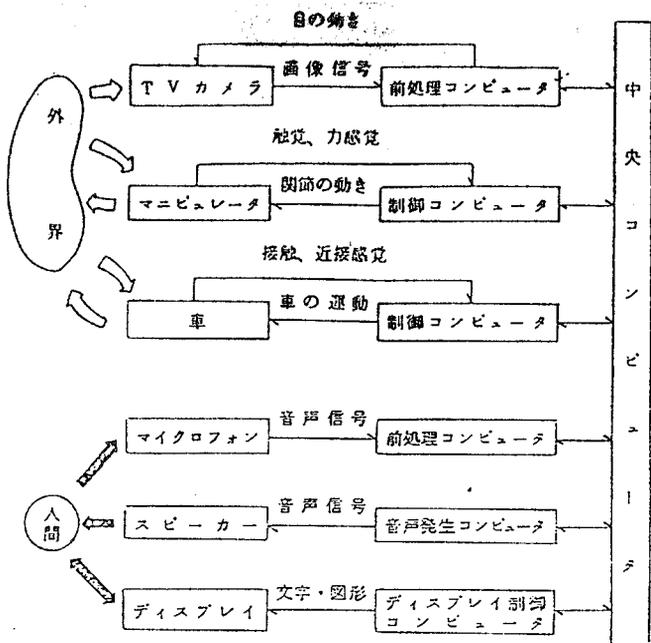


図1・2・2 ロボットのハードウェア構成例

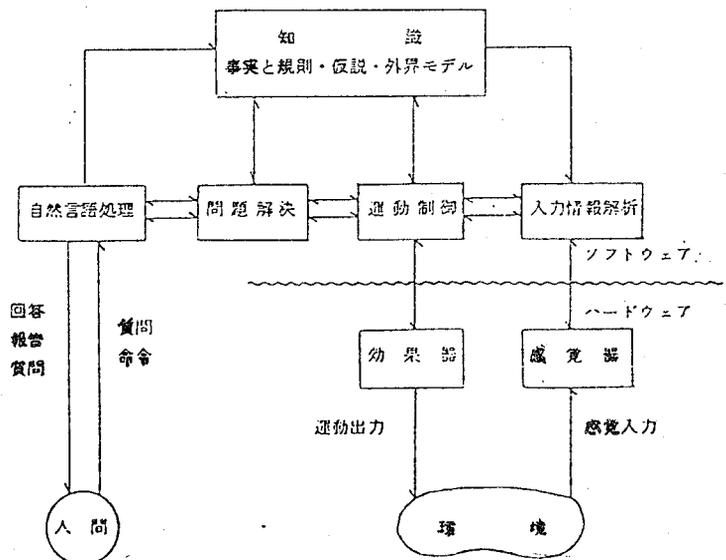


図1・2・3 知能ロボットのソフトウェア構成

求される。したがって、このシステムでは高いフレキシブルティを持った産業用ロボットの使用が必要不可欠である。このような産業用ロボットは必然的に前述の人工知能ロボットにならざるを得ない。

本節で述べる高度自動化機械は、その定義によれば、その頭脳にあたる部分は前述の人工知能そのものであり、各種の作業を行う面では産業用ロボットの延長線上にある知能ロボットと言えるであろう。このような高度自動化機械が、各種の生産現場のみならず、農林水産業やサービス業等の産業分野にも適応可能なものとするためには、現在言われている“知能ロボット”を越えた“人工知能ロボット”となる必要があろう。

高度自動化機械は上述のようにきわめて多岐にわたる作業を要求されているので、当然ながらその形態はその適用箇所によって異ってくるが、その本質的機械は変わらない。したがって、この機械的な共通部分を高度自動化機械として抽出すればその要求仕様はかなり明確なものとなる。すなわち高度自動化機械とは、各作業毎のアタッチメントによって、何でもやりこなす汎用性を持ったベースマシンと考えることができる。

翻って、高度自動化機械の定義からその要求仕様を眺めると、高速度や高精度という項目を除くと、それはほとんど“人間”によって具現化されるものである。したがって、高度自動化機械というものは、機能的には実は前述の夢物語で述べたチャペルの“ロボット”SFに登場する“人間型ロボット”そのものといえることができる。

## 2. 高度自動機械のニーズ

### 2-1 高度自動化機械が求められる背景

#### 2-1-1 労働力需給と生産性の向上の必要性

わが国の人口は戦後高い伸びを示したが、近年出生率の低下によって増加率が年々低下の傾向を示している。年平均の増加率は、1980年代の1.2%に対し、90年代が0.5%で2000年以後はマイナスに転ずるという予測が行われている（表2・1・1）。労働力人口の動きも長期的には総人口の動きに連動しており、今後徐々に増加率が低下する。表2・1・2に示すようにわが国の労働力人口は1960年の4,511万人から1980年に5,650万人へ増加したが、今後は増加率を低下させながら1990年に6,350万人、2000年に6,663万人に達すると予測されている。増加率では、80年代が1.2%でやや高いが90年以後再び低下する。

以上のようにわが国の労働力人口は今後長期的に伸びが鈍化に行くことが予想されるが、更にこれを構成する労働力の質的にも大きい変化が予想される。即ち、労働力人口の中で出生率の低下を反映して若年労働者の割合が低下し、高令者層のウェイトが高まることである。表2・1・2に示されるように、労働力人口に占める15～44才台の比率は1980年の63%から2000年に53%へと低下する。特に同年令層の男子については、1980年から2000年にかけて絶対数で減少する。これに対し60才以上の高令者層の比率は9%から14%へと高まることが予測されている。

つぎに、労働力の需給をミクロ・レベルでみてみよう。表2・1・3はわが国の産業界における技能労働者の不足数の推移を企業規模、産業別に示したものである。表に示されるように、近年低成長経済が定着するなかで、依然として技能労働力が不足していることがわかる。1980年（昭和55年）の不足総数は約84万人にのぼるが、不足の状況は絶対数、不足率の両面で過去5年間悪化している。不足率と不足数を細部についてみると小規模企業および建設、製造業などの産業で高くなっている。これらのデータは、工場や建設現場、特に中小企業の現場のように作業環境が相対的に悪い現場では、労働力需給が全体的に緩和するなかでもなお不足することを示している。この背景には、高学歴化や人口の高令化と共に、所得上昇に伴う価値観やライフ・スタイルの変化がある。したがって、労働力需給の伸びが長期的に鈍化するなかで、技能労働者の不足は更に深刻化することが予想される。

労働力供給の問題は、わが国の今後の長期経済成長を考える場合に潜在成長力を決定する重要な要因である。この視点からみて、上に述べた労働力供給の伸びと労働力の質の変化は、今後のわが国の成長力維持の制約要因となるものであり、これを克服するために技術革新による生産性向上の対応が必要であるといえよう。

わが国は高度成長時代に大量生産型のオートメーションを軸にきわめて高い経済成長を達成して来たが、このアプローチは既に限界に達しており、今後は従来と変った方向を目指す必要がある。

#### 2-1-2 労働安全と労働災害のコスト

労働災害の防止や職業性疾病の防止、悪環境作業、苛酷労働からの人間の解放ということは人間の基本的な欲求の一つであるが、近年所得上昇や価値観の変化により要求水準が高まる傾向をみせている。前項で述べた技能労働者の不足も基本的にはこの傾向を裏付けるものといえよう。労働災害の実体を示すデータとして表2・1・4に休業4日以上災害発生状況を示している。表に示されるように死亡事故だけについてみると近年やや減少の傾向にあるが、傷害を含む全体の数は横ばいに推移している。表2・1・5は労働災害による労働損失日数の推移を示したものである。労働災害による損失日数は、昭和50年までかなり高い改善率を示したが、昭和50年代に入り改善のスピードは年平均2%強の改善で緩慢なものになって来ている。このことは、労賃の上昇が年率7%前後で上昇していることや医療費の上昇などを考慮に入れると労働災害による損失がきわめて大きいものであり、急速に上昇していることをうかがわせる。労働災害の未然防止など労働福祉の向上は、経済問題とは切り離しても改善をはからなければならない課題であるが、改善の成果としては、経済的な損失をなくす上できわめて大きいものがある。

労働福祉の向上をはかる方策としては多様なアプローチが必要と考えられるが、もっとも基本的な方策の一つは、危険、苛酷作業や悪環境作業を機械化することにより人間をこれらの仕事から解放することである。実際、ロボットの技術開発ニーズ調査等でこの種の課題は高い要求水準を維持している。本調査で実施したアンケート調査でも高度自動化機械の開発課題の中で、悪環境・危険作業の自動化に関する課題がもっとも高い出現頻度を示している。これらの悪環境作業の自動化は、技術的に難しい課題であるが、これを達成することには、労働の向上と経済的損失をカバーする上からもきわめて重要な課題であるといえる。

表2・1・1 将来人口推計(単位千人、%、▲はマイナス)

	1980年	1990年	2000年	2010年	2020年	2030年	2040年	2050年
〈実数〉								
0-14歳	27,546	23,327	21,180	22,240	19,402	17,598	17,865	15,960
15-64歳	78,790	86,325	86,880	82,942	78,343	75,747	69,578	64,465
65歳以上	10,580	14,609	21,174	26,964	31,029	29,479	29,590	28,872
総数	116,916	124,261	129,234	132,116	128,774	122,814	116,033	109,297
〈構成比〉								
0-14歳	23.6	18.8	16.4	16.8	15.1	14.3	15.4	14.6
15-64歳	67.4	69.5	67.2	62.8	60.8	61.7	59.1	58.0
65歳以上	9.1	11.8	16.4	20.4	24.1	24.0	25.5	26.4
〈年平均伸び率〉								
	1980-1990年	1990-2000年	2000-2010年	2010-2020年	2020-2030年	2030-2040年	2040-2050年	
0-14歳	▲ 1.6	▲ 1.0	0.5	▲ 1.3	▲ 1.0	0.2	▲ 1.1	
15-64歳	0.9	0.1	▲ 0.5	▲ 0.6	▲ 0.3	▲ 1.0	▲ 0.6	
65歳以上	3.3	3.8	2.4	1.4	▲ 0.5	0.0	▲ 0.2	
総数	1.1	0.4	0.2	▲ 0.3	▲ 0.5	▲ 0.6	▲ 0.6	

(資料) 総務府統計局「国勢調査報告」

.....労働力人口.....増減数.....

	1960年	1970年	1980年	1990年	2000年	60-70	70-80	80-90	90-00
				(予測)	(予測)			(予測)	(予測)
男女計									
15-44歳	3,101	3,582	3,531	3,649	3,500	481	▲51	118	▲149
	(68.7)	(69.5)	(62.5)	(57.5)	(52.5)	(1.5)	(▲0.1)	(0.3)	(▲0.4)
45-59	996	1,117	1,591	1,984	2,247	121	474	393	263
	(22.1)	(21.7)	(28.2)	(31.2)	(33.7)	(1.2)	(3.6)	(2.2)	(1.3)
60~	419	453	527	717	915	34	74	190	198
	(9.3)	(8.8)	(9.3)	(11.3)	(13.7)	(0.8)	(1.5)	(3.1)	(2.5)
計	4,511	5,153	5,650	6,350	6,663	642	497	700	313
						(1.3)	(0.9)	(1.2)	(0.5)

(注) 労働力人口のカッコ内は、それぞれの計に対する構成比、増減数のカッコは年平均増減率  
(資料) 総務府統計局「労働力調査報告」

表2・1・2 年齢3区分労働人口の推移(単位万人、カッコ内は% ▲は減)

(単位・千人、%)

規不業・産業	昭和40年	45年	50年	51年	52年	53年	54年	55年
合計	1,797 (21.7)	1,837 (19.8)	779 (8.0)	794 (8.4)	779 (8.3)	629 (6.7)	816 (8.8)	837 (9.0)
現 業	従業員500人以上	208 (10.8)	149 (6.0)	17 (0.8)	21 (1.1)	13 (0.6)	10 (0.5)	15 (0.8)
	100~499人	413 (17.9)	371 (15.2)	78 (3.6)	69 (3.5)	70 (3.4)	50 (2.6)	70 (3.4)
	30~99人	515 (25.9)	473 (22.7)	177 (8.3)	168 (8.2)	175 (8.4)	128 (6.4)	186 (9.0)
	5~29人	662 (33.6)	844 (37.0)	507 (15.3)	535 (15.6)	520 (16.7)	441 (12.3)	545 (16.6)
産 業	鉱業	24 (11.3)	14 (8.7)	5 (4.6)	4 (3.8)	5 (5.0)	5 (5.6)	6 (6.3)
	建設業	226 (30.6)	329 (31.7)	171 (11.3)	198 (12.9)	199 (13.3)	225 (13.9)	258 (17.7)
	製造業	1,379 (22.0)	1,294 (19.0)	506 (7.6)	510 (8.0)	484 (7.7)	332 (5.5)	447 (7.3)
	運輸通信業	120 (14.3)	124 (12.1)	64 (5.7)	49 (4.6)	66 (5.9)	49 (3.6)	73 (5.9)
	電気・ガス・ 水道・気供給業	2 (3.7)	2 (3.0)	1 (1.7)	1 (1.2)	1 (0.9)	0 (0.5)	1 (0.8)
	自動車整備業	46 (31.3)	75 (35.4)	32 (11.8)	34 (13.3)	25 (9.0)	18 (5.8)	32 (11.4)
	業							7 (7.8)

資料出所 労働省「技能労働者実態調査」(各年6月、ただし40年については2月現在)  
(注) 1) ( )は不足率を示す。

2) 不足率 =  $\frac{\text{不足数}}{\text{調査時点の技能労働者数}} \times 100$

表2・1・3 技能労働者の不足数

### 2-1-3 社会資本のメンテナンス・コスト

わが国では戦後の復興期とこれに続く高度成長期を通じて道路、港湾、やその他の公共施設等の社会資本ストックが急速に増大して来た。近年安定成長期への移行により、新規投資のスピードはややスローダウンしてはいるものの、ストックの増加と投資後の時間的な経過によりこれらの社会資本の維持補修等のいわゆるメンテナンスコストが急激に増大しつつある。今後仮りに新規投資が非常に低い水準に押えられたとしてもストックの増加は続くことになり、時間的経過とともにそのメンテナンスコストは加速的に上昇することが予想される。

最近公共部門においては財政赤字の大巾化等とも関連して経費の削減が重要な課題となっている。特に、社会資本のメンテナンス・コストの高騰を放置した場合、今後新規投資が制約される可能性がある。このような背景から、社会資本のメンテナンスを効率的に行う手段が強く求められている。今後社会資本の一層の充実をはかり高度の社会を実現するためには、いわば後向きの投資であるメンテナンス・コストを押さえることが重要な課題となる。

社会資本のメンテナンスコストのなかで大きいウェイトを占めるのは人件費であるが、この部分を効率化するためには、人間の機能に近いかなり高度の自動化システムの開発が必要である。

### 2-1-4 先端的技術分野のニーズ

わが国の技術開発は、戦後先進諸国の技術水準へのキャッチアップを目標に進められてきたが、この過程を終了した現在、わが国独自の技術開発を進め技術立国を果すことが新たな目標となっている。この目標に沿って今後技術開発を進める上での重点は、技術集約度が高く波及効果の大きい先端技術を育成強化して行くことであり、その中核となる先端技術を積極的に開発することである。

高度自動化機械は、高度のメカトロニクス・システムであり、それ自体が先端産業の中核である。しかし、他方高度自動化機械は他の先端技術の開発の手段としてもきわめて重要な役割を担っている。1960年以後、コンピュータの発達は計算や情報処理を効率化させることにより科学技術の発達を加速化させて来た。今後は高度のマテリアルハンドリング機能と感覚や知能を組み合わせたメカトロニクスの高度自動化機械によって科学技術の進歩を加速化する時代に入ったと考えられる。事実、先端技術分野ではこの種のニーズが強く、高度自動化機械の利用が不可欠の手段となる場合が多い。

宇宙と海洋開発はわが国が今後積極的に発展させる必要がある先端産業分野の典型的な例であるが、これらの分野においては人間が直接的に活動できない特殊な環境を利用するため高度の自動化機械が多種必要である。原子力分野の活動も放射能被爆の危険性のため人間の直接的活動が制的される。このために、計測、検査、維持・補修など多様な作業のために高度の自動化機械が必要とされる。

エレクトロニクスの分野では、主として部品の加工・組立のために高度のニーズが発生している。超LSIの製造工程では従来からクリーン・ルームと自動組立て技術が使われて来たが、集積度を更に向上させるためには更にクリーン度を上げるために完全無人化のアプローチが要求されており、高度自動化機械の開発の必要にせまられている。また、今後展開が期待されるオプトエレクトロニクス分野に於ては、微細な光ファイバーなどの部品の組立・加工等に超高精度の自動化機械が要求されている。

以上あげた例は、いずれも人間の限界を超えた環境や精度が要求されるため開発を進める上で高度の自動化機械が必要不可欠の手段となっている。最先端の技術開発では、この他にも超高圧、超低温など特殊環境を必要とする場合はきわめて多く、高度自動化機械を必要とするケースが多い。今後わが国の技術開発を先端部門へ積極的に展開させて行くための手段として高度自動化機械の役割はきわめて大きいものといえよう。

### 2-2 高度自動化機械のニーズ分析

ここではアンケート調査の集計結果をもとにロボットシステム別および産業別に行ったニーズ分析結果について述べる。

アンケート調査でロボット化課題を複数提案している回答はそれぞれ1件として加算して総数407件が回収された。そのうち製造業以外が244件の6割を、製造業関連では163件で4割となっている。

表2・1・4 産業別死亡者災害発生状況(休業4日以上) 表2・1・5 産業大・中分類別労働災害強度率の推移(規模100人以上)

年別 産業別	(単位 人)				
	昭和51年	52年	53年	54年	55年
全産業	333,311 (3,345)	345,293 (3,302)	348,826 (3,326)	340,731 (3,077)	335,706 (3,009)
製造業	118,723 (669)	118,038 (709)	113,159 (650)	108,234 (594)	106,481 (589)
鉱業	9,121 (170)	9,771 (180)	9,613 (135)	9,043 (149)	8,477 (105)
建設業	103,683 (1,451)	111,026 (1,464)	118,568 (1,583)	116,487 (1,404)	112,786 (1,374)
交通運輸業	4,812 (81)	5,025 (72)	4,865 (41)	4,569 (43)	4,626 (52)
陸上貨物取扱業	23,401 (290)	23,447 (272)	23,521 (262)	22,632 (288)	21,807 (261)
港湾荷役業	6,518 (53)	5,833 (49)	4,787 (41)	4,365 (60)	4,103 (55)
林業	12,689 (136)	13,293 (131)	13,040 (135)	12,654 (115)	12,490 (117)
その他	54,364 (495)	58,860 (425)	61,273 (479)	62,747 (424)	64,931 (456)

資料出所 労働省「労災保険給付データ集」  
(注) ( )内は死亡者数。

産業	昭和45年	51年	52年	53年	54年	55年
計	0.88	0.36	0.42	0.35	0.36	0.32
林業	1.70	1.34	1.56	1.28	1.45	0.82
鉱業	7.22	3.44	4.95	2.99	4.37	2.58
建設業	2.13	0.57	1.26	0.64	0.37	0.64
製造業	0.66	0.28	0.33	0.30	0.29	0.27
食料品・酒類	0.61	0.32	0.32	0.28	0.28	0.45
繊維	0.42	0.28	0.23	0.25	0.19	0.30
衣服	0.34	0.08	0.13	0.06	0.04	0.05
木材	1.60	0.99	1.17	1.28	1.04	1.08
家具	1.08	0.74	0.83	0.57	0.41	0.41
パルプ・紙	1.22	0.43	0.52	0.69	0.54	0.41
出版・印刷	0.40	0.18	0.28	0.35	0.17	0.13
化学	0.59	0.22	0.32	0.20	0.21	0.38
石油・石炭	0.66	0.40	0.24	0.15	0.14	0.19
ゴム	0.59	0.19	0.25	0.31	0.27	0.36
プラスチック	0.70	0.28	0.11	0.11	0.56	0.49
窯業・土石	0.95	0.53	0.67	0.37	0.51	0.64
鉄・鋼	1.40	0.36	0.60	0.52	0.49	0.38
非鉄金属	0.90	0.39	0.38	0.34	0.25	0.23
金属製品	1.13	0.32	0.51	0.47	0.35	0.42
一般機械	0.56	0.31	0.27	0.33	0.32	0.17
電気機器	0.24	0.08	0.15	0.11	0.15	0.07
輸送用機器	0.81	0.33	0.36	0.31	0.34	0.26
精密機器	0.25	0.07	0.08	0.07	0.06	0.12
その他	0.36	0.30	0.23	0.27	0.31	0.23
運輸・通信業	0.96	0.41	0.42	0.34	0.34	0.34
電気・ガス	0.56	0.11	0.19	0.37	0.19	0.13
水道・電気・ガス業	0.75	0.35	0.31	0.41	0.29	0.29
サービス業						(0.29)

資料出所 労働省「労働災害動向調査」  
(注) 強度率とは、1,000名労働者当たり労働災害の死亡による労働者失日数

### 2-2-1 システム別にみたニーズ

アンケート調査では5種類のロボットシステムに類型化して回答を求めたが回収されたロボット化課題の内容から判断して更に3種類を追加して分類し整理した。次にそれらの8種類のロボットシステムを示す。

- 1) 組立作業自動化システム
- 2) 悪環境作業自動化システム
- 3) 介助作業自動化システム
- 4) 保全作業自動化システム
- 5) 危険作業自動化システム
- 6) 検査作業自動化システム
- 7) 搬送作業自動化システム

なお、各課題の上記各システムへの分類はアンケート回答者の主観や分析者の主観がある程度入るのはやむを得ないであろう。

以下に各システム別にアンケート調査によるニーズの内容と分布状況、必要理由、必要時期、価格およびニーズ面から必要とされる要素技術について述べる。

#### (1) ニーズの内容と分布

アンケート調査によるロボットシステム別のニーズ分布を表2・2・1に示す。悪環境作業が32.2%で最大であり、次に組立作業が20.9%となり他はほぼ10%前後で大差はない。悪環境、危険、保全は課題内容に多くの共通要素がありこれを合わせると過半数を占める。これに比べると製造業に関連の深い組立、検査、搬送合わせて約35%と意外に少ないが、これはここでも前述したとおりアンケートのサンプルのバイアスが影響しているものと考えられる。

各ロボットシステム別の利用分野でのニーズ分布を表2・2・2～表2・2・9に示す。

#### 1). 組立作業

ここでは精密組立と重量物組立作業での高度自動化機械のニーズが高い。

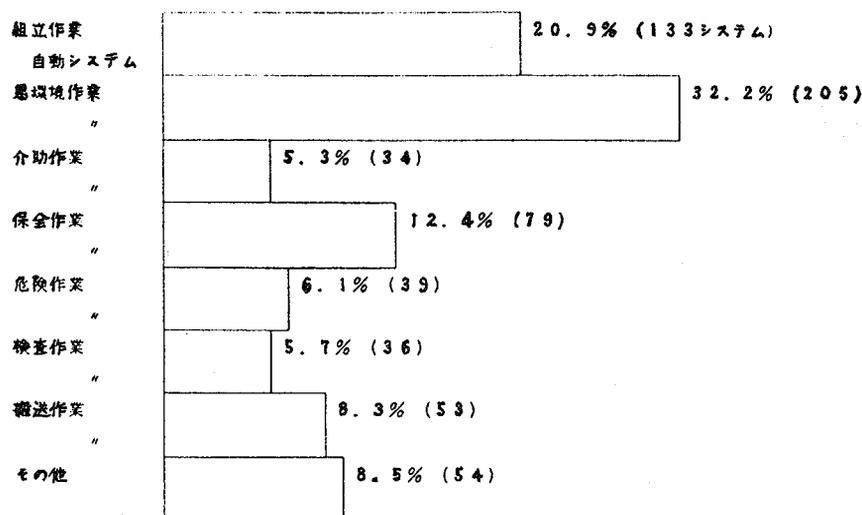
精密組立はICの組立、精密小型モータの組立、ブラウン管電子銃の組立、ベアリングの組立、プリント板への電子部品の取付、家電製品の総組立、自動車組立があげられている。更に最近では光通信デバイス組立でのニーズも増している。送受光デバイスと光ファイバの接続組立、光コネクタの加工、組立作業は、最近

光路径が数ミクロンのシングルモードファイバの実用化が迫られるにつれ人手の能力を越えたものとなりつつある。また、精密組立では単一部品の組立だけでなく一つの部品を規制状態に保ったまま他の部品を組付ける複合作業を行う高度なもののニーズもある。

重量物組立では建設現場における鉄骨建材の組付け、空調機の大型電気機械が具体例として出ている。ケーブル類、水道管、ガス管の配管作業のニーズが高い。重量物を扱う作業、広域作業、危険作業という点から人間にかわる高度自動化機械を必要とする点で次の悪環境作業、危険作業との重複が多い。

ニーズの分布は表2・2・2に示すように電気機械器具、精密機械に極めてニーズが高い。

表2・2・1 ロボットシステムのニーズ分布  
(総計637システム)



(注1) ロボットシステムの利用分野をマルチで回答しているため回答数よりかなり多くなっている。

## 2). 悪環境作業

悪環境作業を高度自動化機械で置きかえたいというニーズは極めて高い。数多くの具体例が出されている。悪環境には心理的なものもあるが物理的環境から人間を開放したいというニーズが圧倒的である。すなわち悪臭、有毒ガス、高温、高圧、汚物環境下での作業、海中、水中、波高の高い海面環境、高所環境、山地、急斜面、積雪環境、放射能汚染環境、海底、宇宙の未踏空間環境、トンネル内、鉄道内環境からの解放である。

環境に関連した具体例として半導体製造プロセスにおける超清浄環境下での作業ニーズも潜在的に大きいと思われる。例えば256Kメモリの生産プロセスでは1ft<sup>3</sup>当たり0.1ミクロンサイズのゴミが1ヶ程度の清浄度が必要とされてくる。ゴミの発生の主要因である作業者の削減と高価な設備の24H連続運用のため作業者に代る高度な判断機能をもった自動化機械が必要となってくる。

利用分野別にみたニーズ分布は表2・2・3に示すように非製造業に多く、原子力関連が最数になっている。

## 3). 介助作業

調査結果では医療福祉分野と事故、そう難の介助の2つの分野でニーズが高い。前者は四肢マヒ患者の移動補助、看護婦機能のサポート機能などに具体例が見られる。後者は火災事故、海上水上事故、地震埋没事故、トンネル、鉱山事故における被災者の誘導や援助、救助活動の介助作業などである。

高令化、老令化の傾向と都市化、過密化、陸海上ともの交通過密化、資源欠乏などの背景から潜在的ニーズは大きいとみられるが技術的アプローチが難しい分野であり、特に事故現場の不整地におけるフレキシブルな移動機能が多くの技術的課題のうち重要な一つであると思われる。

当然ながら、医療福祉面でのニーズが最大である。

表 2・2・2 ロボットシステムの産業別ニーズ分布  
組立作業自動化ロボットシステム(総計133システム  
数字：%)

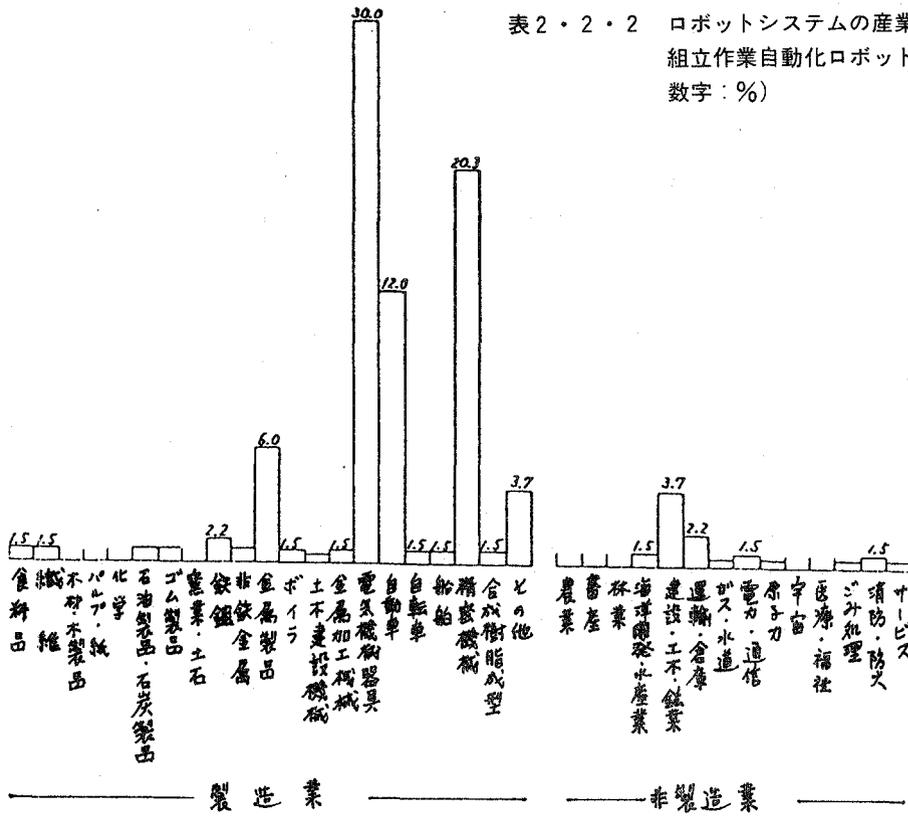


表 2・2・3 ロボットシステムの産業別ニーズ分布  
悪環境作業自動システム(総計205システム 数  
字：%)

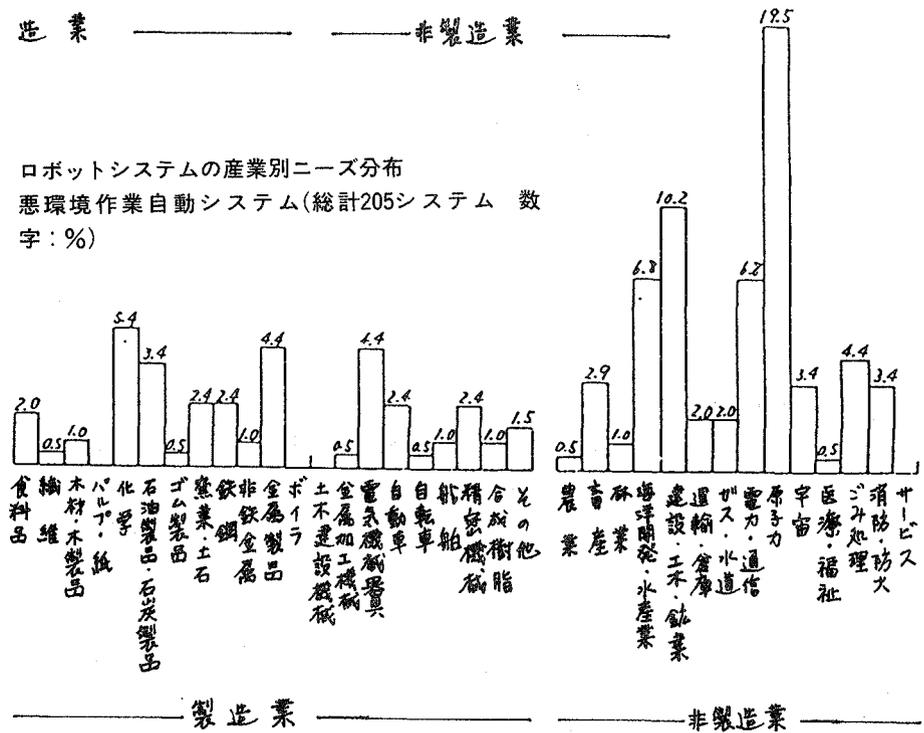


表 2・2・4 ロボットシステムの産業別ニーズ分布  
介助作業自動化システム(総数34システム 数  
字：%)

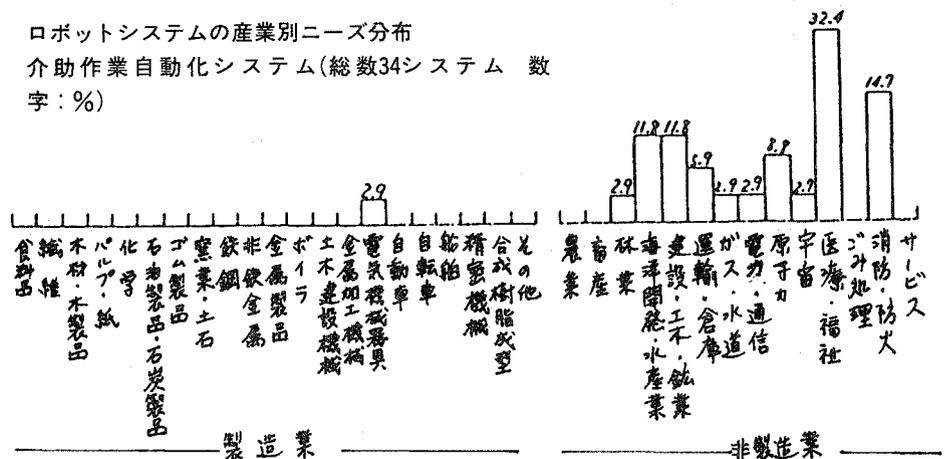


表2・2・5 ロボットシステムの産業別のニーズ分布  
 保全作業自動化システム(総数79システム 数字:%)

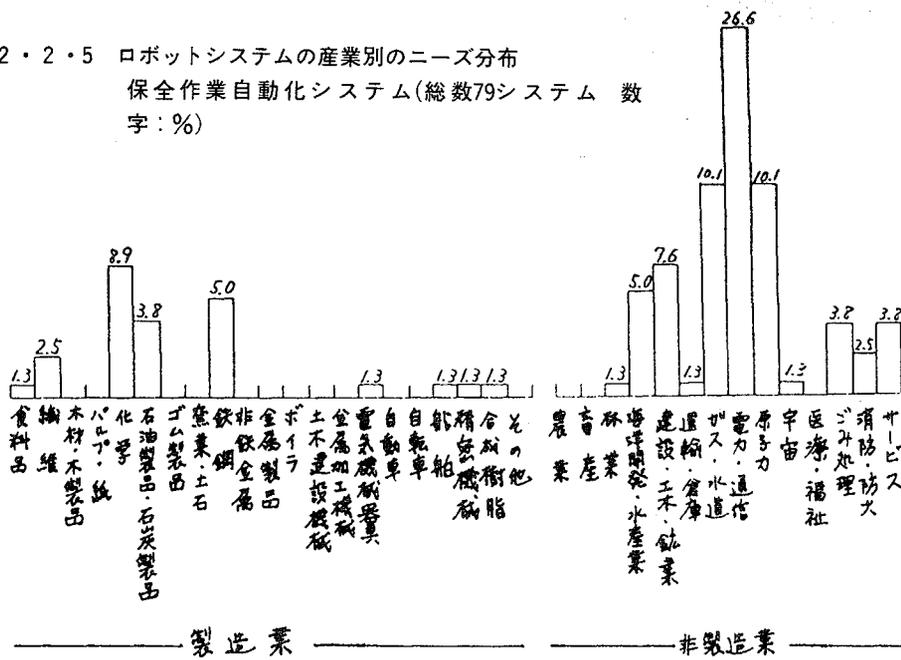


表2・2・6 ロボットシステム産業別ニーズ分布  
 危険作業自動化システム(総数39システム 数字:%)

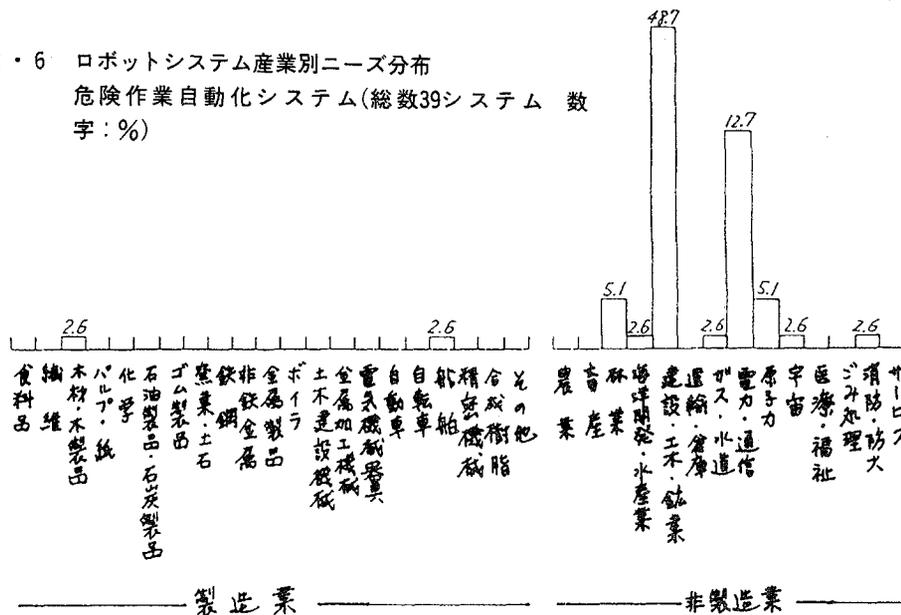


表2・2・7 ロボットシステムの産業別ニーズ分布  
 検査作業自動化システム(総数36システム 数字:%)

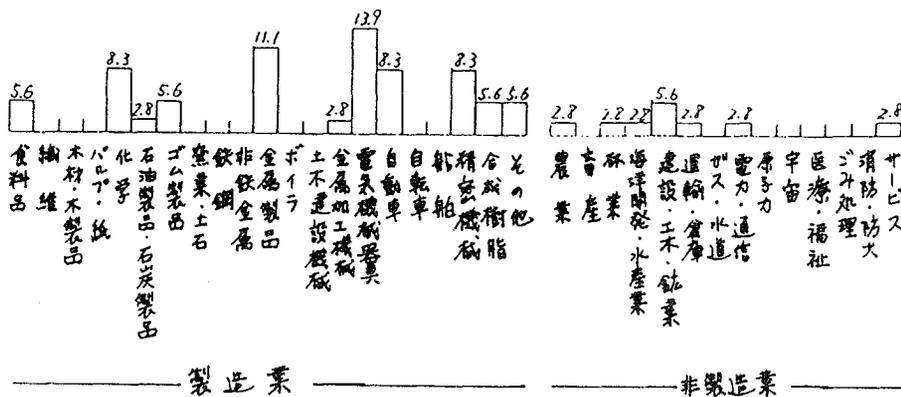


表2・2・8 ロボットシステムの産業別ニーズ分布  
 船送作業自動化システム(総数53システム 数字：%)

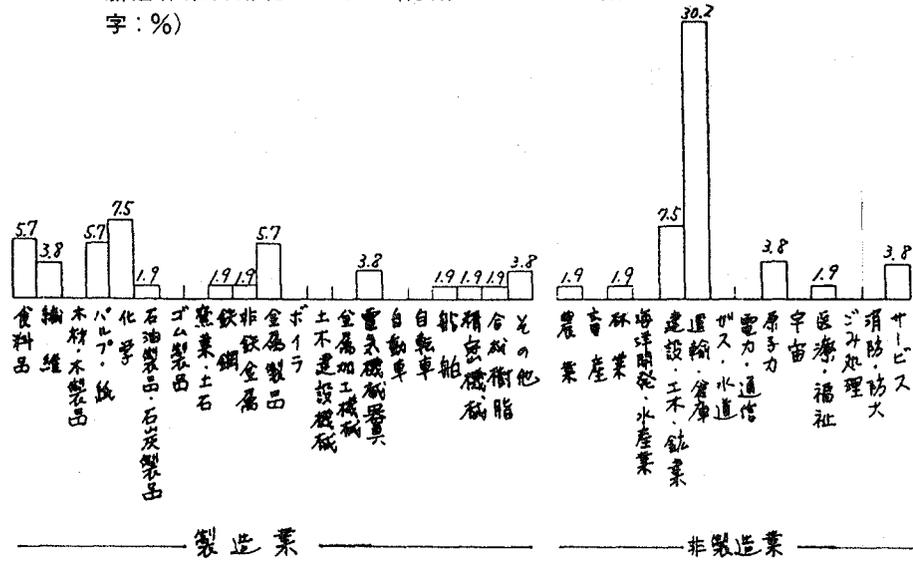
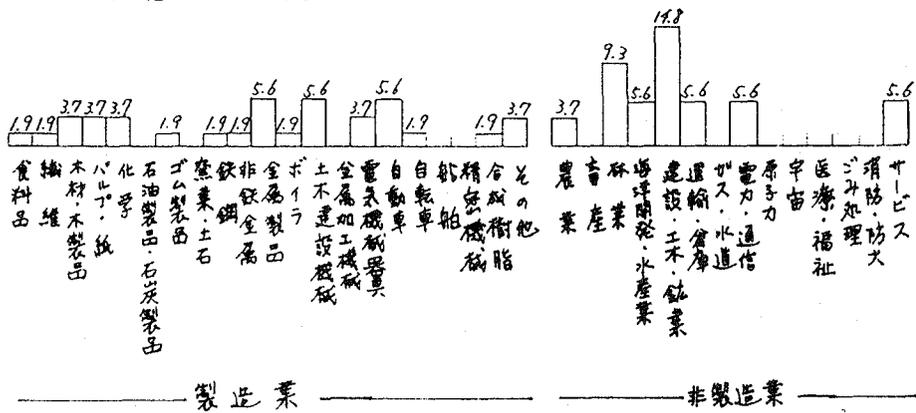


表2・2・9 ロボットシステムの産業別ニーズ分布  
 その他のシステム(総数54システム 数字：%)



#### 4). 保全作業

パトロールによる点検、修理、および定期保全などの作業がこの分野の作業内容である。

点検作業は対象の表面検査という観点から見て目の移動という要素が強く、又内部検査のための超音波探傷の点から移動、発音動作、聴覚による異常音検出という要素でとらえることができる。目の機能は検査選別作業における欠陥検査の目的に要求されるものと殆ど共通であり、キズ、割れ、汚れ等の欠陥の未然発見と事故防止が大きな目的である。

具体的ニーズとして、まず対象は水道、ガス、各種ケーブルの埋設配管、架設物、石油、ガス等の貯蔵タンク、タンカー、化学反応炉が上げられており、それらの点検修理と清掃作業に対するニーズが大きい。他の対象は原子力プラントであり、点検を大きな目的としている。保全作業としては定期注油、再塗装等の防錆、清掃、トロリー線張替などで鉄塔、ロープ、製鉄所の配管架台、クレーン等の設備、水道管、ビル内の照明器具などが対象として上げられている。

これらのニーズの背景は点検等、この分野の作業又は作業対象が一つは広域にまたがることである。広域は水平・垂直両方の広がりという意味しており、点検作業における人間の足と目による走査が大変で重労働であること、点検の精度、点検の品質として問題が残ること、精度と品質を保つには多くの作業者と長時間を必要とするなどによりニーズが発生していると思われる。

又点検回数を高くし、昼夜における常時点検という要求も強いと想像される。

もう一点の背景は悪環境作業と強く関連し、保全作業の環境が物理的に人間に入り込めない狭い場所、危険性のある場所が多いことにもとづいている。

以上よりこの作業を行う高度自動化機械は点検における欠陥発見のための視覚を中心とした感覚認識機構が重要な要素技術であり、これに又上記保全作業における対象の認識、及び対象まで移動するためのルート探索としても欠くことの出来ない技術である。他方の重要要素技術は移動機能である。屋内、屋外の対象に到着するまでの移動として、悪路、階段昇降、壁面、登戸に対するフレキシブルな移動機構、対象到着後の大きな対象物に対する広域全面スキャン機構、狭い場所への感覚機構の挿入とスキャンなど多くの機能が必要であり、これらを兼ね備えた高度自動化機械がこの作業には不可欠である。

ニーズは、電力、通信関連が最大で次にガス、水道および原子力、化学とつづいている。

#### 5). 危険作業

高層ビル建築作業等の高所作業および高電圧や火薬類を取扱う作業が主なものであり、前者では、足場の組立、解体、鉄骨のボルト締め、リベット打ち、塗装等がある。後者では、送電線の取付けおよび保守、変発電所での保守や鉱物資源採掘現場でのダイナマイト作業がある。

ニーズの分布は、建築土木鉱業と電力通信に集中している。

#### 6). 検査作業

この作業分野は製造業を中心とした製品の不良や欠陥を発見するための検査とその修正、及び検査結果に応じて品質のランク付けを行う選別作業と、製造・非製造両方にまたがり、扱う対象物の実態を識別・認識して、照合、仕訳、選別などを行なう作業に該当している。調査結果では目視による欠陥検査、照合、仕訳の作業範時に入るニーズが多い。

製品の品質維持、向上が検査作業に多く頼っていることは明らかであるが、この作業を効率よく進めることが大変困難になって来ている。例えばLSIや光通信デバイス等の先端技術ではサブミクロンの微細なプロセスにともなう超微細な欠陥を発見せねばならないが、顕微鏡を使用しての熟練した目視作業に頼っており、多くの作業者をこの工程に抱え込んでいる。作業者に与える苦痛と負担と共に、無人化を目指すFA推進の上での大きな障害になっている作業である。LSIの組立ラインの例でも全作業者の40%が何らかの検査やチェック作業に従事していることからこの事情がうかがえる。一つには設備の高度な自動化により不良品を短時間のうちに大量につくってしまう危険性が増え、一連の工程中の随所にこの検査、チェック工程を置く傾向に原因すると考えられる。

具体的なニーズとして、IC、半導体ウェハー、自動車部品、腕時計、プラスチック成型品、塗装表面の検査が上げられており、この多くの作業による目視作業を高度自動化機械で置きかえないというニーズは潜在的に非常に高いとみられる。

欠陥検査は要素技術として超音波探傷の例もあるが視覚を中心とした認識機構がベースであり、ピンホール、シミ、汚れ、異物混入、形状変化、シワ、割れ、色変化、色むらなど多様な欠陥を、一つには広い視野の中からの微細な欠陥の検出という点と、もう一つは信号と雑音の区別が判定しがたい微妙な欠陥が多いという点の二つの技術的要点があり高分解能の視覚センサデバイス、大量の画像データの高速処理、多階調識別、色識別などの技術開発が必要である。

又農産物における選果、摘果作業や生鮮食料品の鮮度判定、木材の伐採時の選別などのニーズ例に対しても上記技術が必要である

一方対象物の識別、認識作業は運輸、倉庫、荷役関連にニーズがあり、荷物、車両、トラックなどの対象物に取り付けた文字やコードにより種類を識別し照合、仕分け、整理の各作業に高度自動化機械を使用する要求がある。

#### 7). 搬送作業

この作業は、製造業においては加工、組立検査の各作業の間をつなぐもので、自動機械への製品の供給と取出しや自動倉庫からのオーダピッキング等がある。また、非製造業では、トラックへの貨物の積込みと積降し作業のニーズが高い。

搬送の対象物としては、オフィス、ホテル、病院内の郵便物のような軽量なものからビル建築現場の資材、伐採地の木材等の重量物までである。また、後者では、不整地での搬送となり適応性の高い移動機構が必要となる。

また、対象物は不定型の3次元物体であり、保持するためには形状認識が必要であり高度な判断機能を持った自動機械が必要となる。

ニーズは当然ながら、運輸倉庫関連に多く集まっている。

#### (2) 開発を必要とする理由

ロボット化課題がどのような理由で必要か以下の6種類に分類した結果を述べる。

- ① 労働力不足のため
- ② 危険作業 //
- ③ 生産性向上 //
- ④ 品質向上 //
- ⑤ 人間が行うのが不可能 //
- ⑥ その他

ここでは、1つのロボットシステムに対して複数の理由をあげ得るものとして分類した結果を表2・2・10に示す。

全体的には、生産性の向上のためが最も多く産業界の期待が予想通りあらわれている。組立作業では、生産性向上、労働力不足が主になっており、コストダウンへの要望が強い。悪環境作業、危険作業では、当然危険作業のためが大部分である。介助作業では労働力不足が最も多く看護婦不足が今後も続くことを予想しているものと考えられる。検査搬送作業は、生産性向上と労働力不足がほぼ同じ割合であるが、この作業は比較的単調な作業であり、今後の新しい世代の労働者がこのような作業を好まないことを考慮すれば当然のことと思われる。

#### (3) 開発必要時期

ロボットシステムが必要となる時期の調査結果を表2・2・11に示す。

全体的には、5年以内に7割、10年以内に9割を必要としている。

検査、搬送、組立作業等の製造業に関連の多いものは5年以内に7割～9割が必要となっており、高度自動化機械の早期開発が望まれていることを示している。非製造業関連では、悪環境作業が比較的早く必要と考えられている。

#### (4) 実用化の期待価格

高度自動化機械の価格帯に対するニーズは表2・2・12および図2・2・1のようである。これにみられるように5000万円/システム以下の価格が期待されており、アンケートで提案されたシステムの80%が5000万円以下での実現が必要とされる。これらの平均価格は1600万円/システムである。

比較的高いシステムが許容されるシステムは、

- 一 悪環境作業自動化システム
- 一 危険作業自動化システム

などであり、一方、組立、検査システムは低価格が望まれており、同システムの全体の60%が1000万円/システム以内に集中している。

表 2・2・10 ロボットシステムのシステム別必要理由(数字：%)

	労働力	危険作業	生産性	品質	不可能	その他
組立作業自動化システム	24.1	8.0	45.1	17.9	1.2	3.7
巡回検作業	15.5	42.4	20.6	3.8	13.4	4.2
介助作業	33.3	22.2	8.3	8.3	13.9	13.9
保全作業	16.7	26.7	33.3	7.8	11.1	4.4
危険作業	18.5	44.4	24.1	9.3	3.7	0
検査作業	28.2	7.7	33.3	25.6	2.6	2.6
搬送作業	31.5	16.7	40.7	9.3	0	1.9
その他	26.5	20.6	39.7	10.3	1.5	1.5
計	21.4	26.5	31.2	10.1	7.1	3.8

表 2・2・11 ロボットシステムのシステム別必要時期(数字：%)

	3年以内	5年以内	10年以内	10年以上	その他
組立作業自動化システム	34.1	42.7	18.3	3.7	1.2
巡回検作業	37.0	32.6	23.0	6.7	0.7
介助作業	19.0	19.0	47.6	9.5	4.8
保全作業	34.0	30.2	22.6	7.5	5.7
危険作業	23.1	30.8	38.5	7.7	0
検査作業	22.7	68.2	9.1	0	0
搬送作業	36.7	43.3	13.3	0	6.7
その他	36.1	19.4	30.6	8.3	5.6
計	33.4	34.9	23.6	5.7	2.5

表 2・2・12 397システムの価格に対するニーズ

価格帯	システム数
～1000万円	173
1000～5000	139
5000～1億円	41
1億円～3	29
3億円～	15
合計	397

図 2・2・2 ロボットシステムと要素技術

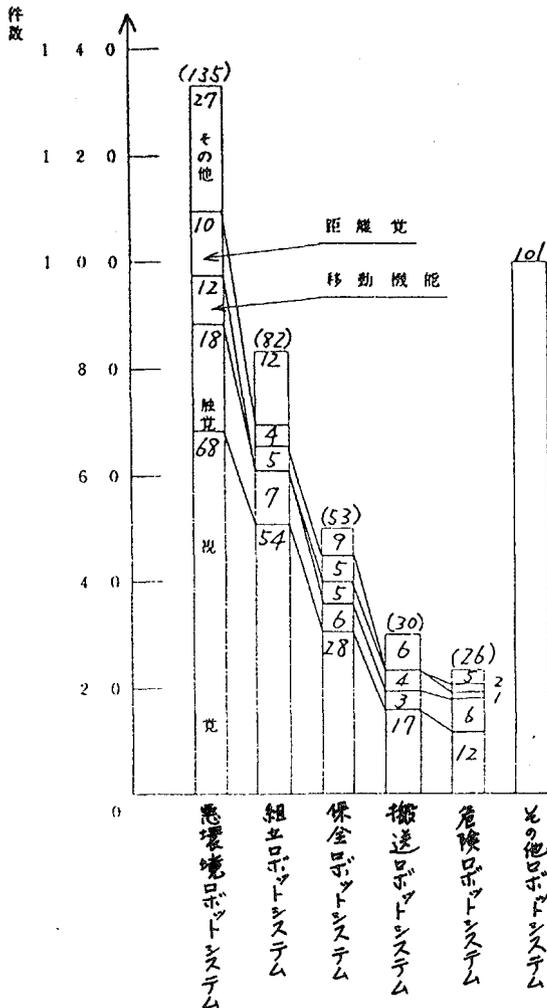
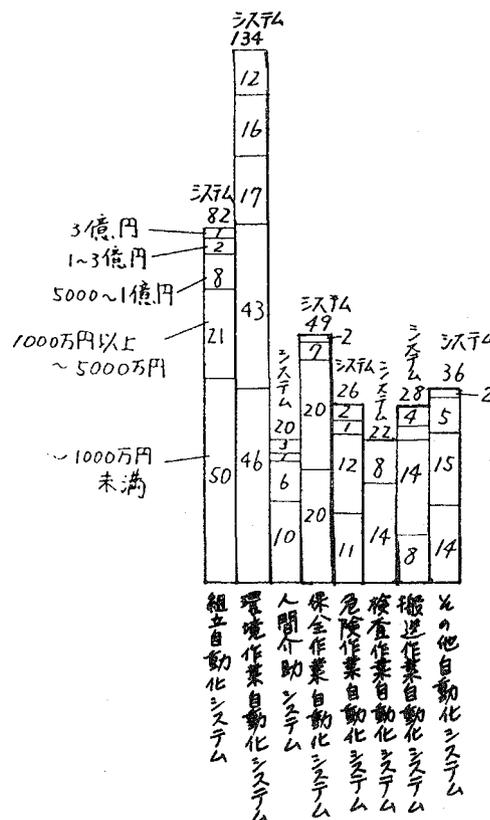


図 2・2・1 高度自動化抵抗システムのシステム価格 (普及への期待価格)合計139システム例



(5) ニーズからみた要求技術

提案された約400の高度自動化システムの主要上位3システムに要求される要素技術は、

- ① 視覚
- ② 触覚
- ③ 移動機能
- ④ 距離覚

で、特に視覚は最も重要である。主要ロボットシステムに要求される要素技術は図2・2・2に示す。

以下上位3システムのシステム別に必要とされる要素技術を述べる。

1) 悪環境作業ロボットシステム

このシステムの対象となる主とした産業別業種は

- ① 原子力
- ② 建設、土木、鉱業
- ③ 電力、通信

である。

これらの業種の特徴は非製造業であり必要な要素技術は、視覚、触覚、移動機能、距離覚である。以下に必要要素技術の概要を述べる。

- ① 視覚
  - 悪環境でも十分使用出来ること。
  - 広い作業範囲をカバーするための広域観察機能が必要である。
  - 不定形対象物が認識できること。
- ② 触覚
  - 荒い仕事に耐えしかも良好な感触が要求される。
  - 危険な対象物を触ることが多いので繊細な感触も要求される。
- ③ 移動機能
  - 三次元的に移動できる機能が要求される。
  - 狭い空間での機動性が要求される。

以上のごとく技術的にも高度のものが要求される。

2) 組立作業ロボットシステム

このシステムの対象となる業種は電気機械器具、自動車、精密機械で製造業中であり作業環境は良好である。ここでは圧倒的に視覚のニーズが高く

- ① 部品の選択
- ② 組立
- ③ 検査

という工程の中で形状、寸法の認識、位置、方向の認識ができる視覚が要求されている。

3) 保全ロボットシステム

このシステムの対象となる業種は電力、通信、ガス、水道、原子力である。これらは非製造業であり、要求される要素技術の順位内容は、1)の悪環境ロボットシステムと変わらないが更に検査機能を増す上で視覚機能に赤外線、X線等の活用や移動機能として空中およびケーブル上の走行が必要である。

2-2-2 産業別にみた高度自動化機械のニーズ

ここでは本調査で行ったアンケート調査のロボット化の課題の集計結果をもとに産業別にニーズについて述べる。

(1) 産業全体でのニーズ

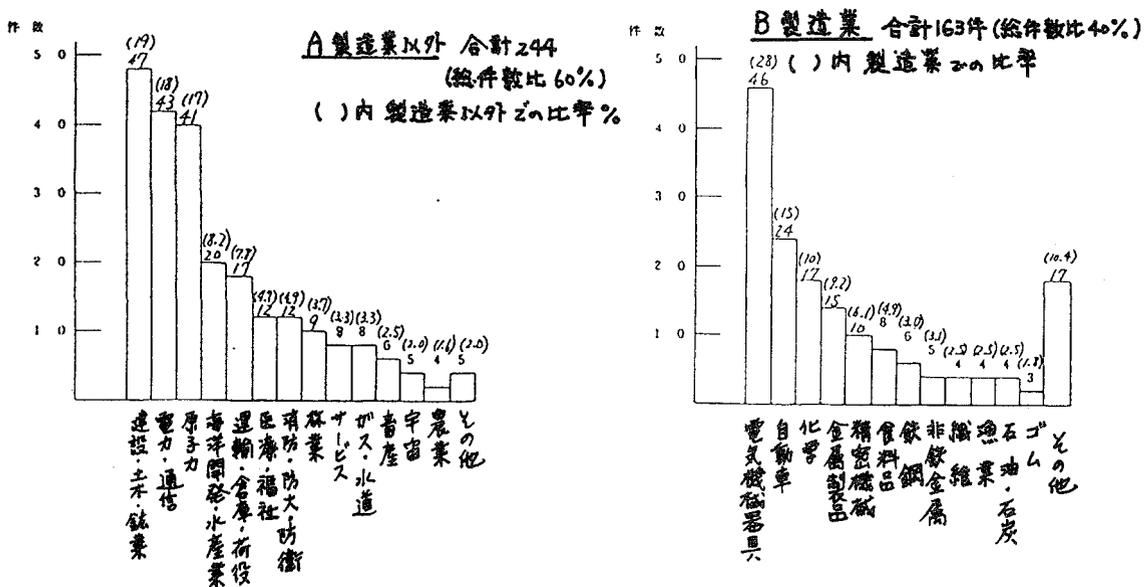
アンケート調査で課題を複数提案している回答は、それぞれを1件として加算して産業別に分類した結果を図2・2・3に示す。総件数407件中製造業以外が244件で6割を、製造業関連では163件で4割を占めている。図2・2・3のAに見られるように製造業以外の分野への導入検討が高まっている傾向が現われており視野の野の広がりとともに、各分野でのニーズが高まっていることが明確になってきた。製造業全体としては、特に電気機械器具製造業と自動車製造業に集中し、この二業種で製造業中の約半数に達している。この分野はすでにロボット化が比較的進み特定のロボット化できずにいた組立作業が主体であり、悪環境作業も対象としているようである。

製造業以外の中では比較的就業人口の多い建設・土木・鉱業分野で19%という高いロボット化ニーズが出ている。これは、作業者の高齢化が進む中で、作業環境が悪い、危険が伴うなどの作業がとり残されているためと考えられる。つぎにニーズの高い分野は電力・通信と原子力とがほぼ同数(18%と17%)で上げられている。この分野では、製造業と異なり悪環境作業への対処、および保全作業に対処するニーズが高い。

製造業以外の14分野のうち、上記の三分野で5割を占め、非常に関心が高い。そして海洋開発・水産業、運輸・倉庫・荷役、医療・福祉と続いている。なお、今回のアンケートでは、宇宙および消防・防火・防衛の分野についてはまだ高くなっていない。

以下にニーズの高い主要な産業について個別に課題を上げて記述する。

図2・2・3 産業別にみた高度自動化機械のニーズ総件数407件



## (2) 製造業でのニーズ

この分野では機械、電気関係を中心に比較的ロボット化が進んでおりニーズは、より高度な作業をおこなう組立、検査、および苦渋作業に多くみられる。これ以外では、化学関係を中心としたメンテナンス用にニーズが高い。

### 1) 電気機械器具

電気機器の組立、および電子機器関係の無塵室内用作業がみられる。

#### ー 精密組立作業用ロボット

リレ、マイクロスイッチ、ノーヒューズしゃ断器などの複雑形状の部品の自動組立が出来る。

#### ー 精密加工用ロボット

半導体用素子製造工程において加工、搬送、検査が出来ること。又無塵室、無菌室でも使用出来ること。

### 2) 自動車製造業

組立、検査を中心にしてニーズがある。

#### ー 組立ロボット

知能（視覚、触覚等）を有し、少量多品種の部品の選択、搬送、組立が行なえること。又、能率向上（高速化）、精度向上、組立後の検査機能を要求される。

#### ー 塗装ロボット

塗装の状態を検査する機能を持つことを要求される。

#### ー 検査ロボット

加工ラインの初めから、最終工程までのあらゆる検査を行なう

### 3) 化学工業

この分野は苦渋、安全面よりメンテナンスを中心としたニーズが多い。

#### ー 清掃用ロボット

タンク、反応塔等の内部の清掃、保修を行なう。

#### ー 高所保修用ロボット

高い所での配管の溶接、ボルト締めを行なう。

#### ー 高圧ボンベ充填用ロボット

### 4) 金属製品製造業

比較的大きな部品の加工、検査、搬送にニーズがある。

#### ー 溶接ロボット

構造物の溶接作業に使用する。

#### ー 重量物の搬送ロボット

工作機械間の搬送、組付に使用する。

#### ー 検査ロボット

加工ラインの検査工程全範に使用する。

## (3) 非製造業でのニーズ

### 1) 建設・土木・鉱業

建設・土木・鉱業の各業種別にみるとほぼ半数が建設関連で占められ、とくに高所での作業と建屋内狭あい地での作業に要請が高い。これらは危険を伴う作業であるが人間による迅速な判断が必要なため、自動化・ロボット化が後れていた。そのためこの分野ではまだ自動化とロボット化との整理が十分でないように思われる。土木関連では、発破に関わるものとアスファルト舗装関係やビル解体など、自動計測や施工技術そのものが未完成のものが、要請されている。

#### ー 高所組立作業用ロボット

高層ビル工事における鉄骨の組立、（建込み、ボルト締め、リベット打ち）、溶接、塗装、組立後の検査作業を対象とする。

#### ー ビル内の配管工事用ロボット

配管の設置、接続（ナット締め、溶接）断熱材巻き作業を対象とする。

#### ー 発破作業用ロボット

トンネル等の発破作業におけるさん孔や、装薬、発破後の検査作業ができる。

- ー コンクリート吹き付けロボット  
トンネル内壁、建物の外壁に精度良くコンクリートを吹き付ける。
- ー セグメント組立ロボット  
シールドトンネルのセグメントの組立（組付中、ボルト締め）作業ができる。
- ー 不整地資材搬送ロボット  
ビル工事現場の凹凸のはげしい所、階段等がある所で重量物を搬送する。
- ー アスファルト舗装用ロボット  
道路のアスファルト舗装時、温度を監視しながら展圧速度を自動的に制御する。

### 3) 原子力

比較的歴史の浅い原子力発電関連ではその特性上、早くから遠隔操作・自動運転が行なわれてきたが、さらに安全運転のための自動化・ロボット化要請が高く9割近くを占めており、残りは約10年後に発生してくる更新のための解体作業が上げられている。原子力関連のロボット化課題をニーズの強い順に以下に示す。

- ー 原子力プラント各部の点検・検査・ロボット  
プラントの配管・圧力容器等における異常の有無についてプラント内を点検・検査して回るもの。
- ー 原子力プラント各部の運転停止中に分解・溶接・再組立て等を行うロボット  
(a)の検査結果にもとづき、プラントの運転を停止して、必要箇所を修復するために行う各種の作業が含まれている。
- ー 原子力施設の解体作業ロボット  
ほぼ10年後には、寿命に達する原子炉関連設備が出てくるため、それに合わせて放射化した容器やコンクリート構造物を安全に解体する必要がある。
- ー 放射能で汚染した壁などを清浄・防染するロボット。  
放射能汚染物質や放射性物質を積込み・搬送するロボット。

### 5) 運輸・倉庫・荷扱

およそ半数が倉庫・荷扱いに関するもので、形状・行先きの判断が必要なところや梱包・開梱に人手がかかっているところが浮びだされている。

企業内での荷扱については標準化が独自で進められるので、大方、解決されているが、ターミナルなど各種の荷姿の集まる所では、これからの課題となっている。またこの中には、貯蔵タンク内での清掃も要請されている。

他の半数は輸送機関、主として鉄道車両や架線に関するメンテナンスのロボット化ならびに船舶関連の自動化が要請されている。

- ー ランダムな荷物を自動仕分け、パレタイジングするロボット  
荷札の照合と仕分け、倉庫内から自動的にオーダーピッキングして定型、不定型貨物にかかわらずトラックに積み降しする。
- ー 不定型な荷物の梱包作業、開梱作業するロボット  
不定型の貨物（固体、粉体）を木枠、木箱に梱包又は包装でき、それを船内などでパレタイジングできる。
- ー 洗浄ロボット  
食料貯蔵タンク、タンカーなどの内面を清掃する。
- ー メンテナンスロボット  
鉄道車両の定期検査と修繕、架線支持用のビームの錆落としと再塗装できる。

### 6) 医療、福祉

今回の調査によると医療・福祉関連では、半数以上の7件が身障者および入院患者を対象とした介助・誘導ロボットとなっている。これは看護婦などの人手不足とともに、介助のための力仕事に伴うためと考えられる。ついで多いものが検査・診断の自動化をねらいとしたものである。高令化社会に向って多くなると思われる高齢者向けのものは目立っていない。

- ー 診断、検査ロボット  
基礎データ（体温、脈拍、血圧）を収集したり、触診、又は障害者などの歩行分析できるロボット

一 患者介助用ロボット

入院患者、四肢麻痺と患者の移動を介助し看護婦機能を果せる。

一 誘導ロボット

災害時に人に代って状況把握、救助、被災者誘導ができる。

2) 電力・通信

送電電圧の高圧化および、発電地点の避地・分散化の傾向の中で、危険を伴う高所作業の低減を図るための送電線の 신설ならびに保守・補修工事のロボット化の要請がある。また繁雑な配線工事を誤りなく行えるためのロボット化のニーズも強い。

一 配線用ロボット

発電所制御室、信号機器室内などの狭い場所で配線、ケーブルのジョイントを敷設する。

一 補修用ロボット

電柱に登り活きた配電線路の切離し、接続、補修作業したり鉄塔塗装ができる。

一 架空ケーブル工事用ロボット

架空ケーブル架設時にハンガーかけ作業を行ったり送電線を碍子等支持物へ締結する。

4) 海洋開発、水産業

一 基礎工事用ロボット

水中掘削、捨石均し、運搬、溶接、ボルト締めする。

一 発破作業用ロボット

大水深の海底岩盤のさん孔、爆薬装填できる。

一 水中構造物のメンテナンス用ロボット

水中構築物、海底沈下観測装置の保守点検作業ができる。

7) その他

一 メンテナンス用ロボット

ガスタンク、埋設されているパイプの内外面検査と内部の清掃、焼却炉の点検と清掃など危険苦渋作業のできるロボットのニーズが合計5件あった

一 消防、防火用ロボット

人間では不可能な火災現場の火の中の情報収集、消火活動、人の救助ができるロボットの切実なニーズがある。

一 宇宙ロボット

将来的なニーズとしては宇宙空間で構造物を建設することのできるロボットが望まれている。

### 2-3 高度自動化機械の需要規模

高度自動化機械は、現在JISで定義されている産業用ロボットの中の、知能ロボットあるいはこのカテゴリーの延長上で更に技術的に高度な機械と考えることができる。

産業用ロボットの将来需要について、日本産業用ロボット工業会は製造業および第一次、第三次産業等を含む全産業に対して1985年に2800億円、1990年に5900億円と予測している。知能ロボットがこの内どの位を占めるかは不確定な面もあるが、少なくとも1985年に200億円、1990年に1000億円には達するものと考えられる。これらの見通しでは、今日の段階で考えられる知能ロボットの用途を前提としており、実際の知能ロボット技術の進歩とそれに伴う応用領域拡大とは、更に需要規模を大きくするものと予想される。また、1990年以後の需要については、知能ロボットだけでなく他の産業用ロボットについても予測が行われていないが、その潜在需要はきわめて大きいものがあり、90年代を通じて需要が伸び続けることは明らかである。

知能ロボットの潜在需要は非常に大きく、例えば製造業の主要産業の組立を潜在用途の一つと考えたと、約90万人の組立工の3%を知能ロボットが代替したとして2.7万人、1000万円/台の知能ロボットとして潜在需要規模は2700億円ということになる。組立における技能者不足は控え目に見積っても4万人であり、仮にこの潜在需要が全て知能ロボットで満たされたとしても、マクロ的には、“生産工程の組立工の不足感がかかり緩和された”という程度のものでしかない。図2・3・1および表2・3・1は、知能ロボットを中心とする高度自動化機械システム360例の潜在ポテンシャルを示すものであり、巨大な市場ポテンシャルの一端を知ることができる。

表2・3・1 306システム例にみる1990年の稼働予想システム数

1990年の稼働システム数(期待値)	システム例の分布(計360システム例)
	0
～10システム未満	11
10～100	58
100～1000	114
1000～5000	70
5000～1万	25
1万～5万	40
5～10	13
10～50	22
50～100	5
100万システム以上	2

本調査で行ったアンケートの結果で見ると(360システム例)、数十万システムの稼働が予想あるいは期待されている高度自動化システム例も少くない。稼働予測は回答するのが困難な質問の類であるが、回答分布のピークをみると、100～1000システム数の稼働台数に全体の1/3(114システム例)が集中している。次いで1000～5000システムに20%(70システム例)が集まり、等3位は10～100システムに16%(58システム例)が集まっている。これら合計では242システム例、全体の67%となる。中間値をとって予想稼働台数を計算すると、合計約28万システム、1システム例あたり平均で1140システムとなる。この平均値にアンケートで得られた高度自動化機械システム360例を乗ざると約41万システムとなる。1000万円/システムとして、1990年の稼働ベースで4.1兆円のポテンシャルということになる。年間数千億円のロボット需要となる。

以上は、ごく大まかな試算であり、数字の厳密な信頼性はともかく、高度自動化機械に広大な市場ポテンシャルがあることはアンケート結果からも十分読み取れる。

マクロ的な労働需給の点から、製造業に限ってポテンシャルを簡単に検討してみよう。製造業の技能労働力は昭和55年に約990万人、65年では1030万人、すなわち、10年間で40万人の供給増しか予測されない。生産性が見込めず人員増で4～5%の経済成長に対応するとなると、700万人位の増加が必要とされる。実際にはこのような供給増は不可能である。また、生産性向上手段は高度自動化機械だけではないから、その全てが高度自動化機械のポテンシャルということではない。しかし、既務技術で可能な量産工程の自動化がほぼ終了段階に入ったとされる現在、高度自動化機械の相応の平凡なくして生産性向上は見込めない。

約700万人のわずか1%の労働力を高度自動化機械が担当したとして7万人、1兆円近くの市場ポテンシャルと推定される。これが実現したとしても、全体の生産性向上に対する高度自動化機械の寄与率は無視され

るほどのものでしかない。逆にいえば、ロボットが広範な業種・職種を含む我国全体の生産性を引き上げた  
と辛うじて認められる状況になるだけでも、数兆円の稼働規模となる必要がある。

いずれにせよ、巨大な市場ポテンシャルの顕在化へのシナリオは、高度自動化機械の開発成果による所が  
大きい。すなわち、今後の技術開発いかんがどの程度ポテンシャル市場を現実のものとするかを決める。高  
度自動化機械の開発は、インフレを抑え、安定した経済成長を可能とするためにも早急な実施段階へと入ら  
ねばならないといえよう。

以上、高度自動化機械の市場規模に関して、次のようにまとめることができる。

(1) アンケート調査からの推計

1990年の稼働台数 410.4千システム  
 // 平均単価 1,620万円/システム  
 // 稼働金額 66,485億円

1980年代の年平均需要額 8,311億円

この需要値はポテンシャルの予測値と考える。

(2) JIRAの調査からの推計

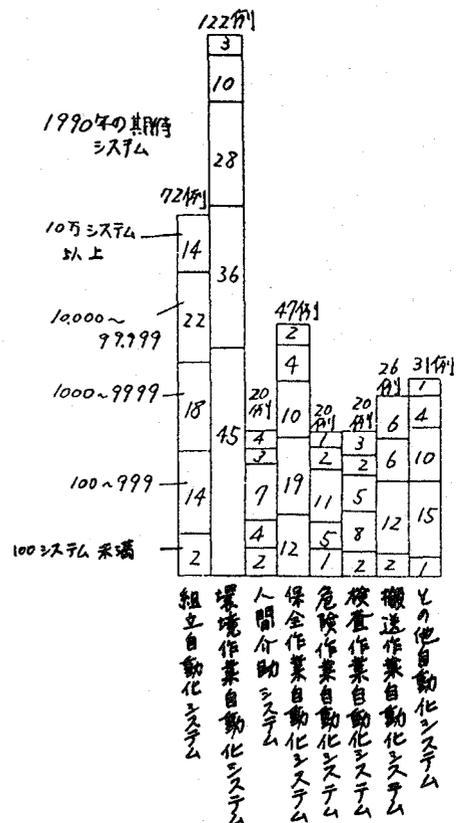
1990年 製造業 ~5,200億円/年  
 // 非製造業 ~ 790 //  
 計 ~5,990 //

この値はかなり現実的に推計した値といえる。

(3) 結論

結論は今後の技術開発の進展度により決まるが、ポテンシャルとして80年代の年間需要は6000億円  
 ~8000億円程度が見込める。

図2・3・1 高度自動システムのポテンシャル



## 2-4 ニーズからみた今後の開発の方向性に関する提言

### 2-4-1 概要

ニーズに関する調査を要約すると、開発が望まれるロボットシステムの特徴は次の通りである。

○高度の要素技術が必要である。

このため、

- － 高度技術のため、研究開発に時間がかかる。
- － 技術範囲が広いので、国、大学等の研究機関の参画が必要である。
- － 他の産業への応用、発展の技術となり得るので、協調が必要である。

○非製造業向けロボットは、少量多品種であり、研究開発が広く、研究投資の効率が悪く、又リスクも大きい。

○ニーズは、国の基幹産業に関連するものが多い。

- － エネルギー、原子力、電力、情報、電信

○危険作業対象のニーズが多いので早期実現が望まれる。

熟練工の不足、危険作業の増大、(高所、地下、水中等)等のため早期の研究開発が必要である。これをまとめると

- ① 先端技術としての育成、普及
- ② 莫大な研究開発費
- ③ 研究開発の長期化
- ④ 国の基幹産業に関連大
- ⑤ 経済の活性化
  - － 競争力の維持
  - － 新事業による地域産業の育成
- ⑥ 国の研究機関、大学の参加等、国の指導育成が必要である。

このように国の果すべき役割は大変重要なものである。また、開発が望まれている高度自動化機械は、製造業、非製造業を問わず、実に様々なものであり、それら1つずつのシステムを当面の開発対象とするよりは、各システムにある程度共通した要素技術の開発を軸に研究開発着手されることが望ましい。これは、研究開発要員や費用の限界とその中で有効な活用とを考え合せれば、極く当然であろう。

これまでのアンケート調査等に基づくニーズ調査結果をみると、悪環境作業、危険作業といった、比較的自動化が遅れ、かつ人間にとって好ましくない作業の自動化要求が大変強い。従って、中、長期の技術開発課題分野として、これら作業の自動化に貢献しうふ要素技術課題を集約した開発テーマの設定が望ましいといえよう。一般に、これら要素技術は、同時に組立自動化システムへの応用もかなり可能ではないかと考えられる。

### 2-4-2 極限作業ロボットのニーズ

#### (1) 極限作業ロボットのニーズと主要用途

高度自動化機械へのニーズを作業種別にみると、先に述べたように悪環境下での作業、危険作業など人間の労働として好ましくない作業が多くあげられている。

これらの作業内容を具体的にみると、人間が行う作業としては作業内容あるいは作業環境の点で極めて好ましくないものや、人間の作業能力を超えたもの従来の自動化技術水準およびそのトレンド的發展の方向を超えた技術水準を要するものなどが少なくない。いわば人間の能力の限界的ポジションでの諸作業、人間のできない作業といった意味で“極限作業”を行うロボットの開発が強く要請されている。

本調査アンケートで挙げられた高度自動化機械のロボットシステムの中から、例えば、極限作業を抽出すると表2・4・1のようになる。

表2・4・1 ロボットシステム369システムにみる極限作業システム数

ロボットシステム	システム数	内極限作業システム数(%)
組立作業自動化システム	32	0
悪環境作業自動化システム	135	49(73%)
介助作業自動化システム	21	3(5%)
保全作業自動化システム	53	6(10%)
危険作業自動化システム	26	5(7%)
検査作業自動化システム	22	0
搬送作業自動化システム	30	0
	369	63(100%)

すなわち、全体で見ると悪環境作業自動化システムが“極限作業”を行うロボットシステムであると考えられ、それは全体の約80%を占める。

これら極限作業の多くは、悪環境作業自動化システムとして挙げられており、悪環境作業全体の中では約37%に達している。すなわち、“極限作業”は、人間が行うには“極限的環境下での作業が主体である。その他では、保全作業、危険作業、介助作業などに極限作業ロボットのニーズがある。

保全作業自動化システムに含まれる極限作業は殆んど原子力関連であり、介助作業自動化システムに含まれるものは人命救助作業であり、危険作業自動化システムに含まれるものは鉱業関係や海洋開発の危険作業である。

具体的な極限作業ロボットとしては、主に次のものが例示される。

1) 原子力施設関連における極限作業例

- － プラント各部の点検、検査作業
- － プラント各部の保守作業
- － 除染・洗浄作業
- － 小型回転機器、弁類等の分解・再組立作業
- － プラント解体作業
- － その他（例えば、廃棄物機械・仕分け、高レベル放射性廃棄物地下貯蔵作業、放射線下でのその他のハンドリング作業など）

2) 災害救助における極限作業例

- － 火災情報収集、検索作業
- － 避難誘導作業
- － 消火作業
- － 救助作業

3) 鉱業における極限作業例

- － 資源採掘、切羽作業
- － ダイナマイト操作、同関連作業

4) 宇宙空間での極限作業例

宇宙空間における諸作業は、当然その全てが人間の能力を超える部分での作業であり、例えば、

- － 宇宙空間での構造物建設作業
- － 惑星表面での地質分析サンプリングなど諸作業
- － 人工衛星修理作業

5) 海洋開発に関連した極限作業例

- － 水中堀削・基礎捨石均し作業
- － 水中構造物建設現場での重量物運搬ハンドリング作業
- － 海底での観測・検査作業

これらにみられるよう、限界作業ロボットは、その多くが導入されている今日の産業用ロボットの“場”である製造業の生産工程から離れた、電力供給業、公務、鉱業、海洋開発など、実に様々な産業、“場”でのニーズが強い。別の視点で見ると、主要例として挙げた極限作業5分野でのロボットは、直接的あるいは間接的にエネルギー・資源開発、人命救助に貢献することが期待されている。

(2) ニーズ調査からみた政府による極限作業ロボットの開発の必要性について

1) 極限作業ロボットの価格

工場内生産工程の自動化の進展に代表されるように、比較的商業的ベースに乗りやすい部分での技術が飛躍的進歩をみせた。反面、民間レベルで採算に乗りにくい部分、例えば悪環境作業・危険作業などの自動化のための技術開発、特に多額の開発費を要する場合や、長期に渡る開発期間を必要とする場合、需要・普及見通しが明確でない場合などでは、ニーズが強い割には、革新的技術進歩がみられていない。前項で挙げた極限作業のロボット化はまさにその典型であり、国が本格的にその開発に取り組む必要がある。

表2・4・2は、主な極限作業ロボット例67について、アンケートにおける実用化期待価格をまとめたものである。実用化期待価格は、別の視点で見れば各システムの技術的高度さ、同時にニーズの強さを示しているともいえる。

表2・4・2 極限作業ロボットの期待価格

価格帯	高度自動化機械(397システム)	内極限作業ロボット
1000万円以下	173 (44%)	4 (6%)
1000万円～5000万円	139 (35%)	18 (27%)
5000万円～1億円	41 (10%)	16 (24%)
1億円～3億円	29 (7%)	19 (28%)
3億円以上	15 (4%)	10 (15%)
	397	67 (100%)

この表にみられるように、3億円/システムの高高度自動化機械15システムのうち、10システム、約70%を極限作業ロボットが占めている。1～3億円の高高度自動化機械で60%、5000万円～1億円で40%と多くを占める。すなわち、1システム1億円レベルの高高度自動化機械の過半数が極限作業ロボットであり、それだけの価格を投じて開発すべきとする多くの見解をそこから読み取ることができよう。

2) 極限作業ロボットの普及予想

政府が開発の中心的役割を果たすことが期待される他の理由として、強いニーズがある割には、当面の普及台数が少ないとみられることあるいは、普及見通しが困難で民間企業が開発に乗り出しにくいことが挙げられる。

表2・4・3は極限作業ロボットの普及台数見通しをアンケートからまとめたもので、高度自動化機械全体の中では、普及の台数面では、相対的に少ない普及が予想されている。

同表にみられる極限作業ロボットの相対的な少ない普及予想を読み取る上で、次の2点を留意しておかねばならない。

① 普及のためには、法・規制面での改正や何らかの対応が必要と考えられたため、普及予想が実際より下目に表われた可能性がある。

(例えば、ビル火災での極限作業ロボットを想定した場合、ビル例でのロボットが活躍しやすい条件を整備する必要があり、その条件整備には一部の法規の改正も要することも考えられる。アンケート回答者は、既務の諸条件を前提にロボット普及を予想しなものとみられ、ロボットを前提とした条件整備が可能であれば、当然、より多くのロボット台数が必要となる。)

② 重要な機械システムではあるが、原子力プラントメンテナンスロボットや災害救助ロボットのように、使用頻度が製造業の生産工程の産業用ロボットなどに比べて少ない。

表2・4・3 極限作業ロボットの普及予想(注1)

1990年の稼働システム(期待値)	全高度自動化の種類	内、極限作業ロボット種類(%)
～10システム未満	11 (3%)	3 (5%)
10～100	58 (16%)	27 (45%)
100～1000	114 (31%)	21 (35%)
1000～5000	70 (20%)	7 (12%)
5000システム以上	107 (30%)	2 (3%)
合計	360	60 (100%)

(注1) 表2・4・2と合計が一致しないのは一部に回答不明があるため。

3) 極限作業ロボットの要素技術

一方、極限作業ロボットの要素技術水準は、例えば下記に挙げるような高度自動化機械の中でも更に高いレベルが要求されている。

- 精度0.1～0.5mm以内の立体認識高速で出来る視覚
- 7自由度以上のアーム、多自由度指
- 全方向移動階段登降機能、多足歩行機能
- 悪環境下での高性能遠隔制御
- 環境モデルに基づく動作計画

要求技術を極限作業ロボット、それ以外の高度自動化機械に区分して比較すると表2・4・4のようになる。視覚、触覚など個別にみると多少の差はあるものの全体としては類以の構成比となっている。

すなわち、要求技術としては同一基盤技術が要求されており、その中で極限作業ロボットな、高い技術水準の達成が求められていると考えられよう。このことは、極限作業ロボット技術の極限作業ロボット以外の高度自動化機械への技術波及が速やかに行なわれることが期待される。

#### 4) 極限作業ロボットの開発の方向について

高度自動化機械に要求される技術の中でも、民間企業では開発リスクの高い極限技術の開発を政府が行うことが必要である。その成果は、民間企業におけるより多種多様な高度自動化機械の開発へと応用されるという好ましいシナリオ展開が可能となろう。

表2・4・4 極限作業のロボットに必要な要素技術

	高度自動化機械(極限作業ロボットを除く)	極限作業ロボット
1. 視覚	233(18%)	37(15%)
2. 触覚	152(11%)	28(12%)
3. 距離覚	137(11%)	32(13%)
4. アクチュエータ	93(7%)	18(7%)
5. 腕	138(11%)	23(9%)
6. 手	102(8%)	12(5%)
7. 移行機能	133(10%)	41(17%)
8. 制御機能	80(6%)	28(11%)
9. 知能機能	107(8%)	18(7%)
10. その他	113(10%)	8(4%)
	1288(100%)	246(100%)

### 3. システムの構成要素

#### 3-1 感覚、認識

##### (1) 位置・速度センサの現状

ロボットの運動の制御を行うには、各関節の位置と速度を検出して、フィードバック制御系を構成する必要がある。位置センサとしてはポテンショメータ、レゾルバ、エンコーダ、マグネスケール等が用いられる。ポテンショメータ等、アナログ量で位置を計測する方式は、ノイズ等の影響で分解能を十分に上げることができないので、最近ではデジタル的に位置を計測できるエンコーダが多用されている。

速度センサとしては、タコジェネレータ、エンコーダ等が用いられる。速度情報は速度制御を行ったり、サーボの安定性を保つために必要であり、通常は位置情報ほどの精度は必要としない。現在はタコジェネレータが多く用いられているが、位置センサとしても機能するエンコーダを用いることが多くなっている。エンコーダで速度を測る場合は、一定時間内に発生するパルス数を数える等、平均値で速度を求める方式となり、若干の遅れはまぬがれず、これがサーボゲイン低下の原因となっている。

##### (2) 位置・速度センサの問題点と課題

位置センサはこれからはデジタル方式に移っていくことと思われるが、分解能の点で問題が残っている。現在の産業用ロボットの場合、モータの回転を100分の1程度に減速して使用するので、エンコーダをモータに直結すれば高い分解能が得られる。これからのロボットは、減速比がもっと下げられ、極端にはモータ軸にロボット軸を直結することにもなると予想され、エンコーダの高分解能化、高精度化が要求されるようになる。現在1回転あたりのパルス数が512~4096程度のもがよく使われている。1回転100万パルス程度のエンコーダがレーダ等に用いられているが、その程度の分解能で安定性が高く、高速動作可能なエンコーダがロボットにも必要となろう。

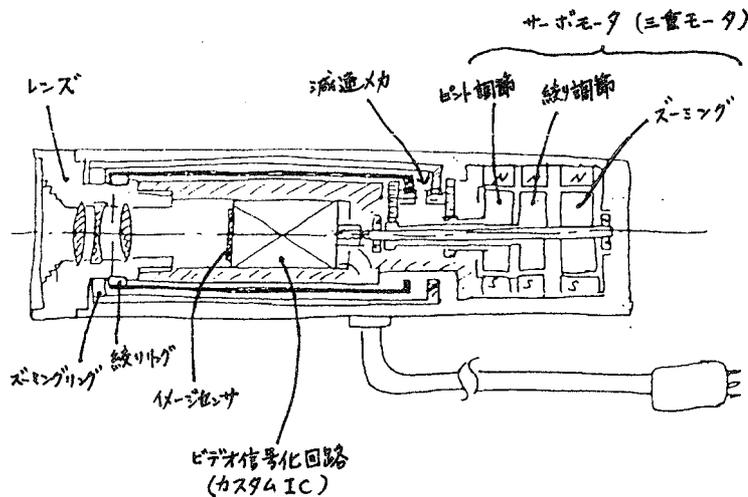
速度センサとしては位置センサを併用するのが最も合理的である。低分解能のエンコーダによる速度検出は、低速時におけるリップル(一定の速度でも脈動として検出される)が問題であり、この点リップルの効果を無視し得る程度に分解能を高める必要がある。また分解能が向上すれば、振動等のノイズの影響を受けやすくなるので、耐ノイズ性の高いものにする必要がある。それと共に、低速における、S/N比の高い速度算出方式を確立しその処理装置のエンコーダへの組み込みが必要である。

### 3-1-1 視覚

ロボットの視覚用としては、物体を2次元的に捕えて単階調で処理し、ロボットに位置情報を出力する程度の低レベルのものが最近実用化された程度である。しかしながら3次世代の知能ロボットの視覚用としては、3次元立体認識機能を実用化しレベルで実現することが必要であり、この技術はハンドリングにおけるワークの認識のみならず、自立ロボットにおける外界との相対関係計測、障害物の発見・回避等適応的動作の基本となるものである。更に、近距離から遠距離にわたってかつ明度差のある対象物から良質の画像入力を得るために小型高速な自動焦点・自動感度調節機構と撮像部の高分解能化が必要となり、そのうえ入力された視覚データの持つ情報を有効に利用するためには多階調・多色の認識が必要となる。また自走ロボットを複数台使用する場合や、人間と協同で作業するような場合には高速の動物体検出判断機能により、危険を回避し自立的に進路を決める方式が安全上からも有効である。

さらに光源からみると可視光線はもちろんの事、Y線、X線、紫外線、レーザ光線も利用する。具体案の参考例としては、まず図3・1・1に単眼カメラの構造図を示す。

図3・1・1 単眼カメラの構造例



- 機能① ピント調節はビデオ信号高周波分MAX (ピントが合った時) などの方式でビデオ信号よりフィードバックする。
- ② 絞り調節はビデオ信号のDC分よりフィードバックする。
- ③ ズーム機構は制御部よりの指示により動作さす。ただし現在の倍率を示す信号を出すセンサ (ポテンショメータなどで) が必要でこれも内蔵する。

外形 30mmφ×80mmH位で全体を円筒形とし取付容易な形とする。

次に視点可変形単眼カメラの案としては、カメラ自身は固定したままでも、レンズおよび撮像面が球面内で移動し、視野を変えることができるカメラで、これによりロボットはカメラの位置制御に関する負担を軽減させながら、広範囲の情報が入手できる。可変立体角としては約30°が必要であろうまたその他の機能としては前述の単眼カメラと同様である。

また複眼カメラの案としては、図3・1・2に示すように一定の間隔で前述の視点可変形単眼カメラを取付け、距離感覚をとらえる事ができる。すなわち複眼のうち1個を主眼、他の1個を従眼とし主眼が定めた視点に従眼が一致するよう従眼を制御する。

- 機能① 主眼カメラの制御としては水平、垂直を行なう。
- ② 従眼カメラの制御としては、まず水平については主眼カメラの画像データと従眼カメラの画像データの相関をとり制御する。垂直については主眼カメラと連動さす。
- ③ 距離感覚は主眼および従眼カメラの角度センサの出力値でとらえる。

この複眼カメラの構造案を図3・1・3および図3・1・4に示す。図3・1・3の原理はXL, XRの位置から $\theta$ を求め三角測量により距離Lを計算し、カメラ台の方向、仰角は対象物の像が視野に入る様に可動し、それぞれの情報により求める。図3・1・4の原理は2つのカメラの方向としXL, XRの値から $\theta$ を計算し、カメラの仰角 (方向は固定)、カメラ (左・右) の方向より対象物の距離L、方向、仰角を計算する。

では次に視覚の要素技術の内容についての現状を将来開発すべき仕様およびその適用についてのべる。

図3・1・4 複眼カメラの構造 実例(その2)

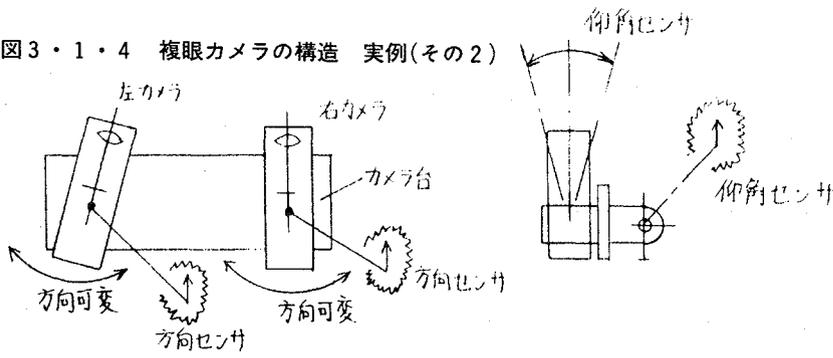


図3・1・2 複眼カメラの制御例

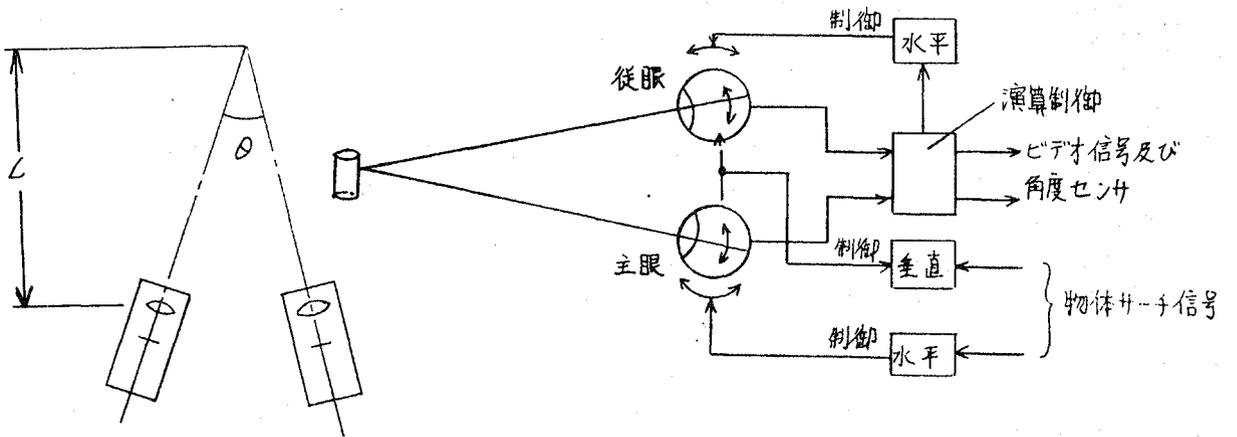
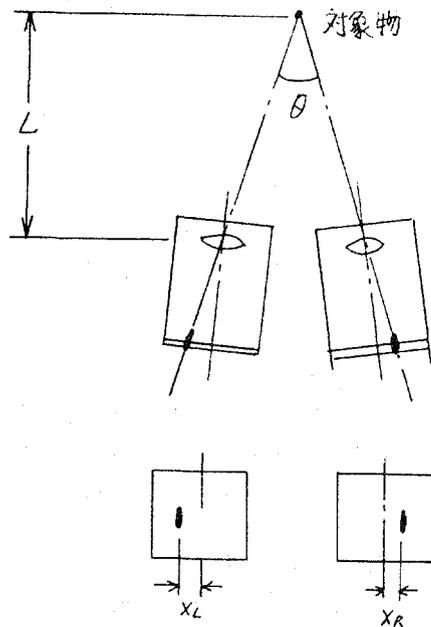
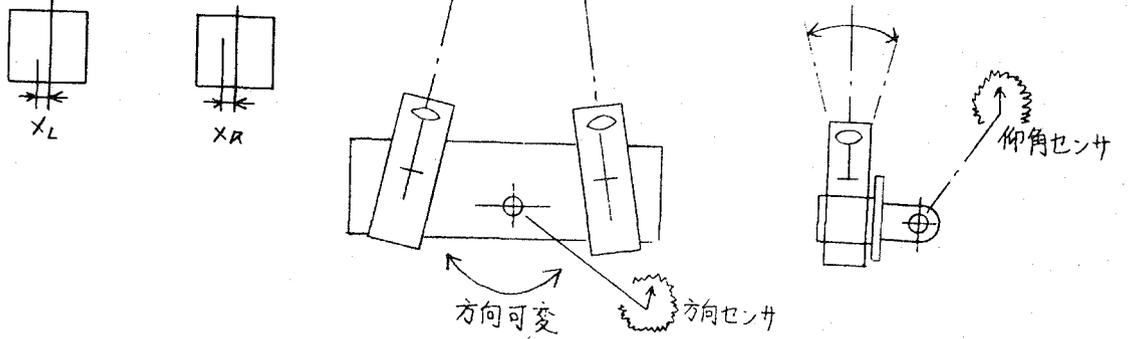


図3・1・3 複眼カメラの構造 実例(その1)



### (1) 立体認識

- (a) 現在はビジョン系、固体カメラによる2次元画像情報である。
- (b) 開発仕様としては複眼固体カメラやモアレホログラフィ等による3次元画像情報が必要である。各性能値については次項以下による。
- (c) 適用としては視覚の他の要素技術も合わせて必要であるのでまとめて最後に述べる。

### (2) 色認識

- (a) 現在は2次元では単色、点では三原色カラーセンサで多色であるが、これでは人や物を正確に区別するには情報量が不足である。
- (b) 開発仕様としては2次元でかつ各ポイント毎に三原色(赤、緑、青)32階調合計96色とする。
- (c) 適用としては顔の認識、同一形状品を色違いにより区別する、野菜等天然物体の熟度の選別、塗装・鍍金面および色あいを重要視するものの色むらの判定等である。

### (3) 多階調

- (a) 現在は単階調(固定レベル2値化または浮動レベル2値化)が主であり一部には4~6階調まで使用されているが、処理時間が長くなるためにこの程度にとどまっている。このため画像から得られる情報量が限られる。
- (b) 開発仕様としては256階調とし情報量を大巾に増やす。
- (c) 適用としては対象の識別、位置方位の計測等である。

### (4) 高速追跡性・自動焦点・自動感度調節

- (a) 現在は自動焦点については実用化されていない(但し写真用カメラでは約1mm~∞のものは実用化されている)。自動感度調節についても実用化されていない。高速追跡性については現在移動物体を静止画像化して処理しているにすぎない。
- (b) 開発仕様としては自動焦点については三角法による距離認識や超音波等を使用し3mm~∞の範囲で任意の点で行なえる。まず全体画像を認識した後任意の一点をズームアップ出来ることである。自動感度調節は対象物の明度差に合せた最適画像が取り出せる事である。さらに高速追跡性については移動している物体についてその移動方向速度を演算し検出する。
- (c) 適用としては移動物体のハンドリング組立、追跡や衝突防止、移動ロボット、視覚フィードバックによる予測制御等である。

### (5) 高分解能

- (a) 現在はビジョン系等カメラで水平240×垂直320(有効画面で)76,800画素、固体カメラで水平280×垂直350、98,000画素程度である。
- (b) 開発仕様としては高分解能を得るため、水平4,096×垂直4,096、16,777,216画素である。

### (6) 小型・軽量

- (a) 現在はレンズも含んでビジョン系等で4~5kgサイズ100mm(W)×160mm(H)×350mm(D)程度、固体カメラで1~1.5kgサイズ65mm(W)×50mm(H)×200mm(D)程度である。
- (b) 開発仕様としては前述した各要素技術を網羅したうえでマイクロ光学部品、イメージファイバ、画像記憶媒体、AD変換素子等々によりレンズも含み20~30mmφ×80mmLである。
- (c) 適用としてはロボットの手先等に取付可能となり、視野の拡大化が計れる。

### (7) 処理プロセッサ

- (a) 現在は視覚パターン認識専用のものはない。従って単純な画像処理でも1/10~数秒かかっている。
  - (b) 開発仕様として高速素子(JJ, GaAs等により)で全画面処理1/60秒で行なう。
- 以上が要素技術の個別内容であるが、最後に視覚としての適用について見ると(一部は各要素技術の項でも述べたが)、すべてのロボットで必要としていると言えるが特に代表的なものについて述べると次のようになる。

- 1) 海洋開発: 海底探査、海洋牧場監視、水中構築物建設加工、海中多目的観測等のロボット
- 2) 原子力: 原子炉保守管理、燃料棒検査、原子炉等の構造物解体、除染作業、高汚染機器の分解組立等の

ロボット

3) 宇宙開発では宇宙ステーション組立保守、宇宙探査等のロボット

4) 工場：組立、検査、アーク溶接、バリ取り、サンダー仕上げ、配線作業、自動荷役等のロボット

5) 福祉：盲導、介護介助等のロボット

6) 災害救助：火災救助、消火作業、海難救助等のロボット

7) その他の分野：鉄橋鉄塔塗装、窓ふき、ビル内清掃、森林伐木作業、ビル建設、夜間パトロール、農産物収穫作業等のロボット

#### (8) 認識技術

(a) 現在は視覚としてのパターン認識技術は他の感覚認識に比べれば進んでいるといえる。しかしながら次世代の知能ロボットの視覚用としてはまだまだ不十分である。

すなわち現在実用化および研究が進められているものを見ると次の様になる。

##### 1) 2値化技法

現在実用化されているシステムではまずテレビカメラでとらえた画像の出力はほとんどアナログ信号であり、これをまず2値化して2値画像に変換している。2値化は基本的には明るさが一定の値(しきい値)以上を1、それ以下を0とする。しきい値の決め方にはつぎの決め方がある。

ア) 固定しきい値：あらかじめしきい値を与えておく。対象の変化が少なくコントラストが十分ある場合に使える。

イ) P-タイル法：画像内で1となる部分の割合が既知の場合に有効である。明るさのヒストグラムから累積分布がPパーセントとなる明るさをしきい値とする。

ウ) モード法：明るさのヒストグラムが双峰性を示せば明るさの谷の値をしきい値とする。画面全体に一定のしきい値を適用するのではなく画面を分割し、分割された領域に対してモード法によってしきい値を決める変動しきい値法もある。

エ) 浮動2値化：移動平均しきい値法。明るさの信号の振幅を減衰させ、遅らした信号をしきい値として急変する明るさの変化を検出する。

現在行なわれているのは上記の様な2値化による単階調の処理の2次元画像のパターン認識であり(これは情報処理量の簡素化により実用処理速度〔1秒間数画像~20画像を処理〕を確保する事と小型化をするため)この2次元画像処理のパターン認識技術としては次の方法がある。

##### 2) パターンマッチング法

特定のパターンがどこにあるかを知るパターンマッチングの原理を図3・1・5に示す。

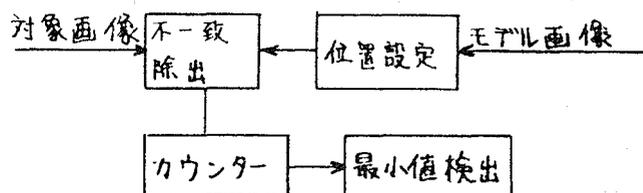
対象画像は2値画像とし、求める領域が1とする。モデル画像を対象画像の適当な位置に設定して対象画像との重なりを調べその重なりが最大で、そのときの不一致の度合いが少なければパターンの位置がわかる。

高速化をはかるための手法として次のようなものがある。

ア) 2段のマッチング：まず低分解能の画像でマッチングを行ない、その近傍だけで高分解能のマッチングを行う。

イ) 部分マッチング：パターンの特徴的な部分(もし平面なら2ヶ所)だけをマッチングする。

図3・1・5 パターンマッチングの原理



### 3) 特徴抽出法

対象物体の2次元パターンが一定でなければ単純なパターンマッチングだけでは十分でないことがある。特に実際の実用化ラインなどにおいては対象物体の位置決めを正確に行なうことが出来ないため、画像から種々の特徴を抽出し、それを組合せて判断を下さなければならない。特徴抽出法には物体の特徴の面積、線分長、周辺長、境界線、角検出、局所特徴、重心検出、セグメンテーション、円および円性、直線性、方向性、対象性などによりとらえそのいくつかのパターンの組合せにより判断を下すが、以下にそのうちのいくつかについてのべる。

ア) 局所特徴による検査：プリント板のパターンや、ICのパターンには線の最小巾、最小間隔、方向などに一定の制限がある。この制限を守っていない異常を検出するためには、局所特徴だけを用いればよい。たとえば微細な構造パターンは欠陥とみなされるので図3・1・6のパターンは欠陥である。

また2値画像の拡大、縮小をくり返すことによって微細パターンを検出する方法もある。

#### イ) 局所特徴の組合せ

図3・1・7は水平方向に隣り合う3個の局所特徴の組合せを示している。

いずれも、それぞれの局所特徴は正常とみなされる。しかしaは水平な境界の欠け、bは不規則パターンでいずれも欠陥である。

#### ウ) 特徴の計測

線巾を求めるためには線の方法を求めてから、それに直角方向の巾を計測しなければならない。線の方法はレーザ光の回折により光学的に求めることもあるが2値画像の局所特徴に基づく方法が一般的である。

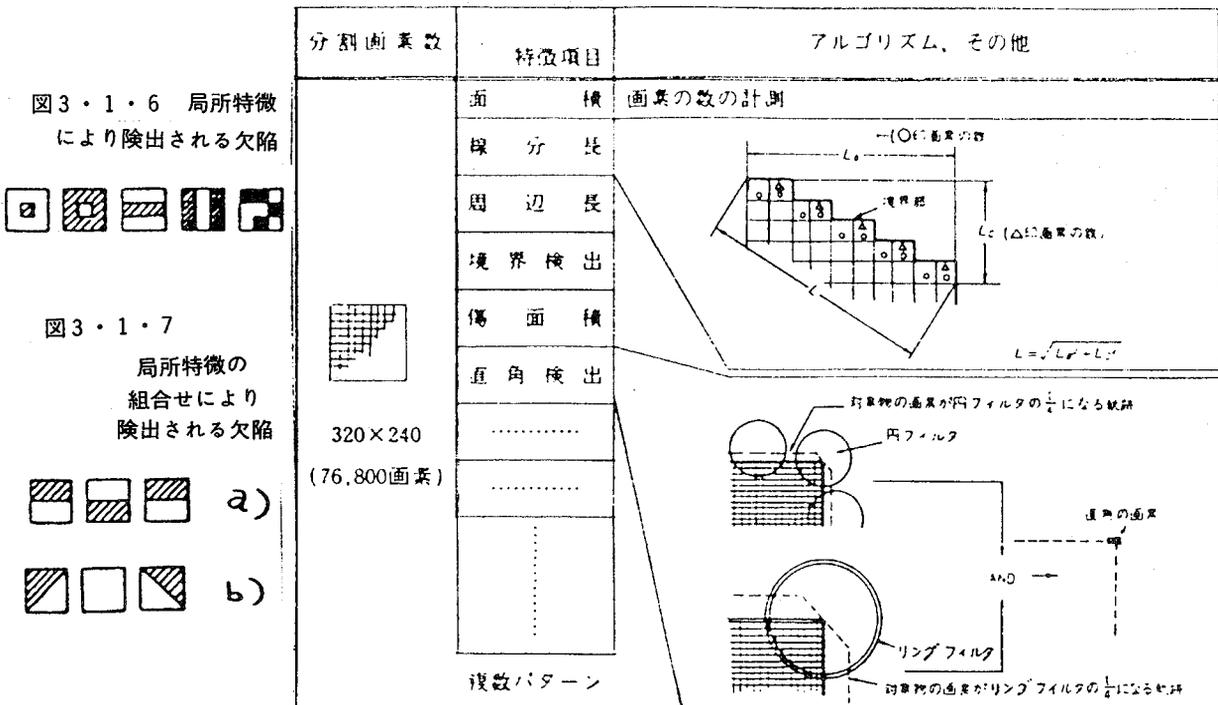
#### エ) 局所特徴による位置決め

画像の局所特徴を抽出するために、積和演算が用いられることが多い。3×3の画素を用いて明るさの変化の絶対値や変化の方向を求めることができる。対象物によっては画像自体の回転角θのヒストグラムから物体の方向を求める方法もある。

#### オ) 特徴の認識

特徴を認識する方法は前述した様に多数のアルゴリズムが開発研究されているがこの一部について述べる。図3・1・8に示すよう、2次元画像を水平方向320、垂直方向240に分割し76,800画素にて構成しこのそれぞれの画素について2値化をした後その2値化画像の特徴を各アルゴリズムでパターン認識を行なう。例えば面積特徴の場合はその画像の白または黒の画素数を計測する。また線分長特徴の場合は図3・1・8に示すよう○印の画素数(すなわち水平方向の長さ)と△印の画素数(すなわち垂直方向の長さ)を計測しその後ピタゴラスの定理により線分長を求める。さらに直角検出特徴については水平および垂直円フィルタによりその合致した所を求めることにより検出する。

図3・1・8 特徴認識の代表的アルゴリズム例



この様に従来の視覚はTVカメラから得られた2次元画像を2次的に処理するものがほとんどであった。しかし2次元画像内でのパターン計測や傷の発見をするような仕事でさえも、三次元的に対象物を理解して処理しなければ対処できない例が増えつつある。またロボットによる対象物のハンドリングを考える場合、認識対象は三次元物体である。

三次元認識については現在の所実用化まではいっていないが次の様なものが研究されつつある。

ア) 距離情報の利用

現在、距離情報を用いて3次元形状を知ろうとする試みがある。

その主な方法は図3・1・9のように平面光を物体に照射し、その観測像から特徴的な点の位置を計測するものである。より複雑な例として、複数物体がランダムに置かれたシーンから、機械部品を認識する研究がなされている。今後これらの距離情報を用いた認識手法を、現実のロボットの環境に適用できる程度に革新していく必要がある。

イ) モデルの利用

画像を理解したり、検査したり、物体やロボットの動きを監視したりするためには、対象物のモデルを必要とする。簡単な特徴のよせ集めのモデルから、物体を復元できる詳しいモデルまで用途によって様々である。これらをCADや環境教示システムを用いて記述し、利用できるようにすることが重要である。図3・1・10はモデルに基づいた画像処理システムの構想例を示している。

(b) 開発仕様としては、まず2次元画像においては多階調(256階調)でかつ多色(96色)であり、さらにより人間の知能に近づけるべき特徴抽出法による多数のアルゴリズムを開発する。またすでに前述した様立体認識については複眼固体カメラやホログラフィ等を用いて2次元画像認識と同様により人間の知能に近づけるべきアルゴリズムを開発する。さらに動物体検出判断認識も行なう。そしてこれらの判断を全画面処理で1/60秒で行なう。

以上が要素技術の個別内容であるが、最後に視覚としての適用について見ると(一部は各要素技術の項でも述べたが)、すべてのロボットで必要としていると言えるが特に代表的なものについて述べると次の様になる。

- 1) 海洋開発：海底探査、海洋牧場監視、水中構築物建設加工、海中多目的観測等のロボット
- 2) 原子力：原子炉保守管理、燃料棒検査、原子炉等の構造物解体、除染作業、高汚染機器の分解組立等のロボット
- 3) 宇宙開発：宇宙ステーション組立立保守、宇宙探査等のロボット
- 4) 工場：組立、検査、アーク溶接、バリ取り、サンダー仕上げ、配線作業、自動荷役等のロボット
- 5) 福祉：盲導、介護介助等のロボット
- 6) 災害救助では火災救助、消火作業、海難救助等のロボット
- 7) その他の分野：鉄橋鉄塔塗装、窓ふき、ビル内清掃、森林伐木作業、ビル建設、夜間パトロール、農産物収坊作業等のロボット

図3・1・9 スリット光による認識

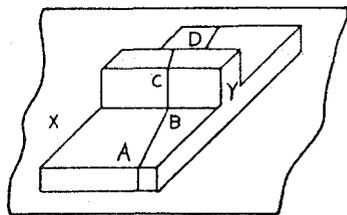
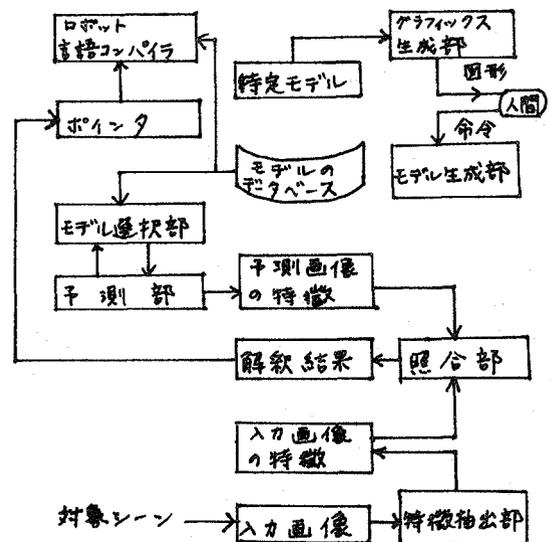


図3・1・10 モデルを用いた認識システムの構造



### 3-1-2 距離覚

マニピュレータをきめ細かく制御するために、マニピュレータと、対象物との距離は、有効な情報である。距離の検出手段としてはステレオ視方式、スポット光による三角測量方式、反射光量による測定方式等光を利用した方法と、超音波の反射時間計測による方法、渦電流方式、静電容量センサ方式等が考案され、研究開発が行われている。しかし現状では、実用化されている例は少なく、実験室段階のレベルである。広く実用化されるためには、精度、分解能の向上、小型化低コストが強く望まれる。

#### (1) 近接覚センサ

距離センサの内特に近傍の物体存在を検知を行うものを近接覚センサと呼び渦電流方式、磁気方式等のセンサが開発されている。また他の手段として、光および熱放射を応用したもののLEDとフォトトランジスタを組み合わせたもの等が開発されており、測定範囲2mmから10mmのもので誤差0.5mm、測定範囲12mmから70mmのもので誤差2mm以下が実現されている。現在は、測定範囲0mmから200mmで誤差0.1mmを目標として、研究が進められている。

#### (2) 超音波距離センサ

超音波を利用した距離センサは、レベル計、ソナー、車両感知機など様々な分野で活用され、ロボット分野では、移動ロボットの障害物検出センサ、径路センサとして研究されている。

超音波による距離の測定の最も簡単な方法は、継続時間の短いパルス状超音波を利用し、伝搬時間によって距離を測定する方法であり、距離測定の分解能は、パルス幅に比例する。パルス幅を短かくすれば距離測定の分解能は、向上することになるが、超音波のパワーが小さくなり、測定範囲が短くなる。この問題を解決するために、周波数変調したパルス幅の長い超音波パルスを発射し、受信後の波形処理によってパルス幅を狭くするパルス圧縮技術が利用される。また、パルス状超音波を利用する測距法では、パルスを発振している間は、反射超音波を有効に受信することができないため、パルス発信時間に比例する測定不能領域が務在するが、周波数変調した連続超音波を用いる場合は、解決される。超音波測距技術のもう一つの要素は、発射する超音波のビームの広がりである。超音波ビームの広がりが狭ければ測距する方向の分解能が向上し、対象物の特定の位置までの距離測定が可能となる。このためビームを細く形成する技術も研究されており、超音波アレイによる方法等がある。

現在、10度以下の角度分解能を実現する研究、数mmの距離精度を有し、数mmの2次元平面位置精度を実現する研究等が進められている。

#### (3) その他

レーザを用いた距離センサ（レーザレンジファインダ2m以内で13mm程度の誤差）が開発されている。

### 3-1-3 触覚

触覚はロボットが対象物に直接接触した時の相互関係を検出する感覚である。触覚は、接触覚、圧覚、力覚、すべり覚、そしてそれらを複合した複合型触覚に分けることができる。

#### (1) 接触覚

##### 1) 接触覚の現状

これまでに接触覚のためのセンサとして導電性ゴム、接点、粉末状あるいは繊維状の炭素、スイッチ等を利用した種々のものが開発されている。(図3・1・11, 3・1・12) この中で最も新奇的な手法で高密度化を達成した図3・1・12の例を簡単に説明してみよう。構造は薄い金属板に球形ドームを格子状にプレス成形したものである。球形ドームは、非接触のとき圧縮空気により外側に、物体がそこに接触した時に内側に変形する。感度を空気圧で調整できるところに一つの特徴がある。実験では、2.54mm間隔で4個のドームを配列し、それぞれの感度を50グラムとするのに成功している。

##### 2) 接触点の問題点と課題

接触覚センサは不安定なセンサである。特に耐久性の面で問題がある。直接物にふれて、大きな力を常に受けているのですぐにへたってしまうても無理はない。実用的には簡単なON-OFFスイッチ程度のものしか使えないのが現状である。従ってこれからの課題は高密度に分布し、各セルが多値情報で接触状況を検出する安定なセンサの開発であり、材料面での革新が要求される。

具体的には、へたることのない柔軟な構造材料、大きな歪に耐えることのできる歪検出素子（新しい可能性として光ファイバ等がある）の開発が不可欠である。

図3・1・11 各種接触覚センサ

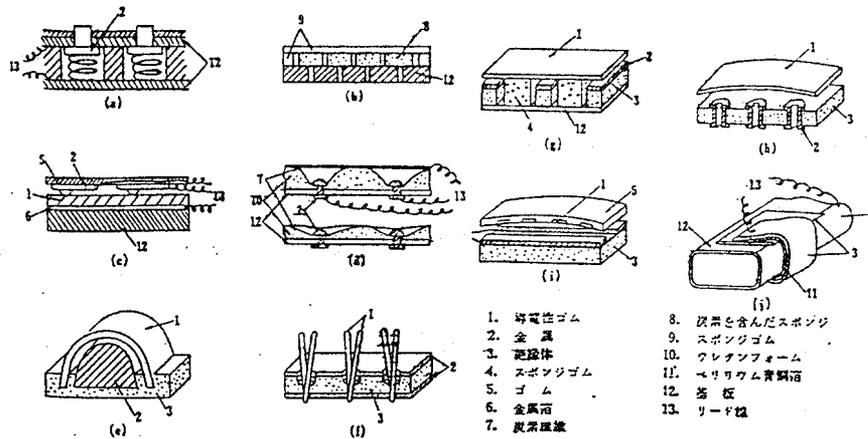
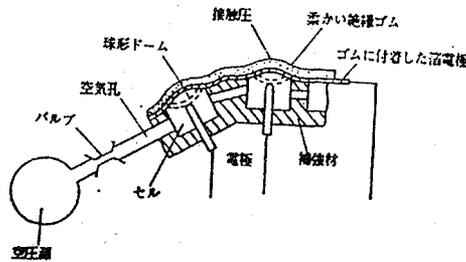


図3・1・12 空気圧を利用した接触覚センサ



## (2) 圧覚

### 1) 圧覚の現状

接触覚がそこにもものがあるかないかを調べるための感覚であるのに対し、圧覚は対象物をつかむ際の圧力を制御するのに必要な感覚である。圧覚として、片持ち梁に半導体ゲージを装置し、そのたわみによって力を検出するものや、ばねの変位を小型のポテンシオメータで検出して力を検出するもの等がある。これらは、いずれも機械的な歪を利用したセンサで、検出部が変位する。特にばねを利用したセンサは、ばね定数を小さく設定すると有効ストロークが数十mmになることもあり、対象物の弾性や硬さなどを評価することにもこの変位が利用されることもある。

検出部が力によって変位するセンサにはこのような用途も考えられるが、その一方では、センサの動作に摩耗やバックラッシュがみられ、長期にわたって信頼性を保つのが難しいという欠点もある。これに対し半導体素子を用いた圧覚の場合は、きわめて小さい変位を検出することができ前述の問題はほとんど生じないが、出力が温度の影響を強く受けるという欠点がある。

### 2) 圧覚の問題点と課題

ばねの変位をポテンシオメータで検出する方式は、変位量を非接触のリニアエンコーダやマグネスケールで検出することで飛躍的にその信頼性を高めることができる。コーディング板とヘッドを必要箇所に自由に組み込むことのできる微小エンコーダの開発が必要である。

半導体素子を用いた圧覚は、その温度の影響を打ち消すために、固定抵抗とサーミスタを含んだ補償回路を1チップ化し、センサのすぐそばに配置する必要がある。

## (3) 力覚

圧覚は物をにぎる力を調整する感覚であるのに対し、力覚はにぎった物体と外界との間に働らく力を検出するためのものである。力の大きさと作用点を求めるには立体的に配置された、少なくとも6箇所における歪量を計測する必要がある。力覚はほとんどが半導体歪ゲージを利用している。

図3・1・13は汎用力センサの例である。手先に加わる力( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )とモーメント( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ )を求めるために、手首より先の部分をすべり球を用いた4点で支え、各点での作用力を歪ゲージを用いて計測する。

図3・1・13 汎用力センサの例

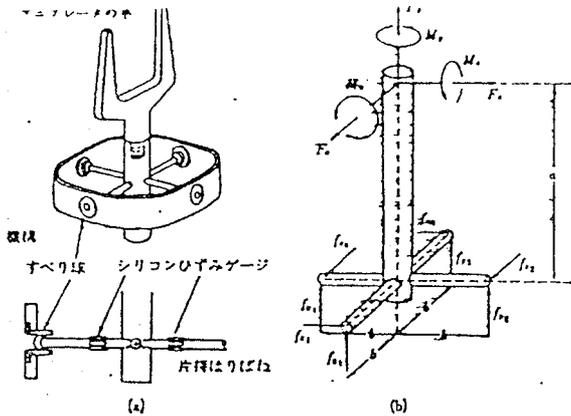


図3・1・14 手首に付けた力センサ

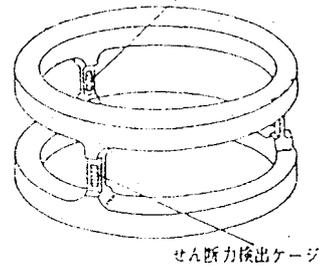
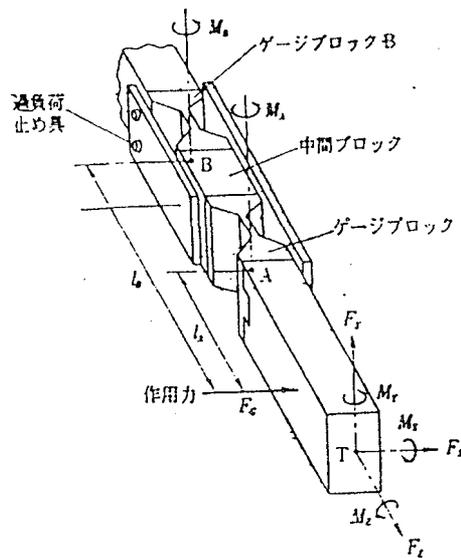


図3・1・14はもう一つの汎用力センサの実現例である。外径12cm内径10cm長さ5cmのアルミ円筒を切削したもので、3ヶ所に巾6.5mm、厚さ1.5mmの支柱を有する。各支柱の内側と外側には歪ゲージが装着してあり、支柱に作用する張力や剪断力が直接測定でき、これらに基づいて手先に働らく力の3軸成分と、各軸まわりのモーメントを検出することができる。この方式で最終的に4gの検出感度を実現している。

図3・1・15はモジュール化された力センサの例である。図はモジュールを2個使用した場合で、2つの歪ゲージブロックと中間ブロックから構成される。歪ゲージブロックの中央部は巾の広い薄い梁でできており、この梁は図でY軸方向にのみ曲がるようになっている。2つのモジュールを使うことで、作用力FGの大きさと作用点を検出することができる。中間ブロックに固定された2枚の保護板や、その上についた過負荷防止具は、指が大巾にたわむ時の歪ゲージの破壊を防いだりセンサの感覚領域を拡大したりするためのものである。このモジュール形センサを組合せて、力とモーメントの各3成分を検出する6自由度の力覚センサも構成されている。

図3・1・15 モジュール型の力センサ



## 2) 力覚の問題点と課題

力覚の問題点はほとんどが歪ゲージの問題点といってもよい。歪ゲージの熱による特性変化、ヒステリシス、ドリフト等の不安定要素が力覚を今もって実用化以前の状態にとどめている。次の世代のロボットを目指すにはこの点を抜本的に解決する必要がある。その解決策の1つは、微小歪を高分解能エンコーダ等歪ゲージ以外の手段で計測することである。特に歪ゲージの場合、歪信号が微弱でノイズの影響を受けやすいアナログ信号であることが問題である。デジタル量で直接計測できる素子の開発が必要である。解決策の第2は、駆動系を精密化し、必要な力は正確にアクチュエータが出力することである。ダイレクトドライブ方式等力の精密制御を考えた新しい駆動方式の開発が必要である。

#### (4) すべり覚

##### 1) すべり覚の現状

卵や紙コップをつかむ際、重さによるすべりが起らない範囲で、最小の力で把握したい。この時指の制御に必要なのがすべりセンサである。すべりセンサには触針方式、ローラ方式がある。触針方式は動く物体に針がひっかかる時の振動を検出するものである。図3・1・16はローラ方式の1つの例である。すべりがある場合円板が回転し、スリットを通る光がチョップされ受光素子にパルス信号が入る。図3・1・17はローラ方式の他の例である。先の例では1方向のすべりしか検出できないのに対し、この例では、任意の方向のすべりを検出することができる。この構造は、導電体で作られた球面が絶縁体で市松模様に分割されている。市松模様の黒白部分がそれぞれ絶縁体部と導体部であり、球表面に接した物体がどの方向にすべっても球が回転し、その表面に接した触針にパルス状の電圧が得られる。

##### 2) すべり覚の問題点と課題

触針方式は簡便であるが耐久性に問題があり、ローラ方式は高密度装着が難しい。これからの課題としてはローラ方式の小型化が残されている。また接触覚や圧覚との複合化が必要になって来よう。

図3・1・16 ローラ方式のすべりセンサ

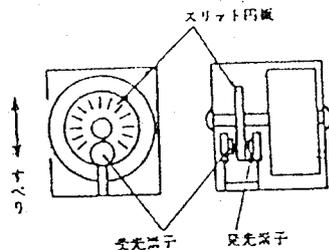
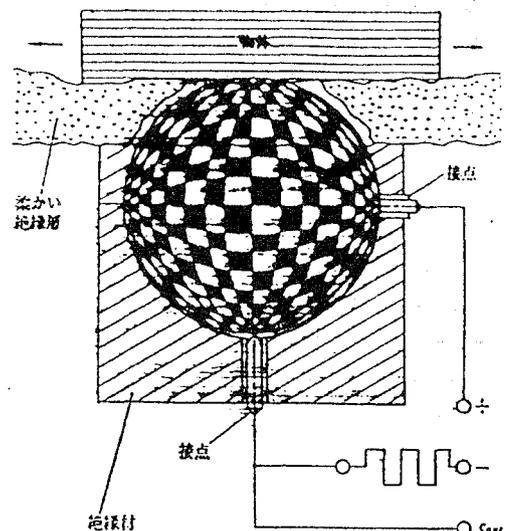


図3・1・17 2方向のすべりを検出できるすべりセンサ



#### (5) 複合型触覚

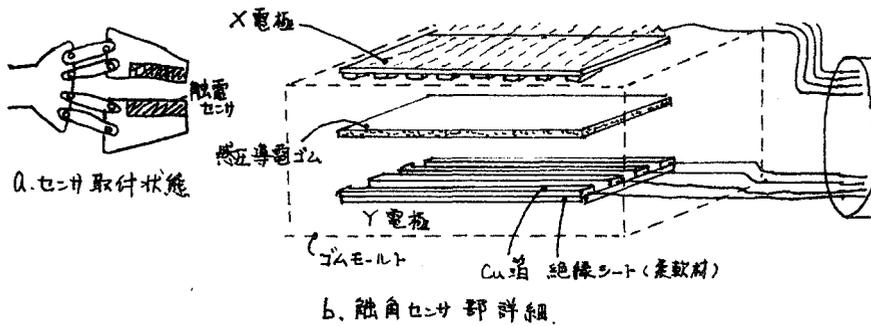
##### 1) 多層感圧導電ゴムによる複合型触覚

触覚としては接触覚、圧覚、力覚、すべり覚、重量覚があるが一要素のものについては各種研究されているもののいずれも信頼度、性能とも満足できるものはまだ実用化されていないといえる。そこで新しい触覚センサーとして多層感圧導電ゴムを利用することにより接触覚、圧覚、すべり覚を合わせて検知できる複合型触覚について述べる。これは電極をマトリックス状として接触位置を検知するものであり、感圧導電ゴムを利用するため電極間ギャップが不要で感知までのストロークが短かくできさらに段階的に圧覚検知も可能である。

この構造については図3・1・18に示す様、ロボットの把持機構の把持物と接触する部分にこの触覚センサを取り付け、このセンサの表面が把持面となるように構成する。センサ本体はゴム状弾性物質（ゴム、ウレタン、柔軟樹脂など）で製作し、センサの感知部はこのゴム等で完全にモールド化し油・水密構造とする。感知部は感圧導電ゴムを挟んでX、Y電極が配置され電極のCu箔は感圧導電ゴムと接触している。この様に3枚サンドイッチ状に重ねたもの全体をウレタン等のゴム材にて注形モールドにする。電極のCu箔の条数は必要な分解能に応じて本数を増加させそれぞれのCu箔からリード線を引き出す。

今、把持機構が物体を把持して図3・1・19点線内の部分が圧力を受けたとするとこの部分の感圧導電ゴムが導通状態となりX、Y電極の交点が導通状態となる。この状態を外部からスキャニングして導通している交点の番号を知る。この様な構成により把持しひて力が作用していることと把持している部分のパターンを知ることができる。

図3・1・18 触覚センサ構造



前述の例では電極は感圧導電ゴムの上下面に配置し厚さ方向の導通を利用したが、横方向の導通を利用すれば次の様な変形が可能となる。すなわち図3・1・20の様pt板の片面にX, Y電極を構成し、重ね合せてゴムモード化する。

今迄のものでは力の圧力の程度は検知できないので感圧導電ゴムの特性の相違するものを2~4種類用い、サンドイッチ構造の感知部を2~4層重ねて設けることにより可能となる。すなわち各層の感知圧力を段階的に変化させておけば導通した層と導通しない層の圧力感度の中間の圧力が作用していることが検知できることになる。(図3・1・21参照)

またこの方式は把持物の圧力パターンが検知できることから、このパターンの移動変化を見つければ(図3・1・22参照)すべり覚と同様の検知が可能となる。

図3・1・19 接触パターンの認識

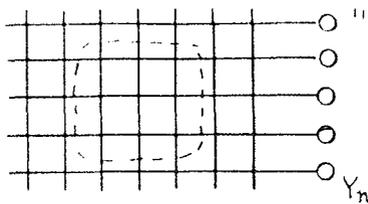


図3・1・20 多目的接触センサ構造

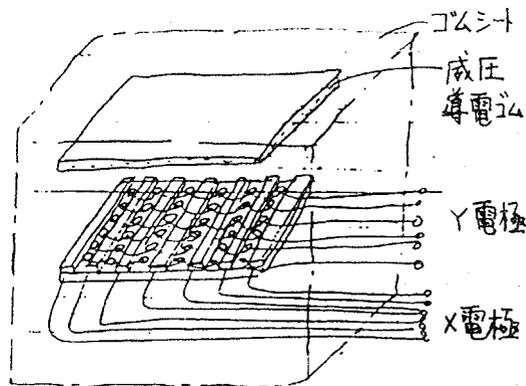


図3・1・21 圧覚検知の多層構造

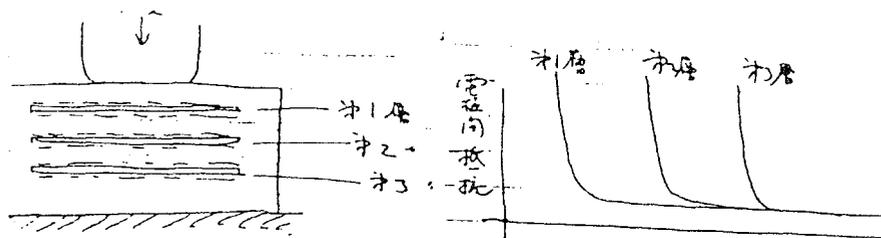
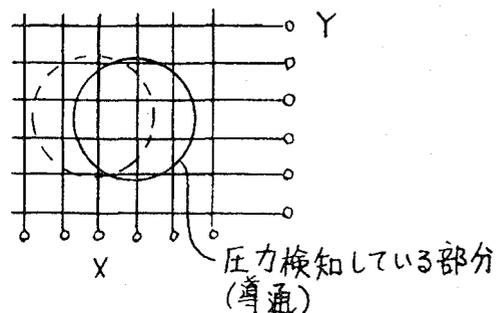


図3・1・22 すべり覚の検知



2) 半導体歪ゲージに係る3次元力複合型触覚

ロボットの触覚としての力センサに要求される項目は次の様であるといえる。

- (a) 力の3方向(又は2方向)の分力を検出できること、すなわち高度な作業、あるいは変形の大きな物体の把握には立体的な力あるいはモーメントを3分力に分解して検出してロボットを制御することが望ましい。
- (b) 力を直接検出すること、すなわち通常の圧力センサでは接触面積、接触部や物体の変形能で出力が変化し、後処理が複雑になる。
- (c) マトリックス構造を実現できること、すなわち変形能の大きな物体をも把握するには接触面積が大きいことが必要となる。
- (d) 高級な増巾器を必要としないこと、すなわちマトリックス構造の多数のセンサ出力を相互の干渉なく高速安価に処理できることが必要である。(高インピーダンスなセンサは不可)
- (e) 各エレメントの特性がよく一致し、センサ毎の校正が不必要か又は容易なこと。
- (f) センサの剛性が高く過荷重に耐えること。(剛性を下げる方は容易でありパットをつければ良い。)

この様な要求を満たすセンサとしては、蒸着または拡散歪ゲージを使用した3次元または2次元荷重エレメント(リング状または柱状)をマトリックスに配置したセンサの開発が必要である。

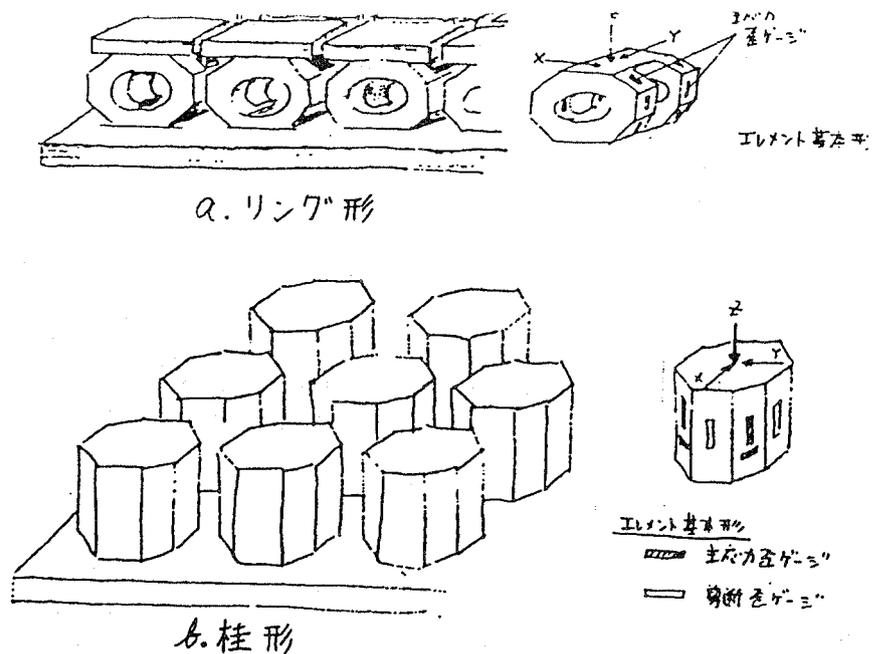
開発仕様の諸元としては、まずエレメントの面密度については、 $5 \times 5 / \text{cm}^2$ である。すなわちロボットの制御に必要な力やモーメントの面積分解能は対象物によって異なる。更に物体の剛性や形状の認識の必要性によっても異なる。(単純な触覚のみのセンサに比べて力センサの場合にはエレメントの面積度は小さくても良いと推定できる)

そしてダイナミックレンジ/分解能については、面垂直方向では1:1000、面平行の2方向では1:300である。すなわち把握機能が重視されるので面垂直方向の分解能、ダイナミックレンジが重要視される。またダイナミックレンジを大きくするためには対数感度曲数を要求すべき場合もある。(この場合には信号処理側がやや複雑となろう)

さらにマトリックス構造のセンサ出力を高速処理するための合理的な回路を開発する。

構造例は図3・1・23に示すようになるが、リング形はZ方向の感度および直線性が優れているがX、Y、特にY方向の感度が劣る。一方柱形状はZ方向の感度と特性に問題がある。

図3・1・23 3次元力複合型触覚センサマトリックスの構造例



3-1-4 聴覚（含発声機能）

(1) 音声認識

1) 音声認識の現状

10~100単語の音声認識する装置はすでに商品化されている。1970年代に入って、半導体技術の進歩で、処理の高速化、装置の小型化、低価格化が可能になり、まず米国で音声認識装置が商品化され、ついで日本でも1978年に単語認識装置が発売されている。図3・1・24は音声認識装置の商品化の流れであり表3・1・1はそれぞれの装置の内容である。これで100単語前後の単語認識方式は大体確立したといえる。登録した人の声の単語認識なら99%以上認識できるようになっている。

ところでこれらの音声認識装置は、自由に発生した音声ではなく、一定の発声条件を課した音声を対象としている。認識語彙数は多くて150単語で、全認識対象単語を登録した人だけが使える（特性話者）ものがほとんどである。また単語毎に区切って発声しなければならない。しかしロボットの聴覚としては滑らかに発声した文章（連続発声）や1000~1万個の大語彙単語を誰の声でも認識することが必要であろう。

文章や大語彙単語認識の研究の主なポイントは、①認識を行う単位を何にするか、②認識に用いる音声の特徴パラメータを何にするか、③前の①②で採用した認識の単位、特徴パラメータに適した認識処理の方法はどのような方式かということである。

文章や大語彙単語を対象とした認識で、認識単位を単語にすると、入力した単語を判定する処理量が単語数に比例して増加すると共に、誤認識しやすくなる。そこで単語を構成する、もっと細かい音声単位を認識の単位にすることが研究されている。現在カナ文字（単音節）単位に認識する研究が多いが、それはカナ文字の数は限られているので、カナが認識できれば、その組み合わせとして単語も認識できることになる。このほか音韻のような別の認識単位を用いた研究も盛んに行われている。②の認識に用いる音声のパラメータは種類が多い。それぞれの研究所が使い慣れた特徴パラメータを使い続けているのが現状でどの特徴パラメータを使えばよいかを比較研究した例は少い。表3・1・2は単語より小さい認識単位を使った国内の主な音声認識研究を示している。

外国でも、米国を中心に音声認識の研究が盛んに行われている。米IBM社は、レーザに関する1000語彙から成る特許文に限って、不特定話者の連続音声認識を目指している。

2) 音声認識の問題点と課題

音声認識の研究はロボットとは独立に進行しているのが実状である。ロボットの聴覚ととして音声認識を考える場合、認識語彙数1000以上で不特定話者による連続音声認識が必要であろう。さらにロボットの場合は騒音下で使用されることが多いので、雑音の多く混入した音声を処理する能力が必要である。

現在は各研究所が他と独立して行っている研究を比較検討し、最適な手法を集大成し、ロボットの音声認識技術を確立することが重要であろう。

図3・1・24 音声認識装置の商品化の流れ

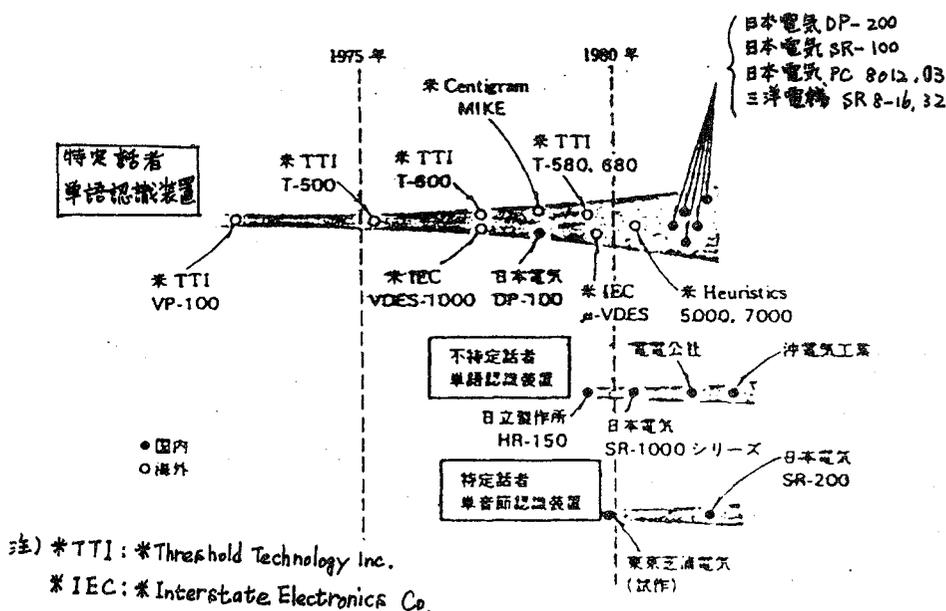


表 3・1・2

研究機関	音声合成 (CV)										音声 (C.V)			
	音源タイプ/アイディ/音声ワード/プロセッサを指す										音源 (C.V)			
	大規模音声認識										音源 (C.V)			
研究機関	日本電気	東京芝浦電気	富士通	北海道大学	電電公社 情報処理部	電電公社 武蔵野通研	情報処理科学大学 京大	電子技術 総合研究所	シャープ	日立製作所	電電公社 武蔵野通研	情報処理科学大学 京大	電電公社	富士通
認識単位	68 単語	68 単語	68 単語	68 単語	101 単語	101 単語	68 単語	110 単語	780 の VCV から CV を抽出	700 以上の VCV	128 単語	15 の単語や音韻群	各音韻 16 のパターン	200 個の 細分類単位
適用	—	—	—	—	—	321 単語	68 単語	325 語から 抽出文章	連続文章を抽出中	文章	641 単語	32 単語	最大 32 単語	10 文字
結果	特定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
不特定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
特徴パラメータ	BPF** 出力 (20ch)**	BPF 出力 (16ch)	BPF 出力 (20ch)	BPF 出力 (15ch)	LPC ケーストラム係数 LPC 相関係数 (16次)	LPC ケーストラム係数 (16次)	BPF 出力 (20ch)	声道断面積 係数 (12-セクション)	ケーストラム係数 (24次) 自己相関係数 (10次)	自己相関係数 逆スペクトル係数 (10次)	LPC 相関係数 (10次) LPC ケーストラム係数 (16次)	BPF 出力 (20ch)	自己相関係数 逆スペクトル係数 (10次)	BPF 出力 (13ch)
母音を完全に決定	○	○	○	○	○ (フレームごと)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
マッチング法	不明	逆時間相関 マッチング	DP マッチング	線形マッチング	両端点自由の DP マッチング	逐語: シフト マッチング	子音部に、各種 DP マッチング方法を適用して比較	逐語 DP マッチング	線形マッチング	逐語線形マッチングと、逐語逐語 DP マッチング	SPLIT 法 (DP マッチングを参照)	単語: DP マッチング	単語: DP マッチング	単語: DP マッチング
文献	91, 101	111, 112	131, 321	141	151, 491	161, 171	181	191	201, 211, 481	221, 231	241, 251	261	271, 281	291, 301

\*\*VCV: 母音-子音-母音を表す。\*BPF: 帯域通過フィルタ。\*ch: チャネル

(2) 音声合成

音声合成の方式としては録音された音声でデータを、編集して音声を出力する録音編集方式、音声の発声機構の規則を模擬し、規則によって、音声合成を行う法則合成方式に大別される。

現在の技術では、法則合成による発声音声の音質は劣り、録音編集方式が多く利用されている。特に最近では、録音編集方式の内、音声データを、線形予測等の分析手法を用いて、データ圧縮し、少ない情報量で、良い音質を得る分析合成方式の研究が行われ、実用化も行なわれている。現在、分析合成方式で多く使われている、PARCOR方式のもので、データ量は、10Kbit/sec程度であり、実に音質を落さずにデータ圧縮率を上げる研究がなされている。

録音編集方式の欠点は、予め録音し、分析された音声で作られる文章(言葉)しか発生できない点にあり任意の文章を発生するためには、法則合成が必要とされる。法則合成方式は、音質の面で十分な性能が得られておらず、実用化されるには至っていない。ロボットシステムにおける音声合成は、操作者に対する応答としてまず利用すると考えられ、ある特定の単語文章の発生が可能な分析合成方式で、十分であると考えられる。

しかし、知能ロボット開発が進み、学習機能をも備えたシステムの段階に至ると、マンマシンコミュニケーションの要求は高まり、任意の文章の発生できる方式が望まれると考えられる。

(3) 音響認識

1) 音響認識の現状

音響認識は種々の用途について検討され、実施されている。次の(4)~(7)は各分野における応用例である。

センサ及び信号処理技術の現状は表 3・1・3 に示す通りである。

2) 音響認識の問題点と課題

ロボットに音響認識機能を持たせようとする場合、一番の問題点は、その重量と容積であろう。そのため、センサの小型化、高性能化が要求されるが、現在、圧電フィルムや光ファイバの利用が検討されている。今後は新変換方式、新材料の開発に積極的に取り組む必要がある。

計測精度(位置や速度について)は現状は 1cm 又は 1cm/sec 程度であり、1mm オーダーへの挑戦が研究レベルでは行われているが、これを実際にロボットに使える技術として確立する必要がある。

信号処理に関しては単純な(量的には膨大な処理であるが)変換処理に終わっているのが現状である。今後は信号をパターンとして扱い、認識技術の導入を行うことが必要になると思われる。表 3・1・3 の将来の欄はこれからの、開発課題を示している。

表 3・1・3

商品化した音声認識装置。外国の製品については国内で売っているものだけを挙げた

メーカー名	日本電気						
機種名	DP-200	SR-100	SR-200	PC-8012-03	SR-1101	SR-1201	SR-1301
話者	特定	特定	特定	特定	不特定	不特定	不特定
認識語数	50単語 最大500単語	120単語 10数字	50単語、10数字 63単語	60単語	4単語	16単語	128単語
発声方法	離散発声 または5単語 まで連続発声	離散発声 または 疑似連続発声	離散発声 または 疑似連続発声	離散発声	離散発声	離散発声	離散発声
認識処理方法	2段DP マッチング	最速伸張 DPマッチング	単語・数字: DPマッチング、 単語節:不明	圧縮DP マッチング	パターン マッチング	識別調教 方式	識別調教 方式
価格	490万円	49万8000円	318万円	9万8000円	400万円	500万円	1500万円

電気公社	三洋電機	Interstate Electronics <sup>21</sup>	Centigram Corp. <sup>22</sup>
	SRB-32 <sup>21</sup>	$\mu$ -VDES	MIKE-III
不特定	特定	特定	特定
32単語	32単語	80単語	99単語
離散発声	離散発声	離散発声	離散発声
音調との類似度と DPマッチング	線形マッチング 簡単な DPマッチング	DPマッチング	不明
不明	17万9500円	245万円 <sup>22</sup>	92万3000円

(4) 異常音の検出システム

1) 機械加工中の加工損傷・工具破損の検出

被加工物の加工中の損傷、ヒビ割れ、工具の破損、損傷等のときに発生する異常音を聞いて、これらを検知する。(図3・1・25)

2) 地震予知(炭坑事故予知)

地震発生前に生ずる地盤中の高周波成分の音波を海底で検知し、地震予知の情報とする。(図3・1・26)

3) 原子炉冷却漏洩検知(ガス、水道の漏洩検知)

原子炉冷却水が管の亀裂等から漏洩するときに発生する音を検出し、漏洩を検知する。(図3・1・27)

図3・1・25 機械加工中の加工損傷、工具破損検出システム

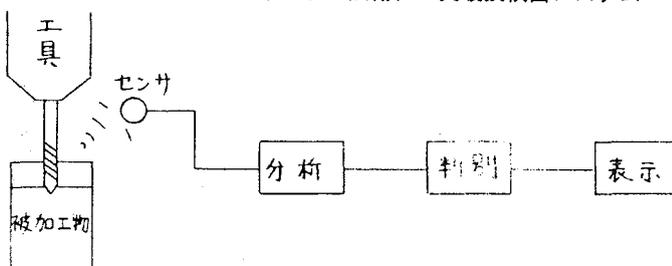


図 3.1.25 機械加工システム

図3・1・26 地震予知システム

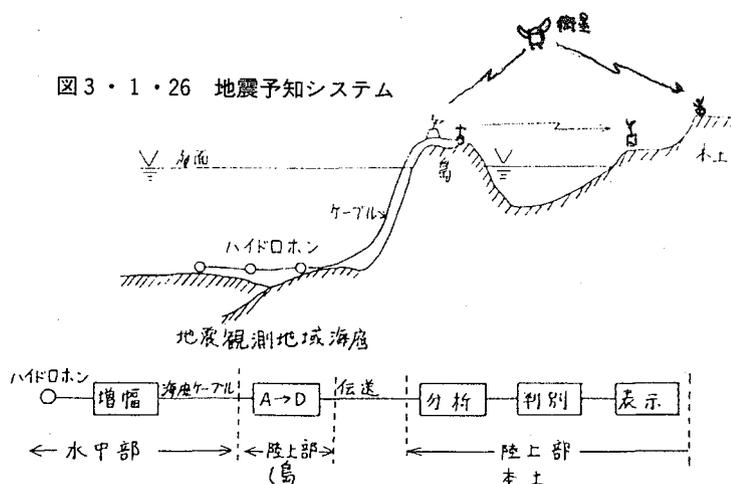


図 3・1・27 原子炉冷却水漏洩検知システム

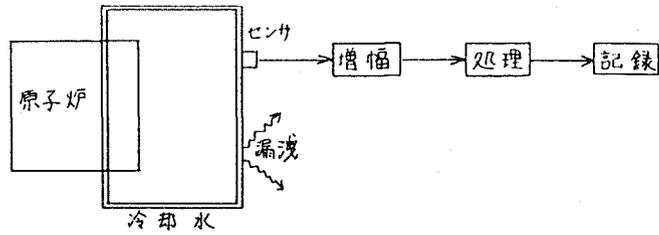


図 3.1.27 原子炉 システム

(5) 障害物探知システム

1) 盲人用超音波メガネ

障害物までの距離、大きさを超音波で検出し、その結果をイヤホンで音に変換して聞き、障害物の音響像を脳に活像する。(図 3・1・28)

2) 障害物探査ソナー

移動物体（自動車、作業ロボット、水中潜水艇など）の移動方向に音波を発射し、障害物からの反射波から障害物の方向、位置、大きさ等を検知する。(図 3・1・29)

図 3・1・29 障害物探査ソナーシステム

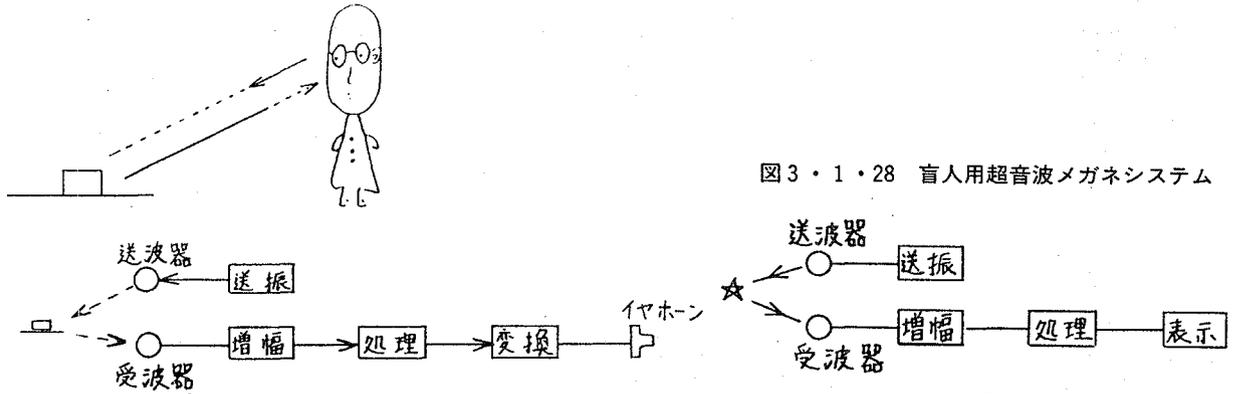


図 3・1・28 盲人用超音波メガネシステム

(6) 監視システム

1) 養殖漁場侵入警戒

養殖漁場へ侵入するイルカや部外者を、それらが発生する固有音をとらえて検知して警報を出す。(図 3・1・30)

2) 船舶の接岸監視

大型船舶の岸壁への接岸速度、位置を超音波で計測し、接岸の監視、制御を行う。(図 3・1・31)

3) 水中作業監視システム

水中でのダイバーの作業状況、機器の作業状況および水中での構造物の状況を、超音波映像装置を用いて、音響像として映像化して監視する。(図 3・1・32)

(7) 品質管理システム

1) 溶接部の検査（溶接割れ、スポット溶接の管理）

溶接部付近に取付けたセンサーで、溶接部から発生する Acoustic Emission を検出し、溶接の品質をモニターする。(図 3・1・33)

2) 家畜肉質の管理

牛肉の発育状況、品質を超音波を用いて検査する。(図 3・1・34)

図3・1・30 養殖漁場侵入警戒システム

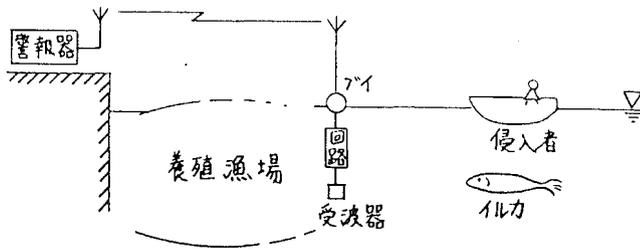


図3・1・31 船舶の接岸監視システム

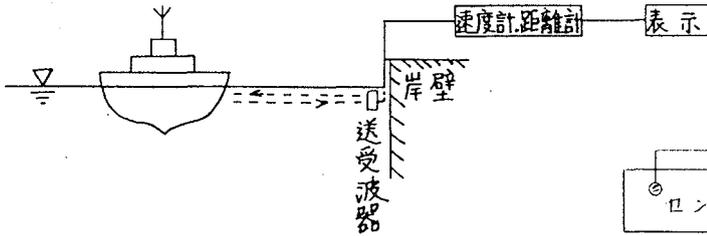


図3・1・33 溶接部の検査システム

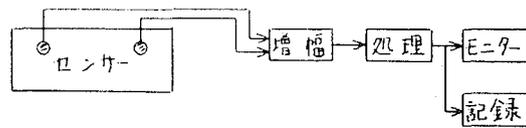


図3・1・32 水中作業監視システム

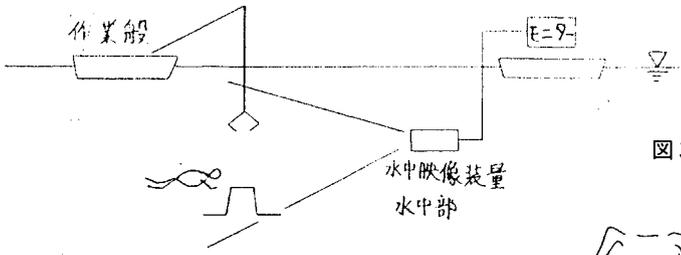
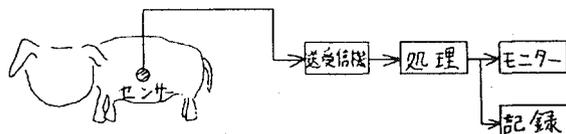


図3・1・34 家畜肉質の管理システム



### 3-1-5 平衡覚

#### 1) 平衡覚の現状

平衡覚とは、重力とバランスをとりながら移動する際、重力方向を検出したり、手先等に取り付け、手先の絶対的な姿勢を検出したりする感覚を指すものである。

図3・1・35は歪ゲージを使った平衡覚の実現例である。構造は、歪ゲージをはった板バネの自由端におもりを取り付け、他端をモータ軸に固定したものである。モータは移動体の本体に固定されている。モータが停止した状態でセンサ全体が傾射すると板バネにたわみが生じ、それが歪ゲージで読み取られる。たわみ量から直接傾射角を読み取ることもできるがより精度を高めるため、モータで軸の回転角を制御し、板バネにたわみ量を生じないように平衡をとり、そのときの回転角をポテンショメータで読み取り、傾射角の測定値とする。このセンサーを2つ用いれば、重力方向の2成分を検出することができる。

図3・1・36は人間の三半規管と似た構造を持つ平衡覚の例である。球(BALL)の容器(BESSEL)は、片面を半球状に削った2枚の光学ガラス板をはり合せたものである。容器内の空間を満たす液体は、ガラスと同一屈折率を有する媒質である。ピンホールからの光は点光源として球を照射し、スクリーン上にその影を作る。ボールの影をレンズ-エリアセンサ系で検出することにより球の位置を算出することができる。球は重力方向の安定点に静定するので重力方向が検出できる。この方法で誤差 $12^\circ$ 以内の全方向検出が可能である。

#### 2) 平衡覚の問題点と課題

2足歩行のような不安定系を動的に制御するのに平衡覚が用いられているが、これからは移動するロボットが不整地または階段等、実験室の平面床から現実の作業の場に進出する時に不可欠のものとなる。

現状の平衡覚は精度、速応性、容積等の点で満足できるものはほとんどなく、精度 $0.1^\circ$ 、計測速度10msec程度まで高めなくてはならない。

ジャイロスコープを用いた平衡覚は有望である。精度は今でも $0.1^\circ$ 位は出ており、あとは速応性、小型化の問題を解決すればよい。また最近レーザジャイロの開発が盛に行われており、ロボット用に小型化したものを開発することが必要である。

図3・1・35 歪ゲージを用いた平衡センサ

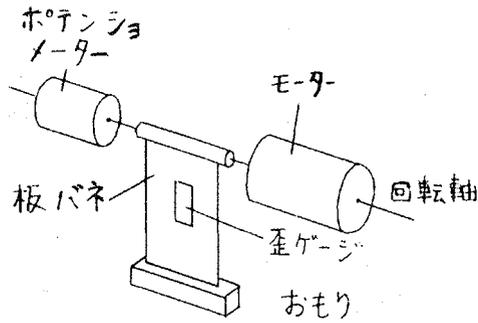
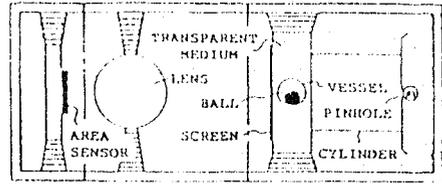


図3・1・36 球状錘を用いた重力方向検出センサ



3-1-6 非接触型温度 (赤外線小形高速二次元認識センサ)

赤外線二次元認識センサを用いれば、物体の温度に関する画面像において、その温度分布および経時的変化から軸受不良、電気機器の接触不良等に代表される異常現象を判断し予防保全等の適用ができる。さらに可視光線利用の認識技術と併用すればある種の材料の判断などができる。

現在は赤外線検出器による二次元情報センサとしてサーモグラフィがすでに実用化されているが、この構成は赤外線センサとしてSiによるダイオードアレイCCDで一次元125素子を使用し走査鏡と組合せたもので、二次元画像を得るためにメカニカルスキャンを行い、通常1～4秒のスキャンタイムを必要としている。また、赤外線センサはCdHgTe、InSbなどの半導体材料が使用されるが、熱雑音による信号ノイズを減少させるため、液体窒素により素子を冷却し、しかも液体窒素は2～3時間ごとに補給する必要がある。

開発仕様としてはダイオードアレイ2次元素子512×512で素子サイズは3～5mm口、波長感度1μm～10μm (77°K冷却)。赤外線検出素子と電子スキャナーとの組合せ、あるいは並列信号処理による高速度処理によりフレーム走査速度(応答速度)100mmsec。さらに赤外線検出素子の赤外分光感度域の拡大と高感度化(低ノイズ化)のために小型冷却器(到達冷却温度77°K, 消費電力1W, 重量2kg)の開発が必要である。

図3・1・37に温度と赤外線波長の関係、図3・1・38に構成を示す。

図3・1・37 温度と赤外線波長の関係

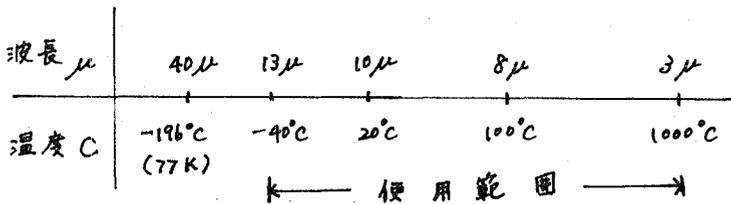
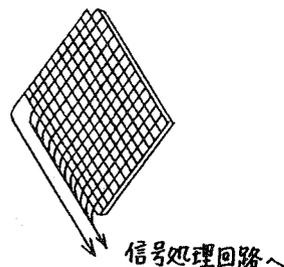
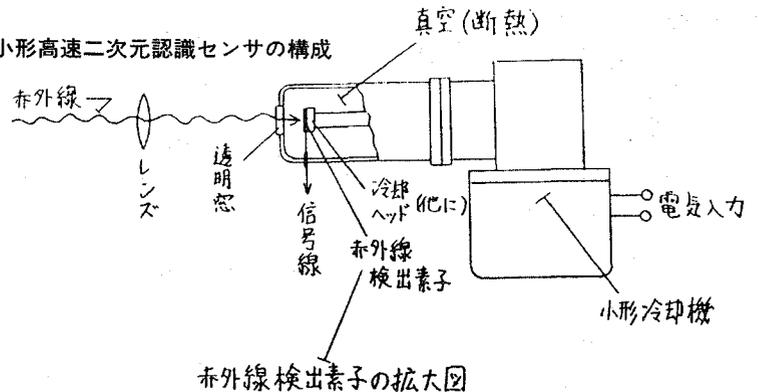


図3・1・38 赤外線小形高速二次元認識センサの構成



### 3-1-7 嗅覚・味覚（化学的反応を利用した感覚）

#### 1) 嗅覚・味覚の現状

ロボットの嗅覚・味覚の研究は、実現の難しさや、さし当っての応用分野が少いことからまだ本格的に始められていない。しかし測定対象を限定すれば、ガスセンサのように、必要性が高く、実現もそう難しくないものも務在する。表3・1・4は種々の測定対象について開発されている化学反応を利用したセンサを示している。ロボットの役割は、プラント類の検査・保守・点検等をも含むものであり、これらのセンサによる異常検出機能は、ロボットシステムの中に生かし得る性質のものである。

#### 2) 嗅覚・味覚の問題点と課題

現状のセンサは測定対象を限定したものであり、ロボットに装着する場合その容積が問題となる。1つのアプローチとして、各種化学反応センサを小型化し、一揃いロボットに装備することが考えられる。また新しい反応を利用したより汎用性を持ったセンサの開発も併行して行う必要がある。

動物の嗅覚は、同じ臭いを続けてかがされると感覚が麻痺し感度がにぶるが、一時新鮮な空気を補給すると再び感度が回復するという性質がある。ロボットの嗅覚も感度の維持が非常に重要で、この点で、基礎からの研究開発が必要である。

表3・1・4 化学反応利用センサー(一覧表)

1 / 2

センサーの種類	測定対象	測定原理	信号処理
可燃性ガスセンサー	可燃性ガス ( 防災・環境計測用等 炭化水素, H <sub>2</sub> , CO等 )	可燃性ガスを触媒により接触燃焼し それによって生じる温度上昇がガスの種類や 化学組成に関係無くおよそ一定の値をとる。	温度上昇による抵抗 変化をブリッジ回路 により検出する。
ガスセンサー	吸着性ガス ( CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O等 )	ある種の半導体にガスが吸着すると空間伝導 電子密度に差が応じる。	半導体の電気伝導度の 変化を検出する。
イオン電極センサー	可溶性ガス ( SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , 等 大気汚染公害防止装置 監視用当 ) 水中イオン ( 水質監視用等 )	M <sup>n+</sup> +ne <sup>-</sup> ⇌Mである陽イオンの単極電位は ネルストの式で表わされ、感応素子を適当に選べば イオン濃度を電極により測定できる。	イオン電極から出力 される電圧を濃度の 値として検出する。
化学発光センサー	NO, O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , CO, CO <sub>2</sub> ( 公害, 環境計測用等 )	化学反応過程において反応物質が励起され それが基状態に戻る際、発光することを利用する。	反応により発生した 発光を光電子倍增管 で増幅しこれを検出。
溶液電度センサー	Si <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , HCl, H <sub>2</sub> S, CO <sub>2</sub> 等	溶液とガスを接触させこの時生じる溶液の 導電率片化が測定ガス中のガス濃度を測定する。	導電率変化を検出する。

( 参考用 ) 2 / 2

センサーの種類	測定対象	測定原理	信号処理
ガス検出器 ( FIDセンサー ( Flame Ionization Detection ) )	有機化合物	試料ガスに高純度水素ガスを加え、空気を助燃ガス として送り燃焼させる。この時、燃焼炎の周囲に正 負の一定電圧をかけておけば有機物が存在するとき 分解してイオン化しイオン電流が発生する。	この時発生するイオン 電流を増幅し検出する。
検出器 ( FPDセンサー ( Flame Photometric Detector ) )	S化合物、P化合物の全S、全P	試料ガスに高純度水素ガスを加え空気を助燃ガスと して送り燃焼させる。このとき、炎の上部でP・S が存在する場合には特異な発光が認められる。	この発光を干渉フィル ターを通し光電子倍增 管で増幅する。
検出器 ( FTDセンサー ( Flame Thermoionic Detector ) )	N化合物、P化合物の全N、全P	試料ガスが熱されたアルカリ金属チップ表面で熱分 解されるとシアノラジカルCN*になり加熱されて いるアルカリ金属から放出されるRbからの電子の 供給を受けCN <sup>-</sup> となる。このイオンは水素イオン と結合し、Rbは陽イオンとしてコレクタに収集さ れる。	コレクタ電流を信号電 流として取り出す。

### 3-2 メカニズム・材料

#### 3-2-1 腕・手の要素技術

ロボットの機能要素の中で腕と手は産業ロボット及び義手を問わず、それを構成する上で最も重要なメカニズムの一つであり、ロボットの高度化、知能化を図る上で現状の技術レベルからの脱却を必要としている。

腕は作業空間の領域を広げる機能と実際に目的とする作業を実行する手の位置と姿勢を決める重要な機能を持つ。現在のロボットにみられる腕および手の機能は人間のそれと比較するときにはるかに低い。それは人間の手における触覚の機能やそれを学習能力によってさらに高度化する生物学的な機能は人工の腕・手に望むことは現時点では無理であるとしても、その機構学上の構造において、動作の多自由度の面、特に指の多関節部の構造とそれを駆動するアクチュエータ並びにそれから多関節部材を介して動力を伝達する手法は、今後の知能ロボットを開発する上での大きな課題である。しかもそれを人間の腕、手と同等程度に小型化する点術は現状の技術の延長線上にない。現状のロボットの腕、手を見るとき、特定の作業に限定して、それに適合する動作のみを抽出し、それに合う機構を考案することにより精度、経済性、信頼性、安全性などを確保しているのが実情である。

中でも把持対象物が柔軟な材質の場合は、それを把持するための指の形状、動作などを工夫することに合わせて、その把持力をコントロールする必要がある。また局部的に応力集中すると破損したり、変形したりする物体を把持する場合は手自身の材質を柔軟にしなければならない。このような材料の開発とそれに動力を伝達する構造部材の開発も大きな課題である。この様に知能ロボットの腕や手に要求される新しい開発課題を産業界全般にわたって、実際にロボットを製作しているメーカー、またロボットを使用しているユーザ、また今後使用しようとしてしているユーザ等よりアンケートにより抽出した。

#### (1) 小型、軽量化

腕における開発すべき要素技術の中では小型軽量化への要求が強い。小型軽量化するための手段としては新しい材料の開発によって達成することを望む声が多い。例えば炭素繊維などを用いることにより現状のアルミ材の比重よりさらに1/2程度までの軽量部材の開発により可搬重量と腕の自重比を現状の技術において10~15程度あるものをせめて1:5までもってゆきたいとの要求がある。即ちこれは人間における可搬能力に近づけることである。ただしこの場合にも可搬する対象物の重量などはユーザにより使用目的が異なるため統一的な値はでない。

#### (2) 高精度化

開発課題の中で次に多いのが高精度化である。繰返し精度1 $\mu$ mを要求するもの、これは精密な嵌め合い作業などに使用する技術となろう。また50 $\mu$ m程度を要求する場合、これは溶接やパレタイジングなどの仕事をしている企業からの要求で現状の精度を1/4~1/8にすることで品質の保障を確保したいとするものである。

#### (3) 多自由度化

高精度化と同等程度の要求が多いのが多自由度化である。手先を除いて現状の高級ロボットにみる6自由度をはるかに上回る8~10の自由度を求めている。これは工作物に対する多方向からのアプローチを可能にすることにより現状で不可能な複雑な仕事を自動化するためである。例えば切削加工における切屑の処理がある。現状では機械のテーブルに布積したもの、あるいは床面に散乱したものなどは作業員により回収しているのが普通である。これなどを人手と同じように多方向からむらなく回収作業を可能にすれば機械加工工場における無人化の手段が一つ完成したことになる。

また組立作業においても、特に多品種少量生産品などは構成部品の精度が高く、部品の形状も複雑なものが多いなどの理由で一般には人手に頼らざるを得ない。このような生産量の少ない製品に対して自動化する場合、多機能、多自由度を持ったロボットがあれば数工程の作業を一台のロボットで分担が可能となるために、設備費を低減することができる。また作業スペースなどの面でも有利となる。

#### (4) 高剛性化

ロボットの腕に要求する高剛性化技術は腕の軽量化に伴い構造材の材質を鉄系からアルミ系へさらに樹脂化、あるいは複合材料へと発展することにある。しかし反面剛性の低下が問題となる。そのため高剛性の研究開発が重要な課題となる。腕の構造として関節部の多次元方向への動きを可能にする関節メカニズムにおいては、外力の作用に対しその姿勢と位置の精度を確保することは非常にむづかしい技術である。

#### (5) 高速化技術

高速化への要求は現状の1m/secのロボットアーム先端の速度をさらに高めることにある。この速度は最高瞬時速度であるため、人間の作業動作のように速度の変化時の対応がスムーズでないとなると人の競争に勝て

ない。そのためこの最高速度を現状の2～3倍まで高める要求がでている。

#### (6) 手の技術

手の機能はその指によってその機能を代表している。指は2本を対向させ同時作動により物をつまみ、位置を決め、時には道具を持つことにより所定の作業をするのが、人間の行う様な複雑で高度な仕事を精巧にするには3本以上の指とそれを多関節化し自由度を増す必要がある。指に要求する作業の中でも単に物をつまみ上げるだけでそれ程位置や姿勢の精度を要求しない場合も多いが、現状の人間が行っている作業の中で組立や仕上げの最終工程においてはその作業が製品の品質を決定している。ここでは人間の指先の機能として動作と感触を併用して始めて作業がなし得るので、人間に代っての自動化機械の開発が遅れているのが現状である。

#### (7) 指の技術

指に対しては多次元的な複雑な動作ができる多関節を持つ3本以上の高度な要求が強い。

それは吊り上げる、つまみ上げるなどの単純な動作は指の形態をとる必要はなく簡単なフック状の部材で対応できているため、やはり人間の指の様な動作ができる構造の開発により、より高度な作業を自動化させたいとの要求である。

人間の指の動作をみるに屈曲、伸展する筋の伸縮作用で把持動作をしているため、現状技術のワイヤー駆動でリンク材を作動させている方法では到底人間の指に匹敵する剛性は出し得ない。このため材料の開発とアクチュエータの開発とを合わせた新しいメカニズムの開発が望まれる。

#### (8) 手首の技術

手首は指の働きの多方向性のために必要であるが指の構造、材料の開発に比較し開発の要求は低い。

### 3-2-2 移動機能

現在の産業用ロボットにおいて欠けている重要な機能の一つに移動機能がある。動きまわって作業するロボットは将来のロボットの最も一般的な形態となるであろうことが予想される。したがって現時点において移動の機能を飛躍的に向上させるべく、その技術的ニーズ、シーズをを調査研究しておくことは、大いに意義のあることであろう。

移動機能には大きく分けて表面移動機能と、空中移動機能と水中移動機能があるがここでは表面移動機能について述べる。

#### (1) 表面移動機能

表面移動機能を実現する方法としては、大きく分けて車輪形表面移動方式を歩行表面移動形式に分けられる。キャタピラ式や軌動式、磁気浮上軌道式、懸すいモノレールなども前者に含まれよう。特殊なものとして空気浮上式表面移動方式が考えられるが、制御性に乏しい一面があり、ここでは検討の対象としない。

前者の車輪形移動方式の最大の特徴は、効率の良いことにある。したがって歴史も古い。一方後者の歩行形移動方式は一步一步歩を運ぶことに本体の重心が変動することを避けられないため、移動に伴うエネルギーのロスが大きい。ところが、生物界に見られる表面移動方式において車輪形移動方式は皆無であり、機械すなわち人工物特有の機構であるといえよう。

車輪形表面移動式において検討を要すべき特性として、移動性、高速性、高位置決め精度性、高侵入性、登板性、階段登降性、悪路走行性、耐荷重性、高信頼性、省エネルギー性、などがある。以下、これらのいくつかにつき検討を加える。

##### 1) 移動性

移動性とは、平面をいかに自由自在に動きまわられるかということである。したがって操舵機構と大いに関係がある。

従来最も多く使われてきた操舵機構は、自動車に見られるような、前2輪又は前1輪のみを操舵輪とし後2輪の方向を固定する「自動車形」のものである。この自動車形は高速走行性、信頼性、駆動性などにすぐれているため、自動車のような移動車の機構として最も適したものであるが、横や斜めに動けないという大きな欠点があり、ロボットの移動機構としては大きな不満がある。

もう一つの従来から広く使われてきた操舵機構は、車イスや移動ロボットによく使用されている「両輪独立駆動方式」である。キャタピラも操舵方式に関してはこの方式と同一と考えられる。この両輪独立駆動方

式は、その場で向きを展開することによりあらゆる方向へ動き出せるというすぐれた特徴がある。しかし、この方式も自動車式と同様に正面を向いたまま直ちに真横に移動するということができない。

これらの二つの従来形操舵方式に対して、これらの二つの操舵も可能であり、かつ真横にも動ける「全方向移動機構」が機械技術研究所の中野により提唱され、中野・新井らによりプロトタイプが開発されている。この全方向移動機構はドッキングなど精密な位置方向決めが必要なところに特に有用であり、平面上を移動する移動ロボットの足まわりとしてすぐれている。

この他、六車によりプロトタイプが開発されたトロコイド車も組合せによっては全方向移動性を有することも可能であるものの、高精度な位置決めを要する場合には不向きであるし、エネルギーも多く消費するという欠点がある。反面、進行方向や速度の大まかな制御がレバー1本でできる簡便さがある。

## 2) 高侵入性

高侵入性とは異様な言葉であるが、狭あいなところとにかく容易に侵入できるかということを表す。狭あいなところとは、狭い通路や細い管路のとである。

高侵入性を有する移動機構としては、東工大の梅谷・広瀬らによりプロトタイプが開発されたいくつかのヘビ形移動機構があり、原子炉内の点検保守ロボットなどへの適用が期待される。

また、マーシャルにより提唱されたIPRIV (In Pipe Remote Inspection Vehicle) は、パイプ内の狭い間隙を移動するのに適した特殊な機構を有し、注目される。また、東芝により開発された3次元面流路を永久磁石を組み込んだ車輪で移動する移動機構も、やはり管路内移動方式として注目される。

## 3) 階段登降性

階段登降性能は、現在の車輪形表面移動機構において欠落している最も重要な機能であり、早急に解決されることが望まれる。関谷により提唱された方式、東大の高野らにより研究されている方式などがあるが、実用性の見通しが疑問視されるとの声もある。今後の大きな課題である。

### 3-2-3 アクチュエータ

#### (1) アンケート結果の概要

アクチュエータのシーズに関しては、30件の回答が寄せられた。これを制御・駆動の方式・媒体によって分類すると

方式・媒体を明記せず…6件

油圧…5件

電気…17件

空圧…1件

形状記憶合金…1件

となる。また開発の対象となっている技術項目より全体を眺めてみると

6-1 小型軽量…25件

6-4 高精度…20件

6-5 高信頼性…17件

6-3 高出力…9件

6-8 トルク可変…8件

6-2 多自由度…11件

6-7 高効率…5件

6-6 低摩擦…3件

となっている。

方式・媒体を明記していないものも実際には、油圧又は電気による形に帰着するであろうと推定すれば、ロボット用アクチュエータの改良は徒来から実績のあるこれらふた通りの制御・駆動媒体をふまえて一層の運動性能の向上(6-1、6-3)をはかるとともに正確な軌跡運動やポジショニング(6-4)を実現し、信頼性を高める(6-5)ことを指向していると判断してされる。

また、技術項目を性能の改良・向上につながるもの(6-1、6-3、6-4、6-6)、機能の改善につながるもの(6-2、6-8)、信頼性(6-5)、効率(6-7)と分けて眺めると、性能57件、機能19件、信頼性17件、効率5件となり、性能向上に対する意欲がずば抜けて強い。これはインテリジェンスを賦与された次世代ロボットにおいても、機械としての基本性能が重視されていることを示しており、頭も良いが身体強健なことが重視される人間社会と同じパターンとなっていて興味深い。

極言すれば、優秀な知能ロボットを開発するためには、すぐれた性能のアクチュエータを開発することが不可欠である。

## (2) 方式・媒体別にみたシーズ指向の特質

### 1) 材料・媒体不問

ここでは全回答者が小型軽量化を指示しており、他の技術項目を断然圧している。

知能ロボットのトータルパフォーマンスを追従する立場に立てば、方式・媒体は問わないから、小型軽量のアクチュエータを獲得したいということでこのような回答パターンとなったものであろう。後述するように材料に関しては1件の回答しか触れていないが、電気、油圧、あるいはその他のさまざまな方式によっても、アクチュエータの小型軽量化においては材料技術が重要な役割を果たす。高性能な材料の低産化あるいはすぐれた特性を具えた新材料の開発も忘れてはならない。

また件数は多くはなかったがトルク可変（可変ゲイン）が指示されている。知能ロボットの特質とも言えるアダプティブな動作の重要な要素としてトルク制御が考えられるので特に指摘しておきたい。

### 2) 油圧

回答は分散しており指向をつかみ難い面があるが強いてあげれば、小型軽量化と高精度化が重視されており、これをマイクロプロセッサ等を含むサーボ系の中で制御弁の改良とアクチュエータの小型軽量化によって実現しようとしているように思われる。

### 3) 電気

油圧とほぼ同数の回答があったがこちらで特徴的なのは、高精度化と高信頼性とに明瞭な集中が見られることである。これは、ある程度の出力となると経済的に正当化しうるコストで使用しうる磁気材料が定まっており近年中に現在より格段に科型軽量な、あるいは高出力なサーボ用モータを開発することが困難なことを反映しているように思われる。

また、モータサーボ回路（方式）の開発に主眼があると思われるものが2、3見付けられそれぞれ異なった形式のモータを対象としている。

さまざまな形式のモータをその制御ユニットと合わせて開発しておき、ロボットそれぞれのニーズによって、それらの特性をうまく生かして応用していくことが望ましく、各社の開発はこれを反映しようとしているようである。

### 4) その他

媒体、方式分類によれば以上のほかに空圧シリンダに関するものと形状記憶合金に関するものがそれぞれ1件づつあり小型軽量化と高精度、ならびに小型軽量、高出力と高信頼性を指向している。

また以上とは異なった観点からは、特定分野におけるロボットの応用のために、従来の制御、駆動の媒体・方式の壁を何らかの形で打破しようと企てているものがあることを指摘できる。“生検用カテーテルの微小移動機構”と“体表面移動の駆動システム”とがそれである。

これらにおいては材料技術と材料特性を活用するための機構設計製作技術が重要な役割を担う。またこの種の開発においては、その用途に即した特化技術の開発が必要であろう。

## (3) ニーズから見たアクチュエータ技術における開発問題

ロボット業界は、かなりのスケールに成長し、しかも急成長を遂げつつあるがアクチュエータを製造・供給するサイドから見たとき、未だ主要な消費マーケットを構成する所まで来ていない。アクチュエータ技術の開発シーズが比較的貧弱なのは主に上のような理由からである。他方、次世代ロボットの開発のためにどのようなアクチュエータ技術の開発が必要とされているかを眺めてみると広範囲の技術領域にわたってきわめて強いニーズが表明されており、しかも現状の技術水準から大巾な飛躍を要求する、きわめて高水準の要求仕様が数多く含まれている。

このような、シーズとニーズのかい離を解消し、次世代ロボット開発の基盤を整備するためには、下記のような事柄に十分な配慮をしつつ開発課題の設定を行なう必要がある。

A. 各分野でそれぞれ独立に発達している技術的資源をロボット・プロパーのニーズに立却して効果的に組合せ、汎用性に富む標準品として供給され得るようにする。

B. アクチュエータをそれらの周辺に関連要素（たとえば、フィードバックセンサ、コントロールユニット等）と組み合わせた機能モジュール（たとえば関節モジュール、車輪モジュール）とし、標準化されたインターフェースによりブラックボックス的に制御しうるようにする。

C. さらにアクチュエータ、フィードバックセンサ等のハウジングとロボット自体のボディとを別個のものとする。

せず、単一のモジュールハウジングとして一体化を行ない機械的にも機能モジュールとしてブラックボックス化する。モジュール内部では連結部品類は不可欠のものを除いて極力排除し構造の簡素化と軽量化をはかる。

D. 最近開発された材料あるいは、近年中に実用化される見込みのある新材料を活用してアクチュエータ自体の実質的な軽量化、小型化をはかる。

これらの指向を踏まえつつ各種のアクチュエータに関する開発課題を抽出すると下記のようなものとなる。

#### 1) 小形・軽量化と高出力化

##### ① 電気アクチュエータ

稀土類磁石に代表される高保磁力材と融体超急冷法による高飽和磁束密度材とを組み合わせた永久磁石形DCサーボモータは適切に設計されたサーボ増巾器によって制御すれば大巾なピーク出力の向上が可能となり電気ロボットアームの運動性能の向上が期待される。パルスモータの性能の向上もこれらの新材料の活用によって行うことができる。このような新材料は定格250W以下程度の比較的小形なモータに対し有効であると思われるが形状 また、より大出力の領域に対応する電気アクチュエータの開発課題としては、現在1kw以下どまりであるブラシレスサーボモータを3kw位まで大形化すること、また適切な制御回路を開発実用化することにより、定格10kw以上程度の交流サーボモータを実現することなどがある。

いずれの形態にしても、ロボット用アクチュエータとしての電気モータの適合性を高めるためには、定格出力や最大出力が得られる条件における回転数を1,200~300rpm程度に抑え減速歯車の小形軽量化をはかるとともにモータ自身の慣性の影響を軽減することが重要である。

##### ② 油圧アクチュエータ

空間エネルギー密度が高く、トルク・慣性比が高い油圧アクチュエータは原理的に大出力高速ロボットアームのアクチュエータとして好適な特性を持っている。また関節アクチュエータとして好適な機構を持ったものも開発されている。しかし先に記したような市場メカニズムの障害もあって本格的にロボット用アクチュエータとして製品化されたものはほとんどない。

超ジュラルミン、カーボンFRP、チタン合金、マルエージング鋼等すでに他分野で実用化されている高強度・高剛性材料を活用し、さらに前出B、C項のようなインテグレートドデザインを給・排油路も含めて行なえば、出力トルク容量5~5,000kgm程度の大出力を要する分野において、軽量・小形・高応答の関節アクチュエーションサーボシステムを得ることが可能となる。

##### ③ 空圧アクチュエータ

小出力の領域において、空圧アクチュエータは本質的に小形・軽量で良好な応答を持っているが、制御性にやや難があり加・減速、位置決め精度の改善が必要である。前者に対しては気体の圧縮性という本質的かつ原理的な困難があるが後者については適当な位置センサとメカニズムなクランプ機構とを組合せれことにより、現在±0.3mm程度の位置決め精度を±0.1mm程度まで向上することができる。

##### ④ 超小形アクチュエータ、極小変位アクチュエータ

遺伝子操作等のマイクロオペレーション、半導体組立、マイクロメカニズム組立など微小作業用ロボット、マニピュレータおよびメソテーブル等においては0.1μm程度の動作分解能を持ち、バックラッシュのないアクチュエータが必要とされる。今後ますますニーズが強まってゆくこれらのロボット（マニピュレータ）は工業製品として提供されているコンポーネントがほとんどないため研究的に試作することさえも容易でない。このような障害を緩和するためには、流体を利用したマイクロジャッキ、形状記憶合金を利用した電熱アクチュエータ、電歪・磁歪材料を利用したアクチュエータ等の開発が必要である。またこれらのアクチュエータを使用するとき多くのばあい、高増巾率を持ったフォース（トルク）フィードバック系がバイラテラル性を付与するために必要となる。

#### 2) コンプライアンス制御によるアクチュエーション機構の柔軟動作と高精度化

アクチュエータ・サーボ機構の剛性を高め、摩擦ロスを小さくして裸特性を改善したうえで、可変ゲイントルク（フォース）フィードバックループによる特性補償を行えば、動作中必要に応じてループ特性を変えることにより、剛な高精度の位置決め動作と、柔軟なはめ合せ動作とが可能となりロボットアームの作業適合性の大巾な改善ができる。

##### ① 精密、高剛性減速機

現在サーボモータ用減速歯車として供給されているもののほとんどは位置決めサーボ用ではないので±30又はそれ以上のバックラッシュを持っていてそのままでは使用に耐えない。またバックラッシュのほとんどない特殊な減速機も1~2あるが、り剛性が低く、摩擦が大きく高性能なサーボ機構を組み立てるには性能的に不十分である。入力軸と出力軸とのいくつかの位置・方向関係の減速機で充分な出力軸負荷容量を持ち、

出力側から見たバックラッシュが±1'以内、ねじり剛性が±5'／定格トルク以内程度の小形軽量な高性能低摩擦減速機が標準製品として供給されることが望ましい。

## ② 低摩擦シール

現在、油圧サーボモータは中～小出力のものでは関連部品の寸法精度を高めスキマを僅小に保ったノンシール方式のものが開発されているが大出力のものでは熱および作動流体圧力による変形のためOリングタイプのシールが使用されていて低摩擦と低リークを両立させ、これ長期間維持する技術は未完成である。ポリイミド、炭化水素系等の高性能樹脂を対象とする精密形状賦与技術が開発され、マルチランドタイプのリップシールが実用化されれば低出力の低差圧時にはきわめて低摩擦であってしかも高出力の高差圧時にはリークが増大しない高性能シールが得られる。さらにこのようなアクチュエータのハウジングに内蔵しうる、最高出力210kg/cm<sup>2</sup>、ダイナミックレンジ1～1,000程度の小形圧力センサを装着すれば、すぐれた可変コンプライアンスアクチュエータが得られる。

## 3) 多自由度複合アクチュエータ

現在得られるほとんどのアクチュエータは、単一の1自由度アクチュエータである。少数の2自由度複合アクチュエータも販売されているが各軸をそれぞれ独立に制御しうる比例制御アクチュエータはない。これに対して、システム開発サイドのニーズは、3あるいはそれ以上の多自由度アクチュエータを求めている、アクチュエータ技術の分野において、ニーズとシーズとの間にもっとも大きな懸隔のある項目となっている。

① ロータリ・リニヤ複合ステップモータ回転子をグループスロットタイプとし、これに対応した4相ないし5相の励磁コイルをステータに配置することにより、小出力ながらアーム先端部用アクチュエータとして便利なものが得られる。

## ② 球面モータ

回転子と固定子の対偶を球面とした球面パルスモータは、励磁コイルの配置を工夫することにより、直交2平面内における揺動と、一軸上のローテーションが可能となり、上記のロータリ・リニヤタイプモータよりさらに拡張された機能を得ることが可能となる。対偶面に停止時に相互噛み合いを可能とする形状を与えクラッチメカニズムを組み込むことができるなら保持トルクを格段に大きくでき一層有用なものとなる。

## ③ 油圧式複合サーボアクチュエータ

出力軸とロボットアームメカニズムの間に減速機構を挿入しなくてもすむ油圧サーボアクチュエータは大出力の設計が容易なこととあいまって、多自由度複合化に好適であるが現状では標準化された製品として提供されているものはない。

研究室的にはすでに平行する2平面内の2つの軸を直交配列した2軸揺動タイプ、2つの軸が一平面上で直交する屈伸・回転タイプあるいは、ふたつの揺動運動の中心が一致する差動歯車付シャム双生児タイプなどいくつかの2自由度ロータリ形サーボアクチュエータが試作され、多くのリファインアップの余地が残されているものの、基本的には実用化の見通しが立っている。これらは同一ハウジングの中に2つのアクチュエータを組み込んだ設計が可能であり、さらにもう1つのサーボアクチュエータを附加することで3自由度までレベルアップすることも可能ではない。

## ④ ホイールサーボユニット。

アクチュエータの多自由度複合化はアームのみでなくロコモーションユニットにおいても必要である。車輪によるロコモーションがもっとも広く利用されるであろうがここで電気サーボモータと減速機とロータリエンコーダとを適正に整形し、車輪に組み込んだモータホイールとし、さらにその支持架にステアリング用サーボモータを組み込んだものの開発が行われればロコモーション付きロボットの設計を容易にするのに非常に有効である。

## 4) アクチュエータ周辺機器

① スイッチングサーボ回路のモジュール化ないしはIC化およびこれと高速パワースイッチング素子（例えばMOS-FET）とを組み合わせたサーボモジュールの実用化。

② 最適制御および学習形最適化アルゴリズムをファームウェアとして内蔵しているマイコン化サーボ回路のモジュール化。

③ 標準化された各種サーボモータの軸上にスタックマウントできるパンケーキ形エンコーダ、タコゼネレータ、ポテンショメータ等のフィードバックセンサと減速機の標準化。

④ ICレベル（オープンコレクタ○rドレイン）で直接制御可能な16連、8連ならびに単独の超小形2方向切換弁およびパイロットチェック弁。

⑤ 作動油汚染に強く、マイコンで直接制御できるロータリサーボ弁。

⑥ 5～10個程度の電気サーボモータとフィードバックセンサとの集合アセンブルでケーブルワイヤを介し

て離れた所にある把握機構等の複雑な機構を作動されるサーボユニット。

#### 3-2-4 ロボットの構造用材料

ロボットの構造用材料はロボットが十分な可搬能力を持って高速で且つ高精度に動作できる強度と耐久性を必要とする。またロボットの使用される環境が常温の範囲を超える場合、また雰囲気が空気中でなく海中とか真空中などによって材料に要求される性能は大きく変わる。そのロボットの使用される作業目的およびその使用環境などを考慮して適切な材料を選択する必要がある。

以下材料に要求される構造面からみた必要性能を分類してみると

##### 1) 強度、剛性上の性能

- a) 本体、アーム、手などの外板補強材料として、アルミニウム以上に比重が小さく剛性は炭素鋼以上に高い金属材料
- b) カーボンファイバー、ホイスカ（単結晶繊維）などの補強材料と樹脂との複合材料で比強度が高張力鋼を超えるもの。

##### 2) 環境上の性能

- a) 100°C以上の高温雰囲気中で長期間連続稼働しても変形、変質しない材料
- b) 0°C以下の低温雰囲気中長期間連続稼働しても強度上の変化がない材料
- c) 電気ノイズなどの影響を受けにくいシールド効果の高い材料

##### 3) 耐蝕性能

- a) 海中、泥中などの悪環境下で腐蝕しない材料

##### 4) 潤滑性能

- a) 回転部・摺動部において無潤滑が可能な材料

##### 5) 物体把握性能

- a) 変形し易い物体の把持を確実にするための摩擦係数の高い材料
- b) 複雑な形状の物体の把持を確実にするために柔軟性が高く、無把持時には完全に復元する材料

### 3-3 制御・情報処理

#### 3-3-1 制御機能

高度自動化機械は、高度の感覚、認識機能をもつ機能ロボットであり、感覚・認識機能とともに制御機能においても高度の技術が要求される。

高度自動化機械の現状でのベースであるNC機械やロボットでも、これまでに多くの制御技術が利用されてきた。制御方式の面からみた場合、その従来のロボットで利用されてきた技術を樹木講造的に表わすと、表3・3・1のようになる。

さらに、制御のための

各種センサ技術

電気、油圧、空圧、など駆動技術

サーボ増巾器、特性補償器などの制御要素技術

計算機などの情報処理技術

などが利用されてきた。

高度自動化機械では、これらの従来制御技術が必要なことはもちろんのことであり、さらに高度知能機能をうるために高度な制御技術が要求されると考えられる。それは、高度化機械では従来ロボットにも増して

広範囲で複雑な動作

高速でなめらかな動作

高精度・高信頼性

小形・軽量

容易な動作教示および修正

問題解決、学習機能、環境変化への適応

などが要求されるからである。

これらの要求を満たすための制御技術を、制御方式の面から整理すると、つぎのようになる。

- 1) 協調制御
- 2) 遠隔制御
- 3) 階層制御
- 4) 分散制御
- 5) その他

これらの技術は、表3・3・1に示した従来のロボット制御方式と共務して、制御の高度化に役立つものであり、その特徴は

多変数

複雑

広域

高信頼、高安全

なシステムを対象とした技術に共通して要求される技術である。

1) から5) にあげた各サブテーマについて、長期的に研究を要する事柄を以下にまとめる。

#### (1) 協調制御

人間が機械の組立てを行うとき、左手で台をおさえて右手で組付け、はめこみ、ねじ止め、などをする。とくに組立て対象がゴム、布などを含む柔い物体の場合は、左右の手の力や加え方や、動きには特別の協調が必要である。

従来の産業用ロボットは一般にアームが1本であり、比較的単調な動作で用が足りる場合が多い。高度自動化機械では、上記の人間による組立て作業のような高級動作も機械でやらせることをねらいとするので、機械は2本以上の複腕となり、ここに複数の機械アームの共同作業、協調制御が必要になる。

具体的な研究課題としては

- 1) 2本腕の協調、複数台ロボットの協調
- 2) 2個のアクチュエータによるパターン追従協調制御
- 3) 複腕による部品のはめ合い
- 4) リハビリテーション時における患者の筋力回復訓練ロボット
- 5) 複数アームの相互干渉防止制御

などがある。

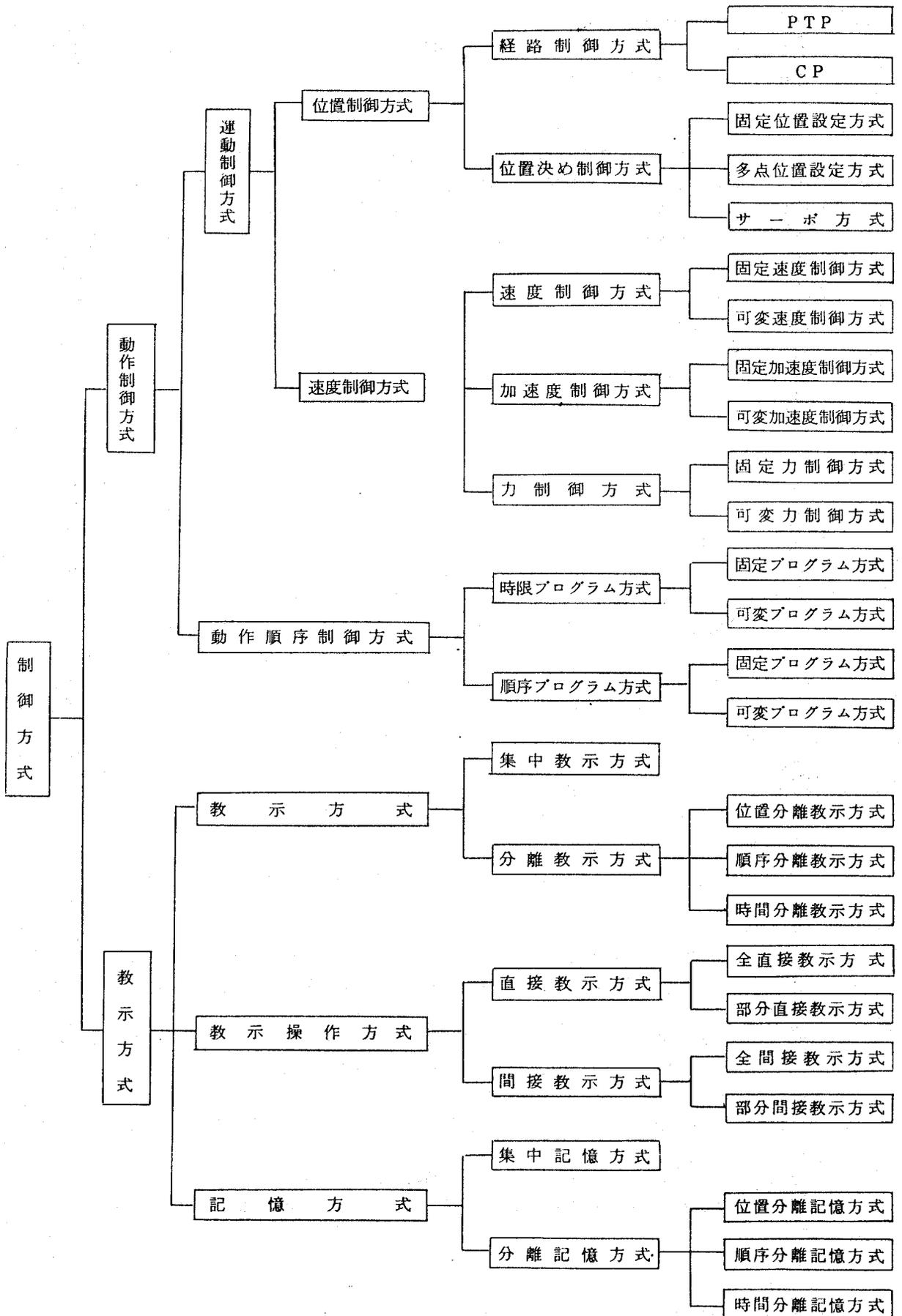


表 3・3・1 産業用ロボットの動作制御方式

なお、1本腕のロボットでも、空間の図形を正確に追従するような用途では径路制御が必要となり、1本腕の多自由度運動間の協調制御が課題となる。

これらの問題に対する協調制御について、従来、一部には試験研究の試みもあるが、信頼性をもって実用になる手法は、まだ開発されていない現状である。

## (2) 遠隔制御

海中作業、原子炉内または放射線汚染のおそれのある現場作業、悪環境下での作業、宇宙空間での作業、等人間が近付けない現場での機械作業の制御には遠隔制御が必要となる。スイッチのON、OFF、TVチャンネルの切換えなどの単純作業のリモートコントロールは従来から実用になっているが、高度自動化機械では、制御対象が複雑で項目数が多く、しかも安全性、信頼性を要求されること、などから従来技術を越えた新しい遠隔制御が必要になると考えられる。

具体的には課題としては、

- 1) 無線による管外からの操縦
- 2) 移動ロボットの高速無線制御
- 3) 海中ロボットの遠隔制御
- 4) 原子炉点検修理ロボットの遠隔制御
- 5) 宇宙船用ロボットの "

などがある。

## (3) 階層制御

システムの大規模化に伴って、制御すべき変数の数が増すが、各変数の重要性や緊急度、具体的データか管理データかの差異などによって、システムを階層的に構築して管理制御する必要が生ずる。

階層制御の概念は大規模計算機システムや大規模社会システムの制御に応用されているが、高度自動化機械システムでも規模重要性によって階層制御が必要になると考えられる。さらに、情報処理を主とする計算機システムと異なって、高度自動化では、実際の機械的動作を対象とし、運動力学をはじめとする物理的現象の結果をみてから高度な判断を下し制御する必要性があるために、従来にない新しい制御因子が加わってくると考えられる。具体的な課題としては、

- 1) 2足ロボットの歩行制御、マルチコントローラによる階層制御、適応制御
  - 2) 個別ロボットの総合システム化
  - 3) 2台以上のロボットと協調制御と上位コンピュータとのデータ交信
  - 4) 複腕・複数台ロボットによる協調組立作業における、機能別階層、分散制御システムのモジュール構成、データ構造と相互の高速大容量データ伝送手段
- などがあり、上記のように、協調制御や、適応制御などとの併用によるシステム構築が課題となる。

## (4) 分散制御

システム規模の大型化による制御の複雑高度化と、LSI技術の高度化によるマイクロコンピュータの小形化、低コスト実現によって、機能自由度増域の容易さ、機能集中の危険分散などの立場から、分散制御の要求が生じてくる。

階層制御と同様に、計算機システムの分野では分散情報処理が行われている。高速自動化機械では、その技術をベースにして、さらに知能ロボットとしての知能の分散制御化を目的に発展させる必要がある。

- 1) 5台以上のマルチプロセッサによる分散制御
- 2) 知能ロボットの各機能をスタンドアロン化し、必要な機能だけを取り出して組立てなどの目的に応用するシステム
- 3) 1制御モジュール1自由度サブシステムの分散制御モジュール化
- 4) 教育用などを目的とした国際データ通信網を通じての国際的分散制御による高度化自動教育システムなどがある。

## (5) その他

高速自動化機械の制御技術として、以上のほかに、

- 1) 高度なマスタスレーブ制御
- 2) 生体関連機械におけるバイオフィードバック制御

3) システムの自己診断における標準値と現在値との比較校正処理制御などの課題がある。

### 3-3-2 知能機能

ロボットの知能に関する研究はまだ緒についたばかりである。現状の産業用ロボットの実用化の種々の問題点や、人工知能の基礎研究から、今後の研究開発の対象となる内容が提起されている。

大きく分けて、その1つは知識データベースの構築である。人間の持つ知識を再利用可能な形で表現し、蓄積し、ロボットで活用できるようにするための有効なシステムの研究開発である。他方は認識・判断・推論の問題である。視覚や触覚などの感覚器から得られた情報をもとに、作業対象や環境を認識し、さらに一歩進めて、次に行うべき作業手順や方法を自分自身で決定できる能力の研究開発が対象とされている。ここでは、学習機能が重要な役割を果たすとともに、前記の知識データベースとも溶接に関連した取組みが必要とされる。

以下に、今回の調査で提起された要素技術の個別内容について述べる。

#### (1) 問題解決システム

機械装置類の故障診断等への適用を対象として、知識データベースと推論プログラムの研究開発が提起されている。特に、環境と対象の知識表現、推論知識の表現形式とその知識活用システムが重要なねらいとなっており、推論言語としてのPROLOGなどの応用が期待されている。また、視覚情報の認識においては、動画画像の中の変化の意味・内容を理解して自然言語で表現するシステムや、移動ロボットの環境認識による径路決定や、作業手順の決定などが研究内容として設定されている。

#### (2) 学習機能

人間のくり返し作業による学習過程を解明し、これをロボットに適用し、センサ情報を総合的に判断して作業の習熟を行う実用システムの研究開発がねらいとされる。また、学習と類推性能を用いて、3次元物体のコンピュータモデルの自動作成を行うシステムや、異形文字や図形の識別・判読を行うシステムの開発も対象となっている。

#### (3) 作業・環境に関する知識の利用

この分野の研究対象の1つは、熟練技術者の作業のノウハウを何如にデータベースに蓄積するかということがねらいとなっている。特に精密組立やアーク溶接作業がその対象になっている。一方、前記学習機能とも関連しているが、視覚機能をもつ移動ロボットにおいて、作業環境の風景や特定者を認識し自己の位置・方向を固定する実用的システムの開発もねらいとされている。

#### (4) 知識の利用

知識の利用は知能ロボットの最も基本的要素の1つであり、前項までの内容も全てこれを含んでいる。現在、数値情報によるデータベースは確立しつつあるが、今後は、図形、画像、文字、音声などを伴うデータベースの構築が大きな研究開発の分野として挙げられている。

### 3-3-3 ロボット言語

ロボットの作業記述を行うロボット言語として既に種々のレベルの言語が開発され、あるいは開発されつつあるが、その実用化の現状は、組立作業等を対象とした簡単な動作レベルの言語が使われ始めたところである。

今回の調査結果からみた言語研究のシーズサイドのねらいとしては、作業の記述能力の向上とマン・マシンインタフェースとしての使い易さということが特徴となっている。

以下に個別の言語レベルで提起されている研究開発内容について記す。

#### (1) 動作レベル

現在、実用に供されているユニメーション社のVALを1つのベースとして、更に機能向上をねらった開発が設定されている。例えば、図形情報と作業指示が簡単に記述できること、インプロセス・センサによる適応動作が任意に記述できることなどが挙げられている。一方、音声入力による電動義手用の言語も開発対象

として設定されている。

#### (2) 対象レベル

ロボットの作業工程や対象ワークの形状データをもつ上位CADシステムと結合した言語処理システムの研究開発が提起されている。このシステムでは、CADとの結合により、複雑な作業環境や作業内容の記述能力の大幅な向上がねらいとされる。マン・マシンインタフェースの機能の面においても、3次元ディスプレイを用いて対話方式で言語開発が可能なシステムの開発も対象となっている。

#### (3) 作業レベル

このレベル言語としては、人に作業指示するのと同じ程度の容易さで使えることがねらいとなっているが、その言語処理には前記の知能機能が含まれる高度な技術展開が必要とされる。

#### (4) その他

ティーチング機能は、人間とロボットとの間の協調作業を伴うものであり、その操作性の向上が開発対象として設定されている。ロボット言語の処理の中でのティーチング機能の果たす役割も重要であり、これを有効に組み込んだ使いやすい言語の開発も対象となる。

### 3-3-4 情報処理機能

#### (1) 高速処理

要素技術的には素子、プロセッサ、ソフトウェアなどに分類される。

##### 1) 素子

GaAs-IC高速演算素子が研究対象であり、視覚用前処理、動作制御、座標変換などが適用目標となっている。

##### 2) プロセッサ

制御周期20ms以下、ビット数32～48の高速プロセッサが研究対象となっている。また多次元センサ情報の高速処理も上げられている。適用目標としては組立作業等における部品等の位置、方向、形状を認識させ、あるいは、作業環境の条件変化に適応可能な制御を実現させるとしている。

##### 3) ソフトウェア

上記の作業環境の条件変化に適応可能な制御を実現させるために、多次元センサ情報のオンライン高速処理アルゴリズムが研究対象となっている。

##### 4) ニーズ

火災の消防ロボット、原子力プラントの設備保全ロボット、あるいは、腕時計製造工程におけるケースの傷検査ロボットなどの実現のため、多情報高速処理や小形のリアルタイム・パターン認識の研究が要請されている。

#### (2) 並列処理

プロセッサ、ソフトウェア、および、その他に分類できる。

##### 1) プロセッサ

作業環境の条件変化に適応可能な制御機能を実現することを目的として、多次元センサ情報の並列処理プロセッサが研究対象となっている。

##### 2) ソフトウェア

作業環境の条件変化に適応可能な制御を実現する相補的観点から、多次元センサ情報のオンライン並列アルゴリズムが研究対象とされている。また、タイム・シェアリング・システムのような形式でロボットの並列処理を可能とすることも研究開発の対象に取り上げている。

あるいは、最適給飼を行なわせて、飼育テスト(代謝試験)を代行させることを目標としている。

後者は、視覚と腕・手を持ち、ハンドリングができる移動可能なロボットを目標としている。このロボットの使用対象は、原子力プラントや医療施設が考えられている。

##### 3) ニーズ

実現させるべきロボットの必要仕様としては、今回のニーズ調査の中に該当例はなかった。

### (3) ロボット用オペレーティング・システム

ロボット用オペレーティング・システム研究の狙いとしては、高性能化、安価なシステム構成が挙げることができるといえる。その他の、特定目的のための個別システムも挙げられている。

#### 1) 高性能化

原子力プラントや医療施設での利用を目的として、視覚と腕・手を持ち、ハンドリングができ移動可能なロボットを実現する高度なオペレーティング・システムや、タイム・シェアリング・システムのような使い易い操作でロボットの分散制御を可能とすることも研究の対象としている。

#### 2) 安価なシステム構成

移載作業を行なうマイコン制御の油圧ロボットの情報処理を安価に実現するため、簡便なマイコン制御用オペレーティング・システムを対象としている。

#### 3) その他

海外をも含めたオフィス作業の教育ロボットが考えられている。このロボットは、教育資料の中から必要部分を効率的に抽出し、編集することを目的としている。このため、自動教育システムの構築用オペレーティング・システムが研究対象として挙げられている。

#### 4) ニーズ

自動車の製造工程における塗装組立を行なわせるロボットを実現するため、マルチ・コンピュータ用オペレーティング・システムの研究が要請されている。

### (4) その他

生体機能にかかわるロボットを想定して、マイコンによる入眠時点の判別と入眠制御、あるいは、マイコンによる人体の低インピーダンス点の検出とロボットの制御が研究対象に挙げられている。前者は、乳幼児の入眠促進ロボット、後者は、ツボを探してハリを打つロボットが考えられている。

また、下肢切断者に装着する能動義足を実現することを目標として、指による押ボタンスイッチの指令とシステムの状態によって義足の追従パターンを再生する情報処理機能を研究対象としている。

ニーズとしては以下のようなものがある。

原子力プラントの点検ロボットを実現させるため、移動の範囲の制約を取除く必要から、無線誘導伝送技術。

非鉄金属の全自動圧延ラインにおける品質向上のためのロボットの安価な情報処理機能。自動車の製造工程のうち、組立における製品の表面品質や組立品質の検査と品質の確認判断が行なえるロボットが考えられている。このためのオンライン・データの連続比較処理機能。

林業においては、樹木の成育状態の調査を行なうロボットが考えられており、毎木調査の作業結果を記録する機能。

### 3-3-5 ロボット制御方式の事例

#### (1) 軌道制御とそのソフトウェア・サーボ

この方式はスタンフォード大学で開発された制御方式であり、ロボットを高速で、滑らかに、かつ、精度よく動かす際有効である。

図3・3・1に示すようにロボットハンドを始点Iから終点Fへ動かすことを考える。運動の始点や終点はテーブルや他の物体に近いことが多いので、不用意に動かすとそれらにぶつかることがある。これを防止するために、始点と終点の近くに、それぞれ安全な経由点D、Aを設定し、ここを必ず通過する様にする。また、必要に応じ、他の経由点Vも設定する。即ち、ハンドの動きをI→D→V→A→Fという点列で代表し、これを結ぶなめらかな軌道を計画しようというわけである。

まず座標変換を行って、上記各点に対応する関節角の値を求める。それを各関節別にプロットすれば図3・3・1の右のようなグラフが6枚得られる。各関節とも、これらのプロットを時間tの多項式を用いてなめらかに結ぶ。グラフをID、DV、VA、AFの4区間に分割し、始点と終点で速度と加速度が0、中間の点では速度と加速度が連続という条件を追加する。そうすると、最初と最後の区間はtの4次式、中間の区間はtの3次式を仮定すれば、うまくこれらの多項式の係数を定めることができる。このようにして、静止状態から、なめらかな加速・減速を行って、静かに終点へ到達する軌道が、各関節毎に計画できるわけである。

計画された目標軌道をできるだけ忠実に追従させるためには、サーボも、通常よく使われる比例微分制御の様な簡単な方法では不十分であり、いろいろな工夫が必要である。まず、アームのコンフィギュレーション

(アームがどのような形に制御される)かによって、各関節のサーボ系における等価慣性モーメントが大きく変動する。アームのコンフィギュレーションに関係なく、常にサーボ系の動特性を一定に保つためには、目標軌道に沿っての慣性モーメントの変化を計算で求め、それに基づいてサーボのパラメータを適応制御することが望まれる。

アーム自身の重力の影響は、サーボに大きな定常偏差を引き渡す。重力の影響もアームのコンフィギュレーションによって変化する。アームのコンフィギュレーションが与えられれば、重力が各関節に及ぼすトルクは静力学の計算で求められるから、それをキャンセルするためのトルクを各関節に加えてやれば、アームの自重の影響も補償し得る。また、アームを目標軌道に沿って動かすための加減速トルクも、目標軌道が予め与えられている場合には計算可能であり、この加速力のフィードフォワード補償により、サーボの追従誤差を改善するのに役立つ。以上のような工夫を組み込んだサーボ系のブロック線図を図3・3・2に示す。

## (2) 力ベクトルを制御するソフトウェア・サーボ

クランクを回すとき、定規で線を引くとき、面上をなぜ回すとき等々、手の運動の一部は道具の例から拘束され、一部は手の側から能動的に決められなければならない。作業空間で表した力ベクトルを手が発生する様に制御できるなら、上述の様な仕事の実現が容易になる。

図3・3・3に於いて $P_n$ を関節 $n$ の回転方向を示す単位ベクトル、 $T_n$ を関節 $n$ から手の規準点 $Ph$ への距離ベクトル、とする。 $P_n$ 点に作用する力 $F$ と、6つの関節トルク $T_{fn}$ との関係は、次式で与えられる。

$$T_{fn} = (T_n \times F) \cdot P_n \quad n = 1 \sim 6$$

アームの自重の影響をキャンセルするためのトルクは次式で与えられる。

$$T_{gn} = - \sum_{i=n}^6 (T_{ni} \times m_i g) \cdot P_n$$

ただし、 $m_i$ は $i$ 番目のリンクの質量、 $g$ は重力のベクトル、 $T_{ni}$ は関節 $n$ からリンク $i$ の重心へ至る距離ベクトルである。各関節のトルクを、 $T_{fn}$ と $T_{gn}$ の和になる様に制御してやれば、アームの自重の影響を補償したうえで、手に力ベクトル $F$ を発生させることができるわけである。

この方法をクランク回転作業に応用することを考える。クランクを回転するためには、常にクランクによって定まる円軌道の接線方向に力を加え続ける必要がある。 $f_t$ を接線方向に加えるべき力の大きさ、 $R$ を回転軸及び方向を表す単位ベクトルと $P_c$ をクランクの中心位置を表すベクトルとすれば、クランクを回すための力 $F_t$ は次式で与えられる。

$$F_t = f_t \cdot R \times (P_h - P_c) = \nabla I P_h - P_c I$$

ロボットアームの関節角の読みから $Ph$ が計算され、上式によりクランクを回転する為の力 $F_t$ が求まる。この力は前述の様に各関節のトルクに分解されて制御され、クランクをスムーズに回転する。このときの制御のブロック線図を図3・3・4にまとめる。

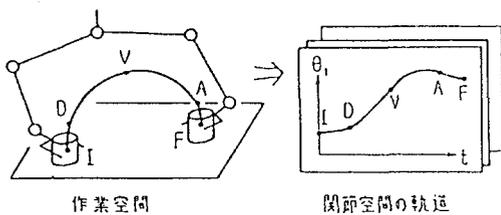


図3・3・1 腕の運動軌道の計画

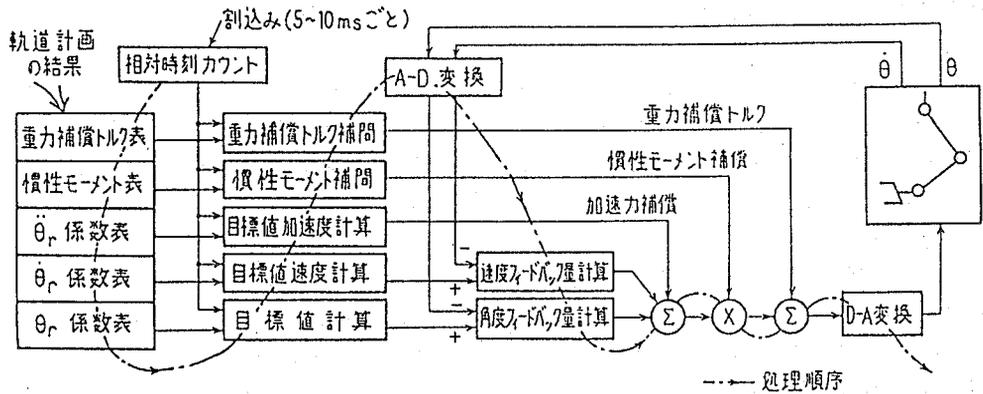


図3・3・2 軌直制御を行なうソフトウェアサーボ

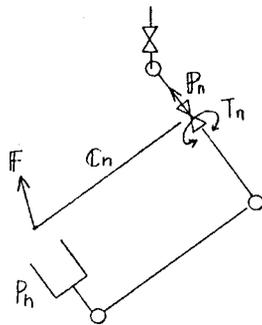


図3・3・3 トルクの分解

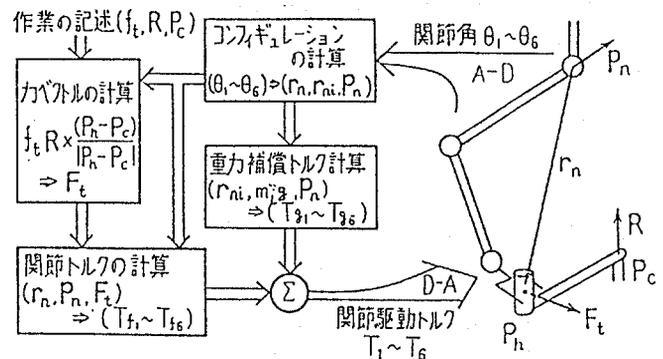


図3・3・4

(3) 仮想メカニズム (ソフトウェアによる作業向き自由度の実現)

多くの場合、作業は独自の構造を持っている。ある作業には直交座標型の腕が適し、他の作業には円筒座標型や極座標型の腕が適すると認められることがある。専用の機械では作業向きの構造に機械を設計すればすむ。ロボットには汎用性が要求されるので、ロボットの機械的構造と、作業の構造と一致することの方が少なくなる。では、例えば多関節の腕を、あるときは直交座標型の腕に、別のときは円筒座標型や極座標型へ、という具合に、コンピュータを使って、幾何学的にも動力学的にも腕の機構を組替えたのと等価なことが実現できないだろうか。この問に対するひとつの解答が以下に概説する仮想メカニズムの考え方とそれを実現するためのソフトウェアサーボである。

例として、図3・3・5のこぎりを使う作業を考えよう。この作業には図3・3・5に示す様に直交座標点h1, h2, h3が適する。今、多関節の腕を用いて、この様な仮想機構のサーボ系を構成することを考える。仮想した直交座標型の腕の運動はh1, h2, h3等の変動で表される。これをH変動と呼びベクトルHで表す。また、多関節形の腕の6つの関節角をベクトルθで表すと運動学的計算を行って、H変動の加速度をθを用いて表せば次のようになる。

$$H = J\ddot{\theta} + \dot{\theta}^T C \dot{\theta}$$

上式と、腕の運動方程式を用いてH変動の加速度と関節トルク (ベクトルTで表す) との関係を求めること

$$T = AJ^{-1}\ddot{H} + \dot{\theta}^T D \dot{\theta} + T_c$$

となる。ここでAは運動方程式の慣性マトリックス、JはHのθに関するヤコビアンである。Tcは自重による影響等、外部から加わるトルクであるが、これは、(2)、(3)の方式と同様に考えて打消すことができる。またθ<sup>T</sup>Dθは、かなり複雑な計算になるけれども、θと腕のコンフィギュレーションがわかれば計算で求めることができるので、そのトルクを補償することにより、第二項も実質的に打ち消される。

したがって上式は

$$T = AJ^{-1}\ddot{H}$$

となる。つぎにH変動に加える制御を見通しのよい形にするために $T = AJ^{-1}F$ で定義される操作量Fを導入する。FはH空間に関する正規化された一般力としての意味をもつ。Fを用いれば結局

$$F = \dot{H}$$

という極めて簡単な形に表される。これを成分毎に表せば $f_i = \dot{h}_i$ となる。即ち、本来複雑な干渉をもつ多関節形の腕の運動が図3・3・6に示す様な補償を加えることにより、H変動と呼んだ仮想座標系における6つの独立な運動感分に分解されたことになる。言い換えれば多関節の腕が、図3・3・5に示し様な直交座標形の腕にソフトウェアによって組替えられたことと等価である。

(4) その他

手の動的な制御を正確に実施するために、ある目標値系より(時間の関数)に対して制御してみて、そのときの誤差系列を測定し、それに基づいて、最初の目標値系列を修正する。この様な試行を数回くり返して希望する動的な動作を実現する為に必要な目標値系列を作成する手段、現代制御理論に基く観測器により、直接測定できない状態変動を推定してフィードバック制御することにより高い精度の制御と実現する方法など、いろいろな試みがなされている。

研究室レベルで提案されている方式は多くの場合、精密な理論に基く多量の数値計算を行うことが多く、現自点では極めて高価なものにつく。しかし、今後、 $\mu P$ の高性能化、低コスト化が進むにつれて、これらの方式も妥当なコストで使用できる様になり、ロボットの性能向上を大巾に改善しうることが期待される。

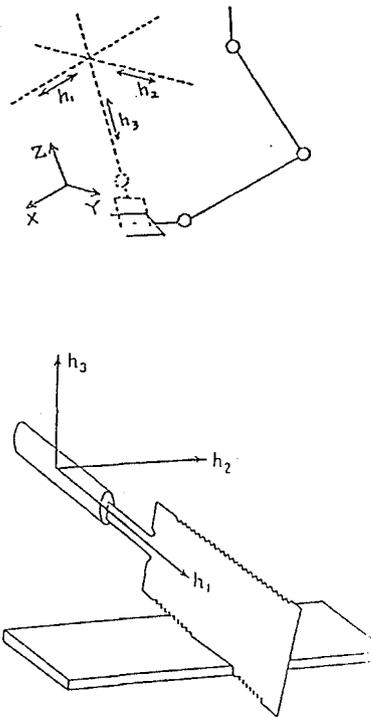


図3・3・5

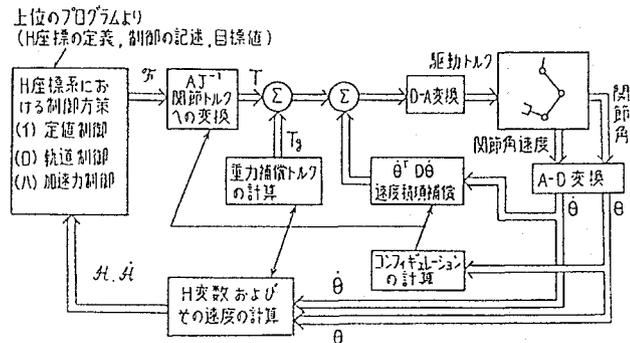


図3・3・6 仮想メカニズム

3-3-6 ロボット言語の事例

(1) AL (スタンフォード大AIラボ)

ALは、本格的なロボット用高水準言語として最も早く提重され、実際にインプリメントされた言語であり、以語のロボット言語研究に大きな影響を与えた。

ALは次のような考え方に基いて設計されている。

(イ) Algolタイプのプログラム制御構造を基本とし、プログラムの構造化を行いやすいように配慮されている、また、汎用のテキストマクロ機能をコンパイラに組込んで、一般的かつフレキシブルなプログラミングを可能としている。

(ロ) データのタイプには、通常のスカラー量だけでなく、マニピュレーションが3次元の世界を扱うという特殊性を考慮して、ベクトル、回転変換、座標系などの3次元の性質を組み込み、算術演算子もこれらを扱い易いように拡張する。

(ハ) 運動の制御には、Paulの軌道計画法を採用する。感覚条件等のモニタリング、運動中の力の指定等は節形式で記述する。作業の計画と実行は分離し、前者はコンパイラ時に行い、後者はランタイム・システムで行う。なお、前者は大型のTS上で走り、後者は専用のミニコンピュータで実行される。

(ニ) 作業計画に参照する環境を表す変数は、作業計画の進行と共に構造的に変化していく、環境を表すデータベースの管理を簡単かつ矛盾なく行うために、セマンティックなAFFIX、UNFIXという概念を導入し、結合部品のひとつを動かした場合に、他の部品のデータも正しく更新され管理されるようにする。

(ホ) 高水準の動作記述への拡張性を重視する。このため、条件付マクロ展開、反復マクロ展開等の機能を組み込み、一般的なマクロまたはライブラリとして書かれたプログラから、環境データベースを作って、それが使われる場面に適した効率的なコードを生成できるようにする。

(ヘ) 2本以上の手の動作の同時実行を記述するためのCOBEGIN、COENDペア、前提条件PREREQUISITEの記述を利用したサブタスクの順序の自動割付け、プロセス間の同期をとるためのEVENT、SIGNAL、WAIT等を導入して複雑な動作の記述を可能にする。

(ト) ランタイム・システムでは、コンパイラで生成されたコードを実行する。腕の各軸のソフトウェアサーボ、および、条件のモニタリング等、実時間で多くのプロセスを同時に実行させるために、CPU時間をスライスして使用する。計画された軌道のある程度の修正はランタイム・システムで行わせる。

ALによるプログラムは大別して、環境の記述と動作の記述からなる。環境の記述部分では、取扱われる対象物がどこにどの様に置かれているか、また、それらの間の相互の結合関係はどうなっているのかを記述する。動作の記述は文字通りロボットが作業を進めていくための手順を記述した部分である。以下に、図3・3・7の様子に部品が配置されているとき、BEAMにBRACKETをBOLTで止める仕事のための、ALのプログラム例を図3・3・8～図3・3・10に示す。

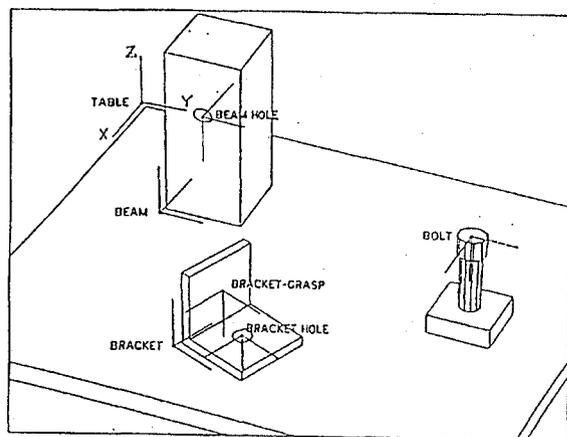


図3・3・7 作業環境の初期状態

```

FRAME beam, beam_hole;
FRAME bracket, bracket_hole, bracket_grasp;
FRAME bolt;
beam ← FRAME(ROT(Z,90*DEG),VECTOR(10,6,0));
beam_hole ← beam*TRANS(ROT(X,-90*DEG),VECTOR(3,0,7));
AFFIX beam_hole TO beam;
ASSERT FORM(DEPROACH,beam_hole,TRANS(NILROT,VECTOR(0,0,-3)));
bracket ← FRAME(ROT(Z,45*DEG),VECTOR(20,14,0));
bracket_hole ← bracket*TRANS(ROT(180*DEG),VECTOR(3,3,0));
AFFIX bracket_hole TO bracket;
bracket_grasp ← bracket*TRANS(ROT(X,180*DEG),VECTOR(0,3,3));
AFFIX bracket_grasp TO bracket RIGIDLY;
bolt ← FRAME(ROT(Z,90*DEG)*ROT(X,180*DEG),VECTOR(16,30,5));

```

図3・3・8 ALにおける環境の記述例

```

example:BEGIN

"world model description here"

OPERATE YFINGERS WITH OPENING=3*CM; .....(イ)
MOVE YELLOW TO bracket_grasp; .....(ロ)
CENTER YELLOW; .....(ハ)
bracket_grasp ← YELLOW; }----(ニ)
AFFIX bracket TO YELLOW; }
MOVE bracket hole TO beam hole;
OPERATE BFINGERS WITH OPENING=3*CM;
MOVE BLUE TO bolt;
CENTER BLUE;
bolt ← BLUE;
AFFIX bolt TO BLUE;
MOVE bolt TO beam hole + VECTOR(0,0,-5.3) WRT beam hole;
  WITH FORCE=0 ALONG X,Y OF BLUE
  ON FORCE(Z WRT BLUE) > 60*OZ DO STOP BLUE; }---(ヘ)
OPERATE YFINGERS WITH OPENING=3*CM;
UNFIX bracket FROM YELLOW; }----(ト)
AFFIX bracket TO beam;
MOVE YELLOW TO YPARK;
OPERATE BFINGERS WITH OPENING=3*CM;
UNFIX bolt FROM BLUE;
AFFIX bolt TO beam;
MOVE BLUE TO BPARK;
WRITE("Finished");
END example;

```

図3・3・9 ALによる作業プログラム例(その1)

```

example2:BEGIN

"world model description here"

COBEGIN
  ypickup:BEGIN
    grasp(object=bracket,grasp_point=bracket_grasp,opening_for_approach=3*CM);
    MOVE bracket hole TO beam hole + VECTOR(0,0,-3) WRT beam hole;
    MOVE YELLOW TO @ + VECTOR(0,0,6) WRT beam hole
    ON FORCE (Z WRT beam hole) > 50*OZ DO STOP YELLOW
    ON ARRIVAL DO ABORT("!!ERROR! bracket went too far");
  END ypickup;
  bpickup:BEGIN
    grasp(the_arm=BLUE,the_object=bolt,grasp_point=bolt,opening_for_approach=3*CM);
  END bpickup;
COEND;
MOVE bolt TO beam hole + VECTOR(0,0,-5.3) WRT beam hole;
normal_search(BLUE,0.2*CM,1.6*CM,60*OZ,9);
MOVE BLUE TO @ * FRAME(ROT(Z,90*DEG),VECTOR(0,0,4))
ON FORCE (Z WRT BLUE) > 60*OZ DO STOP BLUE;
COBEGIN
  parky:BEGIN
    release(the_object=bracket,the_opening=3*CM,the_new_parent=beam);
    MOVE YELLOW TO YPARK;
  END parky;
  parkb:BEGIN
    release(the_arm=BLUE,the_object=bolt,the_opening=3*CM,the_new_parent=beam);
    MOVE BLUE TO BPARK;
  END parkb;
COEND;
END example2;

```

図3・3・10 ALによる作業プログラム例(その2)

## (2) AUTOPASS (IBM、トーマス・ワトソン研究所)

AUTOMated Parts ASsembly Systemの略称である。

AUTOPASSでは、人工知能流の高度の計画作成技法は採用せず、コーザが、組立作業の全体計画を作って作業を記述し、それをコンパイルしてロボットを動かすコードを生成するという方針をとっている。人手による組立作業の場合にも、組立指示書は、どうしても書かざるを得ない、ちょうど、このようなレベルで、ロボットに対するプログラムを書けるようにすることを狙っている。ユーザは、どの部品をどれと組立てるのか、そのときどきの工具を使うのか、また、対象となる部品は作業環境のどこに置かれているかを指示する。AUTOPASSコンパイラは、環境モデルと呼ばれる、データベースを用いて、ラン・タイムの環境変化をシミュレートしつつ、ロボットに対する動作指令とパラメータを生成する。指令書や環境モデルに不明確な点が見つかった場合には、ユーザとの対話のもとで、コード生成を行うという、考え方をとっている。

AUTOPASSがどんなスタイルの言語であるかを示すために、同言語でプログラムした例を、図3・3・1

1に示す。

なお、AUTOPASSの高水準ステートメントの構文を図3・3・12にまとめる。構文中の大文字で書いたものは予約語であり、筆記体部分はオプションである。

1. OPERATE nutfeeder WITH car-ret-tab-nut AT fixture.nest
2. PLACE bracket IN fixture SUCH THAT bracket.bottom  
CONTACTS car-ret-tab-nut.top  
AND bracket.hole IS ALIGNED WITH fixture.nest
3. PLACE interlock ON bracket SUCH THAT  
interlock.hole IS ALIGNED WITH bracket.hole  
AND interlock.base CONTACTS bracket.top
4. DRIVE IN car-ret-intlk-stud INTO car-ret-tab-nut  
AT interlock.hole  
SUCH THAT TORQUE IS EQ 12.0 IN-LBS USING air-driver  
ATTACHING bracket AND interlock
5. NAME bracket interlock car-ret-intlk-stud car-ret-tab-nut  
ASSEMBLY support-bracket

図3・3・11 AUTOPASSによる作業プログラムの例

State change statement

```
PLACE object1 ON object2 gaspng final-conditions contains then-hold
INSERT object IN receptor position sensor then-hold
EXTRACT object distance sensor
LIFT object distance
LOWER object ONTO surface sensor then-hold
LOWER object distance sensor then-hold
SLIDE object ON surface slide-termination then-hold
PUSH object direction UNTIL final-condition then-hold
ORIENT object SUCH THAT positional-condition sensor then-hold
TURN rotor turning-condition rotation-axis then-hold
GRASP object grasp-position hand-position grasping-force
MOVE spatial-feature final-condition
MOVE spatial-feature TO position final-condition
MOVE spatial-feature motion-specification final-condition
RELEASE
```

Tool statement

```
OPERATE tool load-list target-position attachment
final-condition tool-parameter-list then-hold
CLAMP locking-device SUCH THAT final-condition
UNCLAMP locking-device SUCH THAT final-condition
LOAD tool load-list
UNLOAD tool load-list
FETCH tool from-holder
REPLACE tool to-holder
SWITCH tool ON/OFF
LOCK locking-device attachment
UNLOCK locking-device release
```

Fastener statement

```
ATTACH fastener second-fastener TO target-position side-attachment
final-condition
DRIVE IN drive-fastener target-position final-condition
using-driver attachment driver-parameter-list
RIVET object-list target-position side-attachment
FASTEN object1 TO object2 more-objects WITH fastener target-position
final-condition
UNFASTEN fastener-list source-position release target-position
```

Note: Any statements in the above three classes may be preceded by a qualifying hand specification. WITH hand-name.....

Miscellaneous statement (partial listing)

```
VERIFY inspection-condition inspection-action-list
OPEN STATE OF locking-device IS final-condition-list
NAME object-list ASSEMBLY assembly-name
END
```

図3・3・12 AUTOPASSのシンタックス

(3) LAMA (MIT・AIラボ)

Language for Automatic Mechanical Assembly の略称。

LAMAは、MITで検討されている、機械の組立作業を対象とした高水準のプログラミングシステムである。LAMAはLISPで書かれており、作業も例えば図3・3・13のような形式で記述される。

LAMAは、このようなプログラムと、別途作成される環境のモデルから、マニピュレータが実行しうるプログラムへ変換する。環境のモデルは、直方体と円筒を基礎とした幾何学モデルとして構成される。このモ

デルを用いて、作業中に他の物体と衝突しないような運動のパスを決定し、また、組立作業を実行するための細かい手続きや、必要なパラメータを決定する。

LAMAは、まだ研究の初期の段階にあるせいか、環境の表現法も単純であり、ALやAUTOPASSに比べて、現実の組立作業との関連づけが弱く、実際的な高水準言語へ発展するには、今しばらく時間がかかりそうに思われる。

```
(GRASP OBJ: [PISTON-PIN])
(PLACE-IN-VISE OBJ: [PISTON-PIN]
  SUCH-THAT: (PARALLEL [PISTON-PIN] [TABLE]))
(UNGRASP OBJ: [PISTON-PIN])
(GRASP OBJ: [PISTON])
  SUCH-THAT: (FACING+ (([PISTON] TOP) DOWN))
(INSERT OBJ1: [PISTON-PIN]
  OBJ2: [PISTON-PIN-HOLE]
  SUCH-THAT: (PARTLY (FITS-IN OBJ1 OBJ2) 0.25))
(UNGRASP OBJ: [PISTON])
(GRASP OBJ: [PISTON-ROD])
  SUCH-THAT: (FACING+ (([ROD-BAR] TOP) UP))
(INSERT OBJ1: [PISTON-PIN]
  OBJ2: [PISTON-ROD SMALL-END-HOLE])
(UNGRASP OBJ: [PISTON-ROD])
(GRASP OBJ: [PISTON])
(REMOVE-FROM-VISE OBJ: [PISTON])
(PUSH-INTO OBJ: [PISTON-PIN]
  SUCH-THAT: (AND (FITS-IN [PISTON-PIN] [PISTON-PIN-HOLE])
    (FITS-IN [PISTON-PIN] [PISTON-ROD SMALL-END]))))
(UNGRASP OBJ: [PISTON])
```

図 3・3・13 LAMAによる作業プログラムの例

#### (4) ALL (東大機械工学科)

この言語は知能ロボット総合システム研究用ルーツとして開発されたものである。基本的にはスタンフォードのALに準じた設計になっているが、将来、問題解決など、より高度の人工知能技法を組込んで発展させることをねらっており、そのためこの言語はLispの中に組込まれたプログラミングシステムとして改良が続けられている。

図 3・3・14にALLのシンタックスを、また図 3・3・15にALLのプログラム例と示す。

```
(PROGRAM EX2
  (DECLARE INITIAL-POINT COORDINATES)
  (DECLARE FINAL-POINT COORDINATES)
  (DECLARE BOX PART)
  (DECLARE BOX-GRASP COORDINATES)
  (ASSERT INITIAL-POINT
    LOCATE-AT
    (COORDINATES
      NILROT
      (VECTOR 300 300 100)))
  (ASSERT FINAL-POINT
    LOCATE-AT
    (COORDINATES
      NILROT
      (VECTOR 300 -300 100)))
  (AFFIX BOX
    INITIAL-POINT
    NILTRANS
    NONRIGIDLY)
  (AFFIX BOX-GRASP
    BOX
    (TRANS (ROTATION YHAT 180)
      (VECTOR 10 10 5))
    RIGIDLY)
  (OPEN ARM 50)
  (MOVE ARM
    BOX-GRASP
    (APPROACH (VECTOR 0 0 -10)))
  (CLOSE ARM 20)
  (MOVE BOX
    FINAL-POINT
    (DEPARTURE (VECTOR 0 0 10))
    (APPROACH (VECTOR 0 0 10)))
  (OPEN ARM 50)
  (MOVE ARM
    PARK
    (DEPARTURE (VECTOR 0 0 -10))))
```

図 3・3・15 ALLのプログラム例

```

<program> === { PROGRAM <name> <variable declaration> <body> }
<variable declaration> === {{{<data type> <variable> ... }} ... }
<data type> === SCALAR | VECTOR | ROT | FRAME | TRANS | EVENT | PLAN
<body> === {{{<statement>}} ... }
<assignment statement> === { SETQ <variable> <expression> }
<if statement> === { IF <condition> <then part> [<else part>] }
<loop statement> === { LOOP <statement> } ... }
<exit statement> === { EXIT <condition> }
<parallel statement> === { PARALLEL <process> } ... }
<process> === { <statement> } ... }
<signal statement> === { SIGNAL <event> }
<wait statement> === { WAIT <event> }
<pause statement> === { PAUSE <expression> }
<procedure declaration> === { PROC <name> {{{<formal parameter>}} ... }
                                <variable declaration> <body> }
<formal parameter> === { <data type> <variable> }
<procedure call> === { <name> {<actual parameter>} ... }
<affix statement> === { AFFIX <frame> <frame> [<relation> [<expression>]] }
<unfix statement> === { UNFIX <frame> <frame> }
<move statement> === { MOVE <frame> <destination> [{{{<clause>}} ... ] }
<clause> === <via clause> | <with clause> | <condition monitor>
<via clause> === { VIA {{{<frame>}} ... } [ { VELOCITY <expression> } ]
                                [ { DURATION <expression> } ] }
<with clause> === { WITH APPROACH <expression> }
                                { WITH DEPARTURE <expression> }
                                { WITH { FORCE <direction> } <expression> }
                                { WITH { TORQUE <direction> } <expression> }
                                { WITH DURATION <expression> }
<open statement> === { OPEN <hand> <expression> }
<close statement> === { CLOSE <hand> <expression> }
<center statement> === { CENTER <arm> }
<stop statement> === { STOP <arm> }
<condition monitor> === { ON [<label>] <condition> {{{<statement>}} ... }}
<enable statement> === { ENABLE <label> }
<disable statement> === { DISABLE <label> }
<input statement> === { INPUT <variable> } ... }
<print statement> === { PRINT <expression> }
<plan assignment statement> === { %SETQ <variable> <expression> }
<plan declare statement> === { %DECL <identifier> <substitution> }
<plan free statement> === { %FREE <identifier> }
<macro declaration> === { MACRO <name> {{{<formal parameter>}} ... }}
                                {{{<variable>}} ... }} <body> }
<macro call> === { <name> {<actual parameter>} ... }
<plan if statement> === { %IF <condition> <then part> <else part> }
<plan loop statement> === { %LOOP <statement> } ... }
<plan exit statement> === { %EXIT <condition> }
<plan assert statement> === { %ASSERT <name> <slot> <facet> <datum> }
<plan form function> === { %FORM <name> <slot> [<facet>] }
<plan erase statement> === { %ERASE <name> <slot> [<facet> [<datum>]] }

```

図 3・3・14 ALL のシンタックス

#### (5) VAL (ユニメーション)

この言語はユニメーション社の組立ロボットPUMA用に開発された言語であり、今のところ、実用化された唯一の言語と考えられる。この言語は大変コンパクトにまとめられているが、反省、記述能力は、前述の(1)～(4)に比べると見劣りする。

VALの命令は大きく3種類に分けられる。(i)動作制御、(ii)プログラム制御と各種演算、(iii)座標修飾である。

##### 1) 動作制御

基本動作としては、手元がある位置から他の位置に移るように、各関節を独立に制御する、などがある。手先の位置は現在の位置や目標の位置に対して相対的に指定したりすることができ、一つの関節を動かした

りすることもできる。その他、指を閉鎖したり、動作のパラメータを変化させたりといった命令もある。全体の動作は、一つの命令ごとの不連続な動きではなく、連続的に動かせる部分は連続的に動かすように工夫されている。VALのプログラム例を図3・3・16に示す。

### 2) プログラム制御と各種演算

VALには、一般のプログラム言語と同じように、整数演算、分岐、サブルーチンコールの命令があり、そのほか、外部装置との連動、イベントトリガ、行列演算などに関する命令を持っている。

### 3) 座標修飾

道具の大きさや形、腕の設置場所などを変化させてもプログラム全体を修正しなくてもいいように、手先の座標に対する修飾の命令がいくつか用意されている。それらはつぎのようなものである。

- a) 手先で保持する道具の形状の影響の補正。
- b) 腕の設置場所の変化の補正。
- c) ある位置を、相対的な座標関係の列で表現する。
- d) センサ情報によって動作の基準位置を変化させる。

(文献 機械設計1981年10月号 P49~51)

```

REMARK SUBROUTINE PALLET
REMARK
REMARK PURPOSE: CALCULATE PALLET LOCATIONS
REMARK
REMARK INCREMENT COLUMN COUNTER
SETI COLUMN = COLUMN + 1
REMARK TEST FOR END OF ROW
IF COLUMN GT MAX.COL THEN 10
REMARK SHIFT ALONG ROW
SHIFT PICK BY 30.00, 0.00, 0.00
REMARK RETURN TO MAIN PROGRAM AND PROCESS NEXT OBJECT
RETURN 0
REMARK
10 REMARK ROW COMPLETED, INCREMENT ROW COUNTER
SETI ROW = ROW + 1
REMARK TEST FOR ALL ROWS DONE
IF ROW GT MAX.ROW THEN 20
REMARK SHIFT BACK TO START OF ROW, AND DOWN TO NEXT ROW
SHIFT PICK BY -330.00, 50.00, 0.00
REMARK RESET COLUMN COUNTER
SETI COLUMN = 1
REMARK RETURN TO MAIN PROGRAM AND PROCESS NEXT OBJECT
RETURN 0
REMARK
20 REMARK ALL PALLET POSITIONS HAVE BEEN USED, RETURN TO MAIN
REMARK PROGRAM AND SKIP THE "GOTO" INSTRUCTION
RETURN 1
REMARK -- END OF SUBROUTINE PALLET --

```

図3・3・16 VALのプログラム例

### (6) ROBEX (アーヘン工大)

ROB0t EXapt の略称。

APTあるいはEXAPTに類似した言語構造を持つオフラインのプログラミング・システムである。APT-likeの言語を採用することにより工作機械のオペレータが同時にロボットのオペレータを勤めることができることを意図している、と同時にAPT/EXAPTの持つ形状記述機能の利用、APTのCLDATAに対応するPCDATAをROBEX本体が出力、それをポストプロセッサで処理して、各種ロボットの仕様へ合わせるなど、APT/EXAPTのシステム構成と同じ思想が採られている。ロボットのハードウェアからは独立した作業記述言語で、ロボット先端(エンド・イェクタ)の動作の指示を行なう。

図3・3・17にROBEXのシステム構成図を掲げる。WorldModelGeneratorとしてロボット本体、作動対象の工作機械、ならびに他の機器の実体情報を持つことを計画している。この様に目標とすることは極めて大きく、自動衝突回避による軌道生成(インタラクティブなセンサ利用などの重要かつ困難な問題へ取り組むことを予定しているが)現状では作業対象をハンドリングだけに絞り(軌道もプログラマが明示するなど)開発の第一歩を踏み出したに過ぎない。

```

ROBEX SHORT REFERENCE

***** GEOMETRIC ELEMENTS *****

sc=CIRCLE/Center,sp,RADIUS,vr
spa=PATTERN/LINEAR,sp1,sp2,az
spm=PATTERN/TRAFO,sp1,soa2
spn=PATTERN/MIRROR,sl,spa

sv=VECTOR/wx,wy,wz
spl=PLANE/sp,PARLEL,sp1
sb=CUBOID/sp1,sp2,sp3
scy=CYLINDER/sp,sv,vr
sph=SPHERE/CENTER,sp,RADIUS,vr
sco=CONE/sp,sv,wh
sbo=BODY/IN,CUB,sof,BASE,wz,LENGTH,wa
spa=PART/(sbo,) 1 to n

***** EXPLICIT MOTION COMMANDS *****
---Definition of a safe position or surface---
SAFPOS/wx,wy,wz      SAFPOS/wz      SAFPOS/HOMORE

---Go a specified distance---
GODLTA/dx,dy,dz(,EVENT,a(,ELSE,a))

***** SYNCHRONIZATION AND PROGRAM CONTROL COMMANDS *****
(PERFORMED BY THE ROBOT-NC)
DELAY/a              !Wait for a seconds
WAIT/EVENT,a        !Wait for signal
ONSIG/EVENT,a,JMP,n !On signal a jump to n
SWITCH/a,ON         !Switch logical channel a

```

図3・3・17 ROBEXのシンタックスの例

(7) LM (仏、IMAG)

Language for Manipulation の略称。

仏グルノーブルにあるIMAGで開発されたPascal-likeの言語である。ロボットのハードウェアから独立の作業記述言語で、ROBEX同様、エンド・イフェクタの動作を指示するが、“ATTACH命令”(ALにおけるAFFIX命令と同様、2つの物体を一体化する命令)により、部品の動きを指示しても良いとしている。基本的構成は、ALと同様にフレームだけを扱い、三次元実体モデルを持たず、それ故衝突チェックは当然プログラマが行なって、軌道を与える必要がある。特徴としては、“recordingmodule”として、テーピング・プレイバック機能を持つこと、センサ情報が使用できること、各種データ構造を持つことなどが有る。全体としての印象はALの簡易型との感がある(実際、計算機としてはLSI 11/3 (64K Bytes×16 Bit) マイクロコンを使用している。なおこれはFORTRANとアセンブラで記述されている)。開発したIMAGだけでなく、他の研究機関においても近い将来LMが移植されるとのことで、ARAProject(French National Robotic Project)、仏のペザンソン大学、そして次に述べるRAPTを開発しているエディンバラ大があげられている。図3・3・18はLMのプログラム例である。

```

PROCEDURE INSERT(PIN FRAME, HOLE FRAME, FZMAX REAL,
                 EPS REAL, NMAX INTEGER) BOOLEAN;
INTEGER N; VECTOR LATF; FRAME HOLE1;
BEGIN
  N:=0; HOLE1:=HOLE*TRANSLATION(-VZ,10);
  WHILE N<NMAX DO
    BEGIN
      MOVE PIN BY TRANSF(PIN,HOLE1) UNTIL FZ(1)>FZMAX /;
      IF DISTANCE(PIN,HOLE1)<1
        THEN RETURN(TRUE)
        ELSE
          BEGIN
            LATF:=VECTOR(FX(1),FY(1),0);
            MOVE PIN BY TRANSLATION(LATF,EPS) /;
            EPS:=EPS/2; N:=N+1;
          END
        END;
    END;
  WRITE "INSERTION FAILED"; RETURN(FALSE)
END

```

図3・3・18 LMのプログラム例

(8) RAPT (エデンバラ大学)

Robot ART の略称。ART風の言語であるが物体間の拘束の表現法に特徴をもっている。

たとえば「テーブル上の箱をつかめ」と指令すると、ロボットがその動作を実行してくれれば便理である。しかしこれだけの情報では、テーブルの上の何処に箱が在るのか不明で、それは三次元空間内の位置・姿勢の6自由度のうち、幾つかが未知のままであることを意味する。視覚系を用いたシステムであればTV画像から箱の位置を算出して動作を遂行することであろう。しかしながら、たとえ視覚系がなくても、「テーブルの

上の箱」という情報が与えられれば、それが空間の自由度を何らかの意味で拘束することは明らかである。それゆえ、もし図3・3・19に示す様に、「テーブルB1の上に箱B2があり」すなわち「テーブルの上面F11と箱の底面F21とが接しており」、かつ「テーブルの前面F12と箱の側面F22とが同一面上にある」と分れば、箱がテーブルの前縁に沿って務在すること算出できるはずである。

以上述べた様に、物体間の関係は物体上に定義された平面、円筒面、球面といった特徴(Feature)間の自由度を含んだ関係として定義する。ALにおけるフレームと同様、物体上には座標系が固定されており、環境に固定される座標からの座標変換行列で表現する。同様に特徴も物体上の座標系からの座標変換で表記する。図中矢印は座標変換定義の方向を示しているから、逆向きにたどることもでき、それゆえグラフ内に、

テーブルT→T1→E1→B1→箱B→B2→E2-1→T2→テーブルT

と巡る閉路がある。ここに特徴間はE1、E2-1(行列を太文字で示す)という未知数を含む式で表現されているのであるから、回転・平行移動に関する各3つの方程式を得て、それを解くことにより、物体間の新位置関係を示す座標変換が得られる。以上が特徴間の関係から、物体間の関係を導出する手順の概略である。

閉路によって出来る上述の方程式を、一般的に解くことはできない。物体間の新位置関係に自由度が残る場合には数値解析も難しい、それゆえRAPTでは数式処理(Symbolic-Algebra)を用いて解を求めている。

ある状態において特徴間の関係が記述される。次に別の状態において同様の記述がなされる。この2つの異なる状態内に務在する同一の特徴は位置を全く変えないか、あるいはある動作の結果、新しい状態へ移ったのであるから、その中で適当なものを特徴間の関係同様記述する。

この様にして2つの状態の差として動作を算出することができる。

図3・3・19を記述したRAPTプログラムを図3・3・20に示す。

以上述べた様に、RAPTは他のロボット言語と異なり、エンド・イフェクタの動作を記述するのではなく、対象物体の状態記述型のロボット言語である。しかしながら実際には、一般的に二状態間の差分として動作を算出するのは難しいので、動作を平行移動と回転に限定し、その変位だけを確定する方法をとっている。また平面、円筒面としては無限平面、無限長筒面を利用して、三次元実体モデルを持たなかったが、昨年より実体モデルの接続が推進されている。

(文献 オートメーション 27巻4号 P27~31)

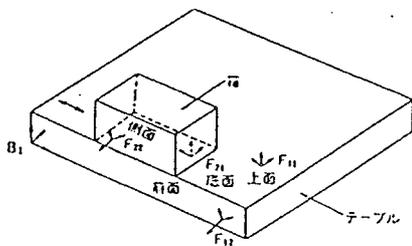


図3・3・19 テーブルの上に置かれた箱の関係

```

BLOCK=MACRO/3 X Y Z:
BODY/B
PO=POINT/0,0,0:
P1=POINT/X,0,0: P2=POINT/0,Y,0:
L1=LINE/PO,P1:

BOTTOM=FACE/HORIZONTAL,0,ZSMALL:
TOP =FACE/HORIZONTAL,Z,ZLARGE:
SIDE =FACE/L1,YSMALL:
TERBOD:
TERHAC:

CALL/BLOCK B=BOX,X=1, Y=1, Z=0.5:
CALL/BLOCK B=TABLE, X=100, Y=100, Z=5:

AGAINST/BOTTOM OF BOX, TOP OF TABLE:
COPLANAR/SIDE OF BOX, SIDE OF TABLE:
    
```

図3・3・20 RAPTプログラムの例(テーブルと箱の関係の記述)

### 3-3-7 システム構成の例

#### (1) ACRONYM

スタンフォード大学AIラボには、ロボット言語ALと画像理解システムを統合して、ACRONYMと呼ぶシステムが計画されている。システムの主体は、画像理解に頼っている様だが、これに、グラフィックス・システム、ロボット用高水準言語であるAL、教示システムであるPOINTYを組合せて、総合ロボットシステムへと発展させる計画があるという。図3・3・21にこのシステムの概略構成図を示す。

#### (2) COSMOS

東大機械工学科で研究開発中のもので、LISPを中核として、ロボット用高水準言語ALL、視覚システム、コンピュータ用手動操作方式などを統合し、1つの総合的知能ロボット・プログラミング・システムへと発展させることを狙ったものである。図3・3・22にその概略構成図を示す。

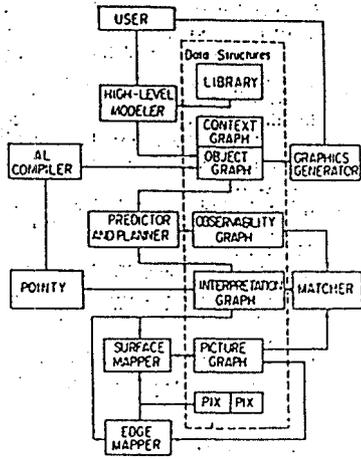


図 3・3・21 ACRONYMのブロック

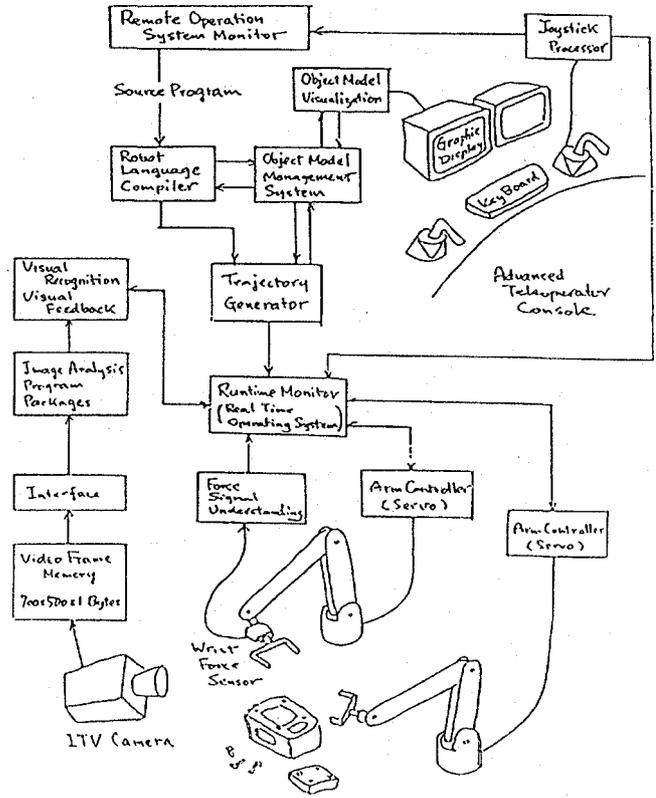
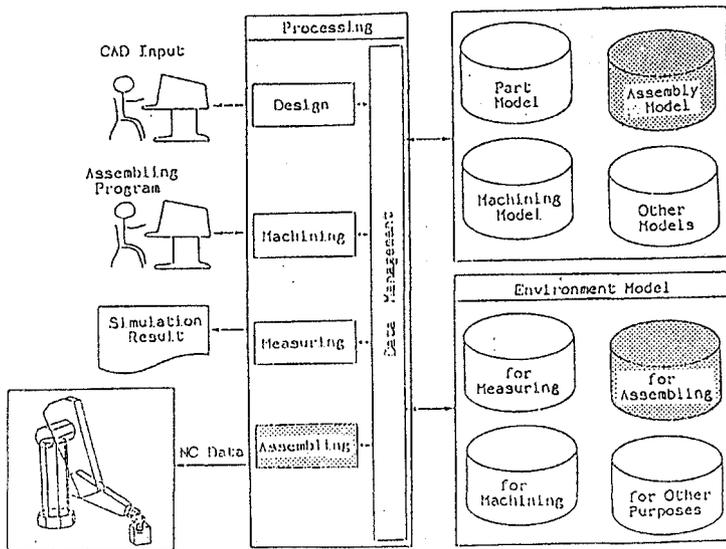


図 3・3・22

### (3) Integrated CAD/CAM

東大精密工学科で研究開発中のシステムである。このシステムの中核には、自由曲面をも取扱い可能なソリッドモデルによる幾何モデル処理システムGEOMAPが位置付けられ、これに、NC工作機械、三次元測定機、ロボットなどを結合した総合的なCAD/CAMシステム味のプロトタイプを目指す野心的なプロジェクトである。図 3・3・23 にそのシステムを示す。



Integrated CAD/CAM System  
Subsystem for Assembling

図 3・3・23

(4) 環境モデリングと知識ロボット

電子技術総合研究所で開発されたロボットの作業環境のモデリングとモニタリ話グを行なうシステムである。今のところ、ロボット言語の大きな問題点の1つである環境記述の高度化のためのモデリングが中心であるが、CADシステムやロボット動作言語等との結合は容易と思われるので将来は、知識ロボットへと発展させられるものと思われる。図3・3・24にその概略構成図を示す。

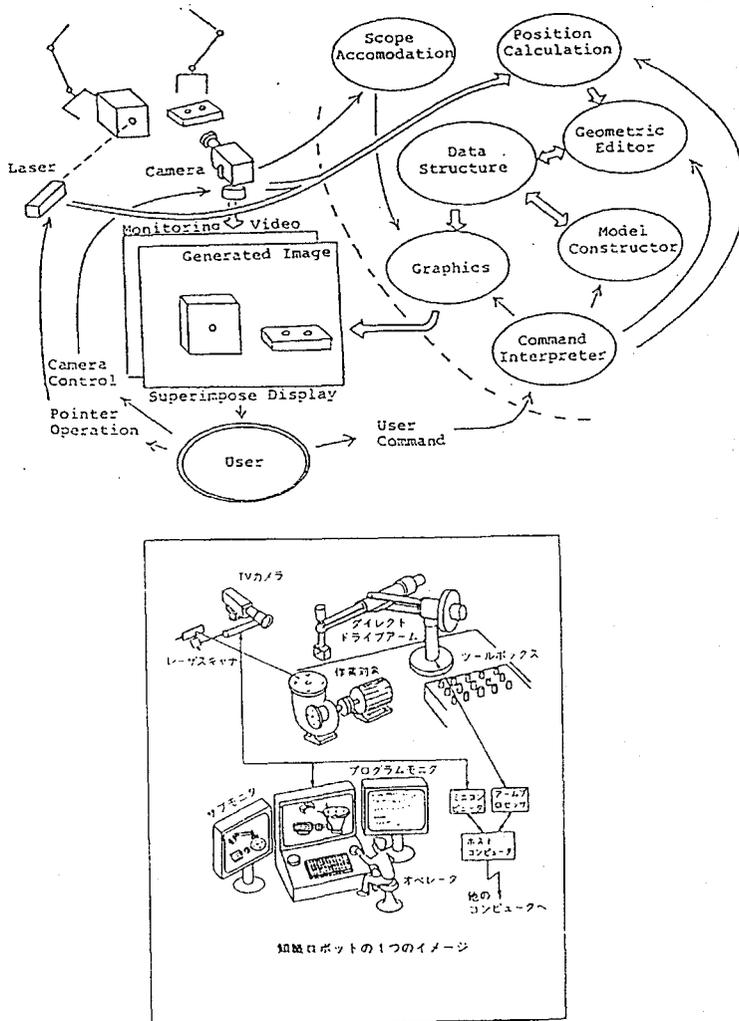


図3・3・24 環境モデリングシステムと知識ロボット

#### 4. システム化に対応する1つのアプローチ

##### 4-1 概要

多くの産業分野のさまざまな作業現場において、ロボットによる作業の自動化、無人化に対するニーズが近来稀なほど高まっている。たとえば、農業、土木建築業、採鉱、彩炭業、アパレル産業、クリーニング業、ゴム産業、製鉄業など、これまで自動化が不可能あるいは極めて困難とされていた業種においても、ロボット技術の運用により作業を自動化できる、かすかな見通しが得られるようになってきた。

勿論、原子炉内や、懐中、宇宙空間など、もともと人間の入り込めない典型的な悪環境における作業に対するニーズは、ますます高まるばかりである。

これら各産業分野における様々な作業ロボットは、それぞれの作業に特有の機能を有する必要のあることは勿論であるが、基本となる重要な技術はすべてのロボットに共通している。すなわち、ほとんどすべての作業ロボットに共通する技術は、①移動、②マニピュレーション機能、③センシング技術、の三つである。更に、これらの機能を確保するために必要な基本的なテクノロジーとして、④人工知能、⑤マンマシンコミュニケーション技術、⑥エネルギー源、がある。

前述した各種作業ロボットは、従来の産業用ロボットとは全く異なる、知能性をもつロボットである。すなわち、従来の単なる繰返し形の作業用ロボット（第一世代の産業用ロボット）に対し、センサーによって環境や作業状況を認識し、その情報に基づいてロボット自身が判断して自らの行動や動作を変えていく第二世代の産業用ロボット「知覚判断ロボット」である。更に、学習機能を保有した第三世代の産業用ロボットの機能も必要であろう。この第二世代、第三世代の産業用ロボットの機能を支える基本技術が上記6項目であるといえよう。

この6項目の基本技術を以下ロボットベーステクノロジーと呼ぶことにする。このロボットベーステクノロジーの機能が充分高くないかぎり各種作業ロボットは全く形成できない。すなわち、これらロボットベーステクノロジーに対しては、充分な研究費と優秀なマンパワーを投入して全力をあげて研究開発を行わねばならない。

ところで、上述のような各種作業ロボットを開発するには、①どれか個別の作業ロボットにとりあえず焦点をあてて開発し、そこで開発されたテクノロジーを他の作業ロボットにトランスファーする、②ベーステクノロジーをすべて含むベースマシンを開発し各種作業ロボットはこのベースマシンにその作業特有の機能やハードウェアを付加することにより形づくる、という二方法が考えられる。

上記二者のうち、ここでは後者の立場をとる。すなわち、高度自動化機械（知能ロボット）の開発課題として、「ロボットベースマシン」を提案する。この後者の立場においては、ロボットベースマシンとは各種システムを有するロボット、すなわち「システムロボット」(Systematizes Robot) の概念を指すことになる。このシステムロボットの概念は諸外国においても未だ提案されていない。有数のロボット国日本が世界に問うロボットの新しい開発概念である。

次に、このシステムロボットのターゲットとして何を選ぶかが非常に重要になってくる。前述の各種作業ロボットにあげた例でも明らかなように、これらの作業ロボットは、作業の場を動き回ることにより有意な作業を行うロボットである。すなわち、知能と移動機能をもつ作業ロボット「知能移動作業ロボット」である。そして、移動して作業する機能を充分に発揮するためには、エネルギー供給用動力線や情報処理用信号線を引っぱらないで動くいわゆる自立形の形をとらなければならない。このような自立移動形の作業ロボットを「自立形知能移動作業ロボット」、縮めて「自立作業ロボット」と称する。4.1)

(図4・1・1参照)

4.1) 中野他、自立作業ロボット省エネルギー方策、バイオメカニズム6—人間の機能とロボット—(1982年8月東大出版会)

図を見てもわかるように自立作業ロボットには、動き回るための移動機能、作業するためのマニピュレータ、作業環境や作業状況を確認するための視覚、触覚をはじめとする各種センサー、これらの機能を司るための高度な人工知能、各機能にエネルギーを供給するパワー源、関連する人間との意志のそ通をはかるマンマシンコミュニケーションユニットからなる。

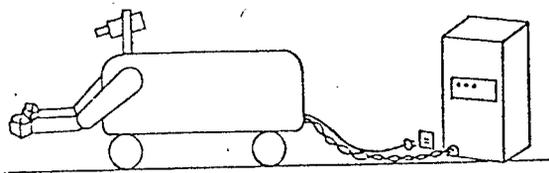
従って、ロボットベースマシンとしてのシステムロボットは以下の6ユニットを構成ユニットとして持ち、この6ユニットを重点的に研究開発することにより各種作業に対応できる知能ロボットの基幹部分をつくりあげることとする。ただし、センサーには各種のものがそれぞれ重要であるが、ここでは代表として視覚センサーを取り上げることにしている。

システムロボットの六構成ロボット

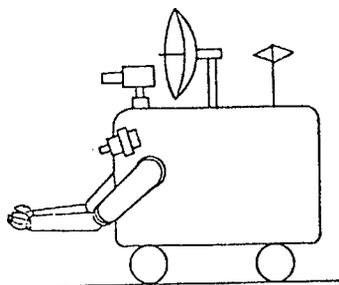
##### A. 移動ユニット

- B. 視覚ユニット
- C. 作業ユニット
- D. ボディユニット
- E. 情報処理ユニット
- F. マンマシンコミュニケーションユニット

以下これらA~Fの各ユニットにつき略述する。



(a) 非自立移動作業ロボット



(b) 自立作業ロボット

図4・1・1 非自立移動作業ロボットと自立作業ロボット

#### 4-2 「システムロボット」の構成ユニット

##### 4-2-1 移動ユニット

移動ユニットとしては、主に

- A1 表面移動ユニット（車輪、足）
- A2 空中移動ユニット
- A3 水中移動ユニット

の三種が考えられる。採炭ロボットのように土中を掘進して移動する必要があるロボットの移動機能も、本質的にキャタピラを含む車輪機構を用いているため、A1表面移動ユニットに含まれる。また、特殊なケースとして建築用ロボットなどクレーンから吊り下げてロボットを移動させる方式が考えられるが、クレーン吊下げに対する本質的な問題点は少ないと判断し、特に取り上げて論ずることはしない。

##### (1) 表面移動ユニット

表面移動の方式としては、大きく車輪形と足（歩行）形に分けられる。その他に、ホバークラフトのような空気浮上式があるが、ここでは制御性の無さという点から省略する。また、軌道式や磁気浮上軌道式、懸すい式も、自由行動性が少ないこと、制御上の問題点が少ないこと、の二点でここでは触れない。

本ユニットで要求される機能としては、以上のことが考えられる。

- (a) 普通の人間が自分の身体（足）のみで克服可能な程度の障害物を克服できること。
- (b) 全方向にその場旋回が可能であること、またはその場で全方向に進行可能であること。
- (c) 平坦地で、人間の早足程度（2 m/sec）の高速度で移動できること。
- (d) 小型・軽量であること。（占有面積1 M<sup>2</sup>以下、本体重量200 Kg以下）
- (e) センシング機能として、目標物、障害物、現在位置、環境以上などを検知・認識のできること。
- (f) ユニット自体の保護・安定性の見地から、ころんだり、転倒したり、すべったりしない様に、安定状態にあるか否かを常にセンシングし、姿勢制御のフィードバック機能を持つこと。
- (g) 外界環境を破壊したり、ダメージを与えたりしない様に、衝突センシングだけでなく、例えば床が抜けてしまわないか、物を踏みつぶさないかどうか等の破壊センシング機能も備える必要がある。

## 1) 車輪形表面移動方式

移動に要するエネルギーの少なさ、制御性の良さ、などから古来最も広く用いられてきた方式である。これをロボットの移動方式という点かせら見ると、移動の自由度が非常に不足していると言わざるを得ない。人間や他の生物の移動機能と比べると、あらゆる方向に行けない、登板力が落ちる、段差や階段を登れない、凹凸面や溝を越えられない、などである。

将来の自立作業ロボットでは、移動機能の高低がすなわちロボットの作業機能の高低につながる点も多いので、従来の車輪移動の特徴をいかしながら、更にその能力を大巾に向上する必要がある。

そこで、車輪形表面移動方式における開発課題として、以下の4点をあげる。

### ① 3次元移動機構の開発

【概要】全方向かつ階段・段差登降能力をもつ車輪移動機構の開発。また、垂直壁面登降機構も同時に開発する。

### ② 特殊移動機構の開発

【概要】管内面移動、曲線経路移動、局面上移動、その他特殊移動機構を開発する。

### ③ 位置方向検出センサーの開発

【概要】移動ロボットが自身の位置と方向を知ることができるセンサーの開発

### ④ 安全移動用センサーの開発

【概要】衝突防止、障害物回避を行うためのセンサー

なお、上記3点の他に移動機能の向上には視覚センサーの能力向上が必須であるが、これは視覚センサーユニットの項にゆずる。

【概要】目標、対象、障害物、環境を含めて外界を想定し、判断及び判定することのできるセンサーシステムの開発

## 2) 歩行表面移動方式

未来の人間形のロボットの歩行移動機構として2足歩行も充分考えられるが、一般的に4足以下の歩行機構では、移動中に動的なバランスを取る必要があるため、制御が困難、本体が大きく振動する、などの欠点があり、現在のところ自立作業ロボットの足としては実用性に欠ける。しかし、未来技術のターゲットとしては大いに開発の必要性がある。5足以上の移動形態は、車輪形移動機構と並んで、非常に実用性が高い。特に車輪形の欠点である、段差・階段登降や悪路走行に適している。

以上の論議より歩行表面移動方式の開発課題として以下の点をあげる。

### ① 6足移動機構の実用化

【概要】人工知能、各種センサーの助けを借りることにより、6足移動の高速・安定化、汎用化の研究を行う。

### ② 歩行の動的制御の研究

【概要】2～4足移動の動的制御研究を行う。なお、歩行に伴って必要な各種センサーの開発は、車輪形の場合と共通する点が多いので省略する。

## 3) 表面移動ユニットの目標

以上の論議をふまえて、移動ユニットの開発項目をより具体的にターゲットとしてまとめると、以下に様になる。

### ① 走行部

構成要素としては図4・2・1の様に

(a)脚部：各々2関節の6足。6足の各関節は多自由度をもつ。

(b)接地部：車輪式。全方向転換可能。

(c)駆動、制御部：車輪式及び走行式の高速度コントロールから成る。

本体には、腰関節、その駆動機構、及び脚部全体の制御装置が収納される。脚部の膝関節には、膝関節用駆動部が局所的に内装される。

一方接地部には走行用車輪のための駆動機構、全方向転換用駆動機構が局所的に内装されている。

各々の脚部の腰及び膝関節には、一関節2自由度以上の新形関節を用いる。

脚は合計6本。平坦地の走行時には、車輪の回転により速度の向上をはかる。障害物階段、溝を克服する時には、脚3本一組で歩行運動を行うこととし、重心の移動点等の複雑すぎる制御はしない。

なお、移動ユニットとは直接関係ないが、重量物の取り扱い時に本体の安定性を増大させるためにスタビライザを用意する必要がある。このスタビライザは、負荷運転時のみに本体下方垂直に伸びて、本体を指示できるものとする。

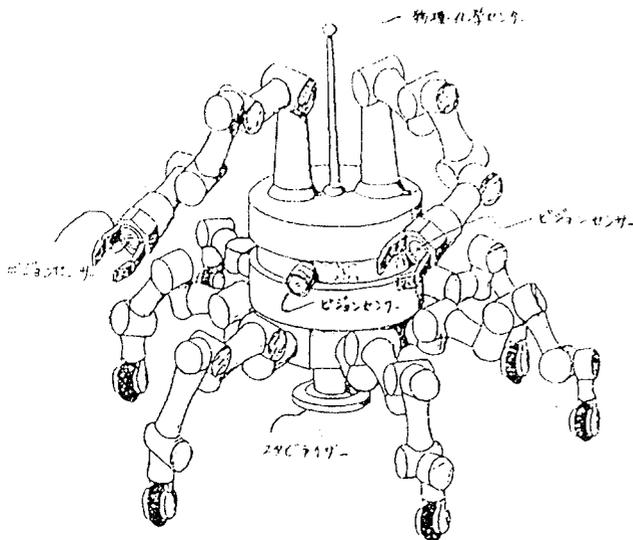


図4・2・1 移動ユニット

## ② 視聴覚センシング部

構成要素としては、同じく図4・2・1の様

(a)本体に位置固定された全景用ビジョンセンサー

(b)ハンドに実装されて、走行時や作業時に協調して、三次元認識や局所認識に用いられる、二つの局所可動ビジョンセンサー

(c)環境理解、異常の検知ができる物理・化学センサーから成る。

本体のビジョンセンサーは、ズーム可能であって、正面（進行方向を監視していて、目標物・障害物・進路全景を撮像し認識する。認識内容は障害物の有無、障害物までの距離や大きさ、乗越えられるか否か、回避は可能か、目標まで到達したかどうかなどである。

二本のアームのハンド先端には、各々別のビジョンセンサーが実装されており、各々が協調して三次元認識、ズーム、接近、検証、測定、などを行う。この二つのビジョンセンサーは、アームにより自在に空間的移動ができる特徴をそなえている。

また、アームには各々先端にサーボグリップが実装されており、対象の硬柔に適応して対象物をハンドリングできる構造とする。

更に、本体には物理・化学センサーが内蔵されていて、温度（気温）検知、異常音検知、煙検知、振動検知などによって、中央制御装置に各々の情報がフィードバックされている。

センシング内容としては、火災の発生（異常音または煙検知）、本体がころばないか（傾き、重心移動検知）、すべらないか（重心、加速度）床が抜けないか（重心移動）、物を踏みつぶしていないか（足の反力、異常音）等の本体の安全性及び環境への安全性を確保するための技術を開発する必要がある。

本移動ユニットは、諸センサーからのフィードバックを受けつつ、高速かつ巧妙に、与えられた場を移動して作業が行える様に開発されなければならない。

## (2) 空中移動ユニット

ロボットに空中を遊泳、移動しうる能力を賦与することができれば、下に列挙するように、比較的危険度の高い作業の代行や災害による危険からの脱出、救助が可能となる。

(a)鉄塔4送電線、高層ビル、電柱、道路燈等に関わる各種高所作業

(b)高層ビル火災、火山爆発、洪水等の災害救助作業

(c)大気汚染、海洋、湖沼汚染、道路交通状況、空中写真等の空中作業

空中移動方式としては、飛行船式のLTA (Lighter Than Air) タイプとヘリコプタ、あるいは飛行機式のHTA (Heavier Than Air) タイプとがある。いずれのタイプによるにせよ、ロボット用の空中移動は操縦性が良く広範囲な速度領域において上下、前後、左右への自由な移動と所定位置で一定姿勢を保って静止することが可能であって、発着に特に準備された広い場所を要しない方式によることが望ましい。

このような条件を充足し、かつ在来の技術領域において基本技術が確立している物が開発課題となりうる。このような物を列挙すると以下のようなになる。

#### 1) 小型ロボット用LTA空中移動技術の開発

【概要】姿勢制御、位置決め制御がある程度可能で、必要に応じて地上に係留できる空中移動機構で、本体全部に作業用のマニピュレータを有するもの、気球部は用途によっては折畳み式の軟式ヘリウム気球とし、待機時は本体内に格納しておくことも考えられる。

#### 2) テイルトタクトッドファン式HTA空中移動技術開発

【概要】3ないし4個の可傾ダクトッドファンを具えた空中移動機構で、上面又は下面に作業用アーム、観測機器等を具えたものはLTA式に比べ風の影響が少なく、良好な操縦性と高速移動能力を持っているので、分野によってはすぐれた性能が得られる可能性がある。この場合ダクトッドファンを小形のターボファンエンジン（リフトエンジン）に代替、小形、軽量化とペイロードの一層の改善をはかることも可能であろう。

ロボットの空中移動機構としては、これらのほかに、ボール、ケーブル、壁面等による移動、ホバークラフトのようなグランド効果による移動及びロケット等による宇宙空間における移動等も考えられるが、他項で取扱われるものや現時点で開発に着手するには周辺技術の整備を要するものがあるので、ここでは単に列挙するにとどめる。

### (3) 水中移動ユニット

海洋調査、海底石油その他の海底資源の開発・採取、道路架橋等の海洋土木工事、漁業関係の探査、収穫など水中作業の高度化に対するニーズは高まるばかりである。これらのニーズに対応できる水中作業ロボットの移動ユニットに関する開発課題としては、下記のようなものがある。

#### 1) 多足水中移動機構の開発

【概要】凹凸のはげしい海底面を静かに移動できる多足移動機構で、作業水深に従って発生する水圧に耐える水封アクチュエーション機構と、各々の足の荷重位置ならびに設置の状態をフィードバックする制御機構とを組合せた機能モジュールの開発を行う。

#### 2) 高性能水中運動機能ユニットの開発

【概要】海洋調査、魚群の探査・誘導等を行うロボットは、静止状態から30Kt（ノット）程度までの広い速度領域と、すぐれたマニューバビリティを具備していなければならない。小形で高いピーク出力を持つウォータージェット、又は、スクリュー式のスラストとそのステアリング機構、刻々の位置と移動方向、速度を水面上の基地に伝送し、オペレータ又はコントローラからの指令によって制御するための通信・制御システム等の開発を行う。

#### 3) 水中浮遊体の精密ポジショニング技術

【概要】マニピュレータにより水中作業を行うときに、必要とされる基地から作業地点へ速やかに到達するためのホーミングシステムと作業中所定の位置に精度良く留まりかつ姿勢を一定に保つための精密制御システムの開発を行う。

これらの水中移動機構及びその制御システムは、一部の変更を行えば、水面移動形ロボットや水路、下水道等の閉水路におけるドブそうじ、深さ、30cmの燃料プールの中に物を落したとき拾ってきたり、スラッジをとってくるものランダムフォーク、さまざまな水上、水中の作業を行ったり、原子力燃料関係等の化学溶解槽、石油備蓄タンク、上下水処理プラントなどの保守作業を行うロボットに応用できる。

### (4) 地中移動ユニット

地下資源の調査、採取、トンネル、水路等における地中坑道の開削ならびに保守は、本質的に危険な作業であり、古くより労働災害のもととなっていて、多くの人命が失われてきた。この分野の作業の一部にせよロボット化することができれば労働安全上大きな意義がある。この分野における3ロボット化のための開発課題としては、

#### 1) 坑道掘進又は採掘作業を行うロボットのマルチキャタピラ式移動機構

#### 2) 凹凸のはげしい坑道内を移動し、坑内保守作業を行うロボットの多足3次元移動機構

#### 3) ケーブル管路等比較的断面積の整った形状の孔を、地下に開削するロボットのエキスパンダープレッシャ式の尺取り移動機構

### 4-2-2 視覚ユニット

視覚に要求される機能は、環境全体の観察とその状況の理解、及び局所的な場面の観察に基く計測や監視であると言えよう。それら2つの視覚をここではユニバーサルビジョン、ローカルビジョンと呼びそれぞれ

に開発課題を挙げよう。

#### (1) ユニバーサルビジョン

環境全体を観察し、状況を理解するビジョンは、いわば人間の目にあたるもので、各種の特徴抽出能力、シーンの分析能力、環境の理解能力が必要である。特徴抽出能力として、立体視による距離感と三次元的特徴抽出、色の識別、線画の抽出能力等が必要である。また適正なデータを得るための焦点調節、パンティルト、ズームの自動操作も重要である。シーンの合析能力として、曲線を含む線画の解析能力が必要である。環境の理解のためには、線画の解析結果や、三次元的特徴、又は色の情報を総合的に処理し、モデルとの対応、または、一般的知識に基づいて場面を解釈する必要がある。

以上の機能はそれぞれモジュール化され、それらが総合されたものがユニバーサルビジョンである。

ビジョンを考える場合、照明の問題も忘れてはならない。情景を見やすくするための照明、二次元測量に基づき距離情報を得るためのスポット光やビーム光もモジュール化されそれぞれ独自の移動能力、制御能力を持つことが必要である。

#### (2) ローカルビジョン

部品の高精度位置決めや圧力容器の探傷のためのビジョン、作業の進行を要所所で監視する検証ビジョン等は、局所的な場面の観察を詳細に行うローカルビジョンである。1つのローカルビジョンはある分野のエキスパートであり、適用される範囲は限定される。広い分野をカバーするために各分野のエキスパートであるビジョンをひとそろえ準備する必要がある。例えば非常にこまかい部分を見るビジョンは、虫めがね付きテレビカメラから構成され、遠い物を見るビジョンは望遠鏡付きのテレビカメラから構成される。

ローカルビジョンもモジュール化され、アームの先端にとりつけられたり、移動ユニットと結合することにより、自由に動きまわられる必要がある。

#### (3) センサー材料

ロボットベースマシンの持つ基本的機能は、移動機能、マニピュレーション機能であり、人工知能、マシンインターフェイス機能、エネルギー源を付加的にもった自立作業法である。対象作業分野としては、自動化の遅れている悪環境分野、原子力分野、海洋開発分野等である。これら各環境において、ベースマシンが高精度高信頼性をもって作業するためには、それぞれの環境に対応した耐力が必要であり、特にセンサー類については、その影響が顕著である。ロボットベースマシンを人間と機械の得意とする能力を合せ持ったものとする、人間の5感の内、視覚、聴覚、触覚と同等の測定機能を有し、かつ距離感覚、平行感覚、第6感等の様に5感+ $\alpha$ の機能を有するものとなる。これらの機能を実現するためのセンサー類は、第3章で述べた通りであるが、それぞれの環境で正確に作動するためには以下の条件を考慮することが必要である。

##### a) 悪環境下

各センサーは悪環境である高温、超低温、高圧力、有害ガス、可燃性ガス、衝撃等に対し、耐力を有するもので、かつ環境へ悪影響を与えない様なシステム的な開発が必要となる。建設用ロボットは、その対象とする被建造物により機能、構造は異なるが、土地の造成、資材の運搬、取付、解体作業等多くの作業を行わせるために、視覚、触覚、距離感覚、位置感覚等が特に重要となり、屋外の悪循環にて十分に耐え得るセンサーの開発が必要である災害救助ロボットもその対象となる災害の種類により、持つべきセンサーが異なるが、火災、地震、津波の様に、周囲の状況が刻々と変化する場合が多い。また、高温、衝撃、水等のセンサーの環境条件も厳しいものとなる。この様な状況のなかで高精度、高信頼度で作動するセンサーは、その耐力が大きな問題となる。生産工場用ロボットは、建設用ロボット、災害救助ロボット等と比べると、その環境はさほど厳しくないが、視覚、位置決め精度、把持精度(触覚)等が高度化し、その信頼性がポイントとなる。

##### b) 原子力分野

原子力分野で使用するセンサー類は、耐放射線性及び洗浄性の良いことが要求される。各センサーの絶縁材には、一般高分子材料を使用しており、対放射線性は低い。よって耐放射線性のある材料の開発が要求される。

原子力分野におけるロボットは主に運転、保全、解体作業に使用されるが、これらに共通なセンサーは視覚、位置決め精度、保持精度及び触覚である。特に保全作業においては保全個所を正確に認識し、除染、切断、溶接、交換作業等が高度な技術により行われねばならない。既存の各種センサーの多くは、耐放射線性に問題があり重要な開発課題となる。

##### c) 海洋開発分野

海中で使用するため、防水性、耐蝕性が要求される。掘削作業、海底鉱物資源採取作業、海底に設置された機器の運転、保全作業において、対象物の位置確認作業が基本機能となる。深海においては、かなりの圧力を受け触覚等の精度が悪くなる。これらを克服することが、海洋開発ロボットの重要な課題である。

以上、各分野で特に要求される付加仕様を述べたが、センサー類の開発にあたっては、新規に測定原理を開発するなどではなく、既存の技術を改良または応用し、複合したシステムを構成することが肝要である。

#### 4-2-3 作業ユニット

作業ユニットは人間の四肢に相当し、自立作業ロボットの高度化、知能化を図る上で重要なメカニズムである。

開発の問題点としては第3章でも述べたが小形・軽量化、高精度化、多自由度化、高剛性化、高速化等がある。特に自立作業ロボットではエネルギーの省力化、小型軽量化を図る上で作業ユニットをも小型・軽量化する必要がある。自立作業ロボットでの作業ユニットの構成要素はアーム、リスト、ハンド、ツールでありそれぞれ次のような開発課題がある。作業ユニットの機能図を図4・2・2に示す。

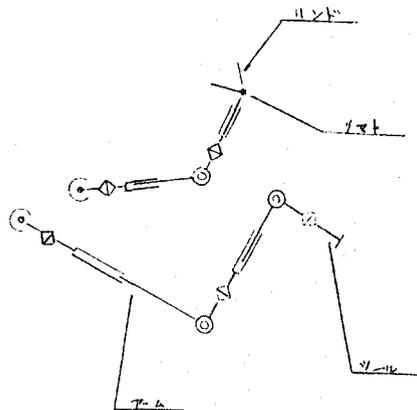


図4・2・2 作業ユニット機能図

##### (1) アームの開発

アームに要求される機能は作業空間の領域を広げること、作業時の手の位置と姿勢を決めることである。アームは後述するボディユニットに直接接続され回転、旋回、スイング、伸縮、着脱機能を持ち、その先端に、リスト、ハンドなどがはめこまれる。アームの着脱機構は感覚情報、制御情報及び駆動エネルギーを伝達することができ容易に着脱ができる機構でなければならない。その為には全体の情報処理部（知能部）との接続もモジュール化、標準化する必要がある。又、アーム本来の作業の他に複数本のアームにより歩行懸垂等の移動機能をもたせることもできる。作業の種類によりアームをパワーアーム、ミニアーム、マイクロアームの3つに分ける。

##### a) パワーアーム

パワーアームは重量物の取り扱いや、広い到達可能領域の確保のための大型で強力なアームである。アームの長さには必要に応じて100mm～1000mm程度になる。パワーアームの先端には物をつかむためのリスト、ハンド、又は器用な作業を行うためのミニアームがはめこまれる。これにより危険が伴う高所作業や情報処理部（知能部）が容易に近づけない悪環境下での作業が可能である。パワーアームの開発課題は軽量化、高剛性の確保、多自由度化である。

##### b) ミニアーム

ミニアームは組立作業、塗装作業、検査選別作業等の多目的、広範囲な作業を迅速に行うための多機能なアームである。ミニアームはボディに直接又は、パワーアームの先端にはめこまれ、アームの長さは500mm～1000mm程度である。開発課題は、多自由度化高精度の確保、高速化である。又、人間解除作業にあたっては感触がやわらかいソフトミニアーム、フレキシブルミニアームが必要であり、動作の制御も充分デリケートなものでなければならない。

マイクロアームは、超精密な作業（ミクロンオーダー）を行ったり、非常にせまい環境にもぐり込んで作業を行うためのアームである。アームの長さは100mm程度で、パワーアーム又はミニアームの先端にはめ込ま

れ、ミニアームの先端にマイクロアームを複数本はめこんで指として使用することも可能となる。開発課題は多自由度化、高精度の確保である。

## (2) リストの開発

リストに要求される機能は、ハンドに多方向性の働きを与えるフレキシブル機能である。

リストはアーム先端の部分にはめこまれ使用される。リストは力感覚やたわみ機能を持ち、俊敏に反応することができ過負荷等のアクシデントに対してもソフトダンパーとして働く機能を持つ。リストの曲げ角度、あるいは回転作用を増すことにより更に広範囲な作業が可能である。たわみ機能としてはRCCのような感覚なしのものは望ましくない。たわみの状況を常にモニタリングできる機構が必要である。従って力感覚には、十分な安定性を持つセンサーの開発が必要である。

## (3) ハンドの開発

ハンドに要求される機能は多自由度の3本以上の指を持つことによる、つまみ、はさみ、にぎり機能である。ハンドはアームの先端又はリストの先にはめこまれ、直接物を持ったり触れたりして触覚を利用して対象物を認識するための重要な要素でもある。高分解の近接センサーや高密度の触覚力感覚、すべり感覚が必要である。それらの感覚情報を処理し、相互の指の動きをコントロールする。プログラムもモジュール化して付与されなければならない。特殊作業にあっては、専用ツールを使用し処理する。ハンドの開発課題は多自由度化、上記の触覚の向上である。

## (4) ツールの開発

ツールに要求される機能は、ハンドではできない特殊作業をハンドに代り処理することである。

ツールはアーム又はリストの先端にはめこまれ使用される。ロボットのツールには、従来の進行状況を判断するための感覚をできる限り付与することにする。この程度の専用化はやむを得ない。

## (5) 機械加工工場用マニピュレータ

加工工場における部品の着脱の自動化手段としてのマニピュレータは、加工材料に対して加工対象となる部品を前工程から自動搬送されてきた時点から取り上げて、その加工機の所定の位置に一定の姿勢で取りつける作業と、その加工が終了した部品を次工程に供給する作業を受け持つ。これらの作業に要求される機能を高度化するために下記の技術開発を必要とする。

- 1) 対象部品の形状に対する汎用性を高めるため、把持方法の自由度の高い多関節形で独立に作動可能な3本以上の指を持つハンド
- 2) 把持対象とする部品の置かれている場所から、所定の場所までのマニピュレータの移動軌跡が多自由度性を持ち、容易にプログラム変更できるコントロール技術
- 3) 物の形状を判別して、その種類を判断し、所定の姿勢で把持するセンサー機能付きハンド
- 4) 把持対象物体の剛性度合により、把持力をコントロールする力センサーとハンドへのフィードバック機能
- 5) 把持対象物の重量を認識し、マニピュレータの移動速度を自動制御し、最小タクトタイムを算出する機能
- 6) マニピュレータの移動軌跡中に予期しない障害物が現われたとき、それを避けて運転を継続できる物体認識機能と移動軌跡変更機能を持ち合わせるコントロール技術

### 4-2-4 ボディユニット

現在のロボット技術においては、人間や動物の胴体にあたるボディの機能はほとんど無視されている。腕や足に比べて直接的に果す機能の役割が低いのは確かであるが、人間や動物を一つの自立体としてとらえると、胴体の果す役割の重要さに気付くであろう。

すなわち、まず第一に胴体は各機能にその機能を発揮させるためのエネルギーを供給するという極めて重要な役割を担っている。たとえば悪いが手足が無くても人間は生きていける。しかし、胴体に含まれている各種機能、たとえば心臓や肝臓、胃腸などのどれが無くても生きてはいけない。

自立作業ロボットは、機能は未だ格段に低いけれども基本的には生物と同様の構成を持っている。すなわち、各作業ユニットへのエネルギー供給はこのボディユニットが一手に引き受けねばならない。

また、システムロボットにおいては、実際作業に対処するとき、各機能ユニットにオプション的な補助作業具を付加して行う。この補助作業具を順序正しく整理して格納し、混乱なくスムーズに取り出すためのストックとしての機能が必要とされる。

このようにボディユニットの役割は、各ユニットを取付けるベース構造物としての基本的役割の他に、エネルギー源の内蔵と各種補助具の収納等二つの大きな役割がある。

以上に述べたようにボディユニットの開発課題として以下の点をあげる。

#### (1) 高性能無公害騒音エネルギー源

自立形ロボットのエネルギー源としては、出力/重量比が大きく、排気ガスや騒音による悪影響の少ないエネルギー源の開発が必要となる。具体的には、蓄電池の高性能、新型電池の開発、燃料電池の開発、スタリングエンジンの適用などがある。

##### 1) 蓄電池の高性能化

蓄電池は無公害、無騒音、機構が簡単で故障が少ないなどの長所がある。しかし、その反面電池の重量が重い、一充電当りの稼働時間が短く、アクチュエータの速度や加速力を大きくできないなどの欠点がある。そのため蓄電池の高性能化としては、できるだけ軽く、エネルギー密度（単位重量当りのワット時、普通Wh/kgで表わされる）や出力密度（単位重量当りのワット、普通W/kgで表わされる）の大きな電池が望まれる。在来形蓄電池としては、鉛蓄電池、ニッケル-カドミウム蓄電池、酸化鉄-亜鉛蓄電池の3つである。

鉛蓄電池は電極に鉛を用いるために重量が重く、エネルギー密度は第2次大戦前においてせいぜい20Wh/kg前後であったが、材料革命の影響で40Wh/kgと性能、寿命ともに進歩を指示しているが、今後もエネルギー密度の向上をはかるため、陰陽両極板物質の開発、電解液の利用率向上、格子体の重量軽減、セパレータの薄形化、電槽の軽量化となどの総合的な重量軽減が開発課題とされている。

ニッケル-カドミウム蓄電池は鉛蓄電池に比べて出力密度が大きく、堅牢で長寿命であり、短時間充電がしやすいなどの長所がある。しかし、鉛蓄電池の数倍と高価で、資源的にも大量使用に問題が残し、エネルギー密度は鉛蓄電池と同程度であり、それ程多くは望めない。ただ、ハイブット動力源における出力源として有望視する向きもある。

つまりエネルギー密度の大きい新型蓄電池または燃料電池などと組み合わせ、これら電池を定常時のエネルギー源として用い、大出力を要する場合にニッケル-カドミウム蓄電池で出力を負担しようとする方式である。しかし、このような使い方を可能とするためには出力密度の向上とコストダウンが前提となる。

酸化銀-亜鉛蓄電池は在来形蓄電池のなかでは、120Wh/kgとエネルギー密度が高く、また、出力密度が大きいという長所があり、ロケット、ミサイル、航空機などの搭載用に用いられている。しかし、低率放電で100サイクル程度といわれた寿命が短く、充電時間も10時間以上と長時間を必要とする。更に価格は1966年GM社が試作電気自動車に搭載した電池価格576万円と高く、鉄を使用することから大幅に下げは望めない。従って実用に供するには困難と思われる。

##### 2) 新型蓄電池の開発

現用の各種電池より1段も飛躍した高エネルギー密度の新型蓄電池の開発の必要性から、数多くの電池が提案されている。このなかで脚光を浴びているものとして、亜鉛-ニッケル、亜鉛-空気、ナトリウム-硫黄、リチウム-塩素、リチウム-ハロゲン化物電池などがある。

亜鉛-ニッケル蓄電池は、エネルギー密度は45~46Wh/kgで鉛電池よりいくぶん高めであり、ニッケル-カドミウム電池より安価で、放電電圧も高く、充放電状態での保存が可能で保守が容易、また、耐震、対衝撃性にすぐれている等の長所があり、移動用機器組込電源、始動用電源などの用途が考えられている。しかし、亜鉛極を有するほかの蓄電池と同様寿命が短いため、寿命性能の大幅向上が研究課題となっている。

亜鉛-空気蓄電池はエネルギー密度約150Wh/kgと酸化銀電池並に大きく、常温作動で取扱いが有利なことから有望視する向きは多い。しかし、いまのところ循環機構を含む系全体としての出力密度はそれほど高くなく、全体のコンパクト化の開発が必要とされている。

ナトリウム-硫黄蓄電池はエネルギー密度が300Wh/kgと大きく、充電特性もすぐれており、効率がよく、保守も容易、資源的にも有利などの長所はあるが約300℃での高温使用となるため、平熱、保温機構の確立、高温における腐食に耐える材料の研究等開発課題は多い。

リチウム-塩素蓄電池はエネルギー密度は330Wh/kgといわれ、出力密度も高く短時間充電が可能等が長所といえるが、作動温度が613℃と高く、塩素の毒性に対する高度な保安機構が必要であり、ナトリウム-硫黄蓄電池以上に開発課題は多く、現況は基礎研究段階にある。

リチウム-ハロゲン化物電池は常温で作動するので加熱、保温などの問題はなく、しかも、エネルギー密度が300Wh/kgと高いなどの長所がある。しかし、出力密度が低く、大電流が取り出しにくい、充放電時の副反応により長寿命を期待しがたいなどが懸念されており、出力増加、寿命向上、コスト面などの課題は多い。

### 3) 燃料電池の開発

燃料電池は、電池の外部から燃料と酸化剤を供給、電気化学反応によって電気エネルギーを得る装置である。保有する化学エネルギーを電気エネルギーに変換させて放出してしまうと、それっきりである1次電池や、数時間の充電を必要とするため、充電装置や発電装置を必要とする2次電池(蓄電池)が所要の化学エネルギーを電池内部に保有する形式と異り、燃料電池はあらかじめ必要とする燃料と酸化剤を保有しておけば、その量に見合った電力を得ることができるものである。

従って、これまでの1次電池や2次電池に比較して長時間使用に適し、数KWから数100KWまでの出力範囲においてコンパクトな電力源となる可能性が大きく、鉛蓄電池に比べ単位重量当りの出力(W/kg)がすぐれており、さまざまな用途に使われる可能性を指示している。

燃料電池は使用する燃料(陰極還元剤)と空気や酸素(陽極酸化剤)の組み合わせ、電解質(酸、アルカリの違い)、動作温度などによって多くの種類に分類されている。(表4・2・1)しかもそれぞれの特長に応じて使用目的も異なる。このうち自立形ロボットの動力源として、適用が考えられるものとして、水素-酸素形燃料電池、ヒドラジン-空気形燃料電池及びメタノール空気形電池燃料がある。

項	名 称	電解質	燃 料	酸化剤	作 動 温 度	形 式 (高用化時間)	用 途
1	水素 — 酸素	水性カリ	純水素	純酸素	常 温	第一世代 低温形 (1983)	宇宙船電源 電気自動車
2	ヒドラジン — 空気	水溶化	ヒドラジン	空 気	~100℃		小形電源装置 海軍用発電機、電気自動車
3	メタノール — 空気	りん酸 溶液	メタノール	空 気	120 ~200℃		すゑ置き用 分散発電所 電気自動車
4	りん酸		水 素 (改質ガス)	空 気			
5	炭化水素		炭化水素	空 気			
6	熔融炭酸塩	溶解 炭酸塩	水 素 -酸化炭素	空 気	500 ~800℃	第二世代 中温形 (1988)	分散発電所 中央発電所
7	固体電解質	固体 電解質	炭化水素	空 気	750 ~1000℃	第三世代 高温形 (1990)	中央発電所

表4・2・1 各種燃料電池と用途

水素-酸素形燃料電池は燃料電池の中では、比較的高密度電流を取り出すことができる。出力密度は50W/kg程度であるが、これを更に大きくする手段として高出力電池とのハイブリット電源とすることができるし、反応生成物が水で無公害であり、それも100℃の水蒸気として取り出しができ、排熱利用も容易であるなどの長所がある。しかし、出力密度が充分でない、電極寿命が短い、燃料などの環境機構が複雑、水素極に使用する触媒の価格が高い、更に電解液に二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が溶解すると電解液が劣化するため、純粋な水素や酸素を用いることになり、天然ガスやナフサなどからの改質地燃料は使えず、燃料コストは高くなる。しかし、将来水素を燃料として使う時代では理想的な燃料電池とみられている。

ヒドラジン-空地形燃料電池は燃料電池のなかでは比較的输出密度が高く、かなり電流密度が高くとれる。燃料は液体で取り扱いが容易である。現状はヒドラジン燃料は水素より著しく効果であるが、将来安くなる見込みがあるとされている。しかし、燃料自体が有毒なため、反応生成物も処理して排出する必要がある。

また循環機構や電極の耐久性向上などの研究開発が必要とされる。

メタノール-空気形燃料電池は、メタノール材料が安価で取り扱いが容易であることから、性能向上に関する研究が行われているが燃料電池の中では出力密度は最も小さく、しかも、メタノール燃料自体有毒であり、据置用電源としての使用に限定されるとの見方もでている。

#### 4) スターリングエンジンの適用

スターリングエンジンは一種の外燃機関のエンジンで、1816年スコットランドの牧師ロバート・スターリングにより発明されたが当初、比出力が小さい、高温側熱交換器の故障が多いなどの欠点のため、その後の蒸気機関、内燃機関の発明によって姿を消してしまっていたが近年の材料技術の進歩によりエンジンの性能が飛躍的に向上し、内燃機関と何んら遜色のない性能を示すエンジンも試作され、すでに車載試験を行った例も報告されている。

そして自立形ロボットのエネルギー源としての必要条件である。高効率、低公害のほか多種燃料の使用が可能といった得点をもつエンジンである。しかし、コスト、信頼性、寿命の面ではまだ問題点を残しており、適用化までにはなお設計・解析手法、機構、シール技術、高温材料などに関してより一層の技術開発が必要とされている。

#### (2) 省エネルギーシステム開発

限られたエネルギーを可能なかぎり節約して使用し、自立ロボットの機能を十分に発揮させるために、省エネルギー形油空圧供給源とサーボ機構を開発する。また、他の作業ユニットにおいて使用される各種アクチュエータの省エネルギー形駆動回路もここに含まれる。

そのほか、前項で述べた各種エネルギー源のハイブリットによる省エネルギーシステムがある。

例えば、スターリングエンジン-蓄電池ハイブリットは、スターリングエンジン発電機は常時一定速度で作動し、アイドリング及び低速時には電池に充電供給し、大出力を要する時のみ蓄電池が出力を負担する。

燃料電池-蓄電池ハイブリットは、現在の燃料で電池が出力密度が低く、重量当り得られるパワーが低い悩みをもっているが、これを補う手段として出力密度の大きな蓄電池とのハイブリット動力源として提案されている。

更に、スターリングエンジン-燃料電池-蓄電池ハイブリットは同様の目的のほか、燃料電池の排熱をスターリングエンジン熱源として使用し、省エネルギーを図ることも考えられる。(図4・2・3参照)

更に油圧の配管材料の軽量化及び管内摩擦の低減化など、省エネルギーシステムの開発課題は多い。

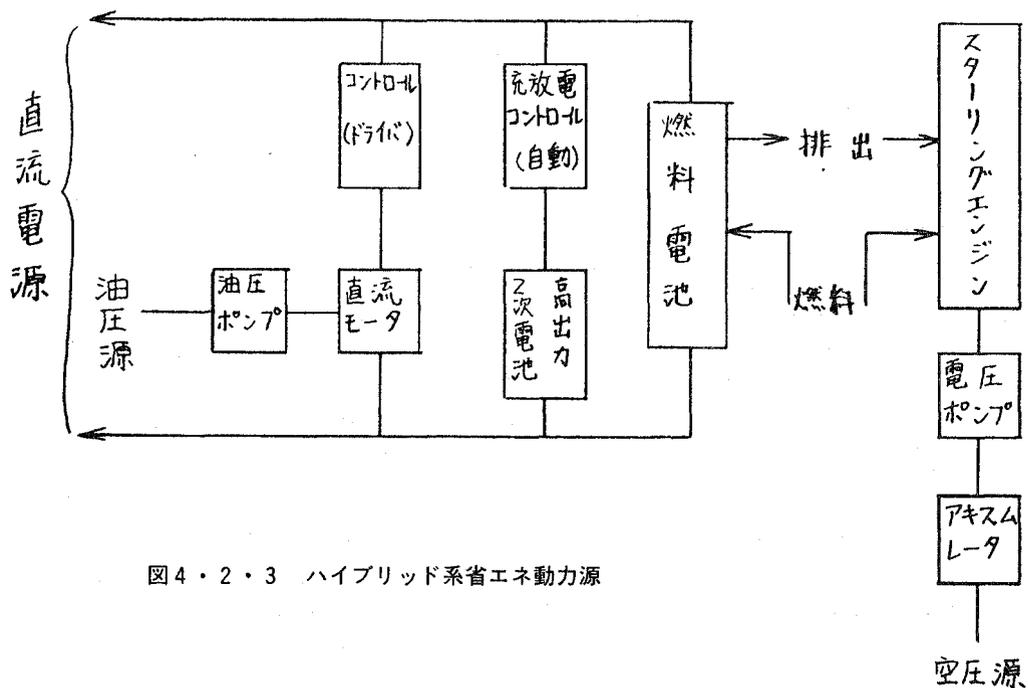


図4・2・3 ハイブリッド系省エネ動力源

### (3) 補助作業具収納技術の開発

ロボットの胴体内という限られたスペース内に、他種類の作業具を3次的に効率的に収納し、迅速に取り出し受け渡しする技術を開発するものである。基本的にはマニピュレータにおける工具交換技術、自動倉庫技術、航空機の脚収納技術などが集大成されるものであり、ここでも新材料、新機構などに関してより一層の技術開発が必要となる。

### (4) 材料開発

ボディユニットに使用される材料としては、ベース構造機としての軽くて強い素材としては、高張力鋼、アルミ合金、強化プラスチック、複合材料などがあげられる。

高張力鋼では軟らかく伸びの良いフェライト金属層と、マルランサイトという硬い焼き入れ層が適切にまじり合った複合組織網が、加工性が良く、引張り強さ100gf/mmまで可能で強度部材として注目されている。

アルミ合金では住友軽金属工業の開発したサーティ・サーティ、「30-30」と呼ばれる合金が注目されている。3.5~5.5%のマグネシウム、0.5~2.0%の亜鉛、0.3%~1.2%の銅を含むアルミ合金で、引張り強さが30kgf/mmまで伸びが30%と高強度で、良好な成形性をもっている。更に伸びを40%にすることを目標として研究中である。更に同社は航空機胴体の“はり”に使用するストリング材として使われた、Al-Zn-Mg-Ca系の7075合金の製造技術の確立、従来材に比べ結晶粒径を1/10~1/3と微細化、成形性を向上させ、耐疲労性や破壊じん性を約10%向上させ注目され、現在ボーイング社のB757とB767に採用されている。

強化プラスチックは強化材にガラス繊維、炭素繊維、樹脂ポリアミド(ナイロン)、ポリエステル、ポリイミド、ポリプロピレン、エポキシなど多種多様の組み合わせのものが軽量構造材として開発され、用途開発の段階にある。

更に、200℃の高温で連続使用に耐える炭素繊維強化のPEEK繊維(線状ポリアリル・エーテル・ケトン)なども注目されている。

複合材料はガラス繊維、炭素繊維以外にもアラミッド繊維、アルミナ繊維、炭化ケイ素繊維などがある。

アラミッド繊維は同重量の鉄より5倍強く、航空機の構造材料として使われている。

アルミナ繊維はアルミナ(酸化アルミニウム)を高温処理あるいは特殊処理で他結晶質繊維にしたもので、1300~2000℃の高温に耐えられ、比重が軽く、強度は炭素繊維と同程度などの物性をいかし、金属、樹脂、セラミックスなどの複合強化材料として期待されている。

炭化ケイ素繊維は、炭素繊維の特性を上まわるとされ注目されているが、未だ1kg10万円と高価で量産化によるコストダウンが待たれている。

#### 4-2-5 情報処理ユニット

システムロボットは、組織的に計画された各基本機能の構成ユニットの集合体からなる。基本ユニットを組合せることによって、シンボルとしての汎用知能ロボットから、社会の中で必要とされる各種の作業への適用を考えた作業向ロボットまで、様々のロボット族への展開を可能とする。他のシステム製品と比べ、システムロボットの場合には、各基本ユニット内に高度のソフトウェアが一体化された形で開発されるから、それらを組合せて、作られる特定のロボット・システムが、全体として有機的に帰納するか否か決定する鍵は、各ユニット内のソフトウェアを有機的に統合するシステム・ソフトウェアにあると言っても過言ではない。

従来のロボット開発に於ては、先にある機械が開発されて、次いでその機械を制御し操作するためのソフトウェアが作られているという図式の、いわゆるハードウェア先行型の開発パターンがとられてきた。これに対し、システムロボットの開発に於ては、基本ユニット内に分散するソフトウェア・コンポーネントを、全体として有機的に統合するためのソフトウェア体系を最初から考えておくことが特に重要である。

各産業のニーズの面からは移動機能、複数の腕、各種センサー等を統合し、それらが協調して動作することを前提とした作業例を多く提示されている。また、シーズの面からは、今後のマイクロコンピュータの技術進歩を踏まえて、100cpu程度の子システムへの指向が強い。このようなニーズ、シーズに両面に対し、システムロボットは格好の具体的な開発対象となりうるものである。情報処理の観点からは、次のような課題が重要であると考えられる。

#### (1) ロボット用プロセッサの開発

アクチュエータの制御、センサーの部分情報処理、座標交換用高速マイクロレイプロセッサ、データ駆動型プロセッサなど、ロボット特有の情報処理を効果的に実現するための小型軽量、停電力消費の高性能1チップ・マイクロコンピュータ。この開発により、アクチュエータやセンサー内にコンピュータが組込まれ、システムロボットの各基本ユニットの高性能化、知能化が推進されよう。なお、これらの専用プロセッサは、次項で述べるcpu間の通信を充分考慮したものでなければならない。

#### (2) 情報通信方式の確立とその標準化

システムロボットでは、各コンポーネント内に分散されたプロセッサ間の有機的な結合が重要である。そのため、マイクロcpu間の通信におけるインターフェイス及びプロトコルの技術を確立する必要がある。また、物理的に分散されたcpu間のデータ伝送路として、光ファイバにより多重・高速通信路を用いることにより、配線数の減少を図ることが大切である。手首とハンドやツールの着脱の際に、機械的結合だけでなく、パワーサプライ、情報通信の結合を考慮した複合コネクタマウントの開発を行い、ユニット間の標準化を進めることも重要である。

#### (3) 分散型ロボット用OSカーネル

システムロボットは、非集中／分散型の構成となるが、システムを構成する多くのcpu間の制御と通信を、統一かつ拡張性をもって行うためのロボット用オペレーティングシステムの各（カーネル）の構築は、最も基本的かつ重要な課題である。断層制御、平行プロセスらサポート等、100cpu程度の有機的統合を可能とする様な実時間処理用のOS技術を確立する必要がある。また、システムロボットでは、いろいろなコンフィギュレーションが展開されるので、各ユニットの情報面での抽象化を進めて、上位のソフトウェアとのインターフェイスを確立すると共に、ハードウェアのシステム構成に対応するソフトウェア上のコンフィギュレーションを自動的に生成し、調整する技術も考慮に入れておく必要がある。

#### (4) 故障・異常状態の監視と対応処理

複雑な構成のシステムロボットを安心して使用する為には、個々のアクチュエータやセンサーのレベル、それらを複合使用する動作レベル、作業レベル等、各レベルにおける故障や異常を常時監視すると共に、不都合が生じた際の回復をサポートするための情報処理が必要である。前項で述べたOSのもとで、機械の状態を監視するプロセスが平行して走り、一度異常が起れば、その回復を支援する体制がシステム内に組込まれていなければならないということである。

#### (5) 知能及びロボット作業用データベース

機械の保守や人間の援助など、作業環境が様々に変化し、また例外処理作業が多くなる場合、予め全ての環境条件に対応した動作を指示し尽くすことは困難である。環境変化に対する適応能力がなければ、未知の状況に直面した場合に困惑し、なす術がない。この様なときにロボットの知能の真価が問われる。環境変化に対する適応能力を実現するためには、動作、環境、及び動作と環境の相互関係に関する知識（動作の前提条件、動作の結果生ずる環境の変化）を効率的に処理するデータ構造及び処理手続きの確立が必要である。また、膨大な知識の中から関連ある知識のみを高速に検索する手段、更に動作手順の変更により、目的が適切に達成される場合には、過去の動作履歴を分析して、自動的に適切な動作を変更することも必要であろう。このような機能を実現するためにロボット向けの知的情報処理と、作業用データベース技術を開発することは、特に、システムロボットのシンボルとしての汎用知能ロボットの場合に不可欠であろう。

### 4-2-6 マン・マシン・インターフェイス

ロボットの数が急速に増加するにつれてこれからのロボット技術は、システム化と共に使い易さの問題が重要視されてくると思われる。使い易さの1つの側面としてのマン・マシン・インターフェイスの改善に関しては、次の様な開発課題があげられる。

#### (1) ロボット動作言語

人間の思うままに作業命令のできる、記述能力の高い言語の開発が重要である。当面、この機能は対象物の操作を中心に記述し、そのプログラムの細部仕様は極力自動的に生成されるものを指向する。ロボットに

は多数のプロセッサ群が用いられる。ロボット言語は、これらプロセッサの技術革新に柔軟に対応でき、しかも群管理にすぐれた、移植性の高い言語の開発を狙いとす。

更に高度の言語として、最終的な目標状態のみを指示するだけで、途中の状態遷移に必要な操作手続きを自動生成できる機能をもつ言語も考えられる。これを実現するためには、問題解決手法を応用したプランニングシステムの開発まで必要となる。

## (2) 環境モデルの教示と表示

動作の記述と環境の教示は、ロボットプログラミングシステムの両輪である。動作言語の記述水準が高くなるにつれ、表面的にみたテキストの量は、動作の記述に比べて環境教示に関する部分が相対的に増加していく。従って、環境モデルを教示する為の人間の負担を減らすことは重要なことであり、そのための指示手段、計測・認識手段、表示手段などの研究開発が課題となる。また、自動合成された動作の適否をシミュレータを用いて、高速・高精度グラフィック表示して実行前に確認することも、ロボットプログラムのデバックの際の能率向上に大きく役立つ。

## (3) 各種の情報伝達の手段の充実

ロボットに指令を与えるための自然な手段として、音声認識や手書きの文字や図形の認識、更に、遠隔操作の際の汎用操縦棒などが有効である。また、ロボットからの応答手段としては、音声合成や高速・高精度・カラーグラフィックなどが有効である。いずれの場合にも、ロボットとの円滑な対話を達成するために、高度のQAシステムと連動するようになっていることが望まれる。

### 4-3-1 建設ロボット「ロボドーザ」

ここで、建設ロボット「ロボドーザ」を提案する。この建設ロボット「ロボドーザ」は、前記システムロボットの6構成ユニットのすべてを含んで構成される。

#### (1) 「ロボドーザ」の使用目的

人間がそのまま立ち入れないような悪環境化における建設作業や、運搬作業を人間の操縦により人間に代わって行うことのできるメカロボットを想定し、これを「ロボドーザ」と名づける。人間の立ち入れない悪環境とは、巨木が生い茂る熱帯のジャングルとか、アメリカ・カリフォルニア州の死の谷(デス・バレー)のような炎熱・乾燥の地獄の沙漠とか、あるいは故障した原子炉の近くで放射能被爆下にある地域、などをさす。

#### (2) 「ロボドーザ」の概略イメージ

「ロボドーザ」の概略イメージとしては、作業に使役されるインド象と子供向けに出てくるメカザウルスロボットを結合したようなものを想像して頂きたい。

インドやパキスタンあたりで、温順なインド象をブルドーザやトラック代りに材木の運搬作業などに使っている写真をよく見る。象の場合、対象物を巻いて運搬するが、この鼻は、さながら手のごとく器用に動いてなかなか機能が高い。しかし、①巻きつけるという保持方法、②1本しかない、という2つの大きな欠点があり、力が強いという点を除けば人間の2本腕には遠く及ばない。従って「ロボドーザ」には大きな腕が2本あり、その先端に更に小さな腕が2本ずつついている。足は6本あり、6本足全部のひざを曲げると車輪部が突出して4輪の車輪走行が可能となる。ボディには浮上用空気袋がついていて必要に応じ気球となり空中に浮上する。頭部には人間が入って操縦するコックピットがある。コックピットはそれ自体が独立して飛び出すことができ、空中浮上ならびに車輪走行ができる。

以下、各種構成ユニット毎にもう少し詳しく述べる。

##### 1) 移動機能

歩行形式と車輪移動形式の併用方式である。足は6本ある。歩行形式において、移動中常に静的安定性を保つには5本以上の足が必要である。左右対称性からここでは6本足とするが、8本以上あっても差し支えない。

前二足と後二足のひざ部には車輪計4個がついている。6本足すべてのひざを折れば、この車輪により平地走行が高速でできる。

目的地へ至る道が無い悪路で通行不可能な場合、空中に浮上することにより目的地まで達する。そのた

め、ボディ内に浮上用ガス袋が収納されていて、これにHeガス発生装置から発生したガスを充満させると空中にフワッと浮かぶことができる。

## 2) 感覚機能

感覚機能のうち最も重要な視覚機能は、基本的には操縦者のそれを用いる。その補助手段として、ズーム機能を有する一対の望遠鏡と、更に作業対象や作業環境を近くでよく見ることができるよう、手先に設置された近接視覚装置の二種の視覚装置を有する。

その他、後方からの危険物の接近を感知できるよう、後方を常に眺めている人工眼が一対設けられていると都合がよいであろう。

## 3) 作業用マニピュレータ

マニピュレータとしては重作業用の大マニピュレータ2本と、それぞれ先端に精密作業用の小マニピュレータが各2本ずつ計4本設けられている。従って大小計6本のマニピュレータが設けられている。小さいマニピュレータの片方の先端には、上述の近接視覚装置が設置されていて、対象物やまわりの状況をあらゆる方向から眺めることができる。

## 4) ボディの役割

ボディの役割は構造物としての基本的役割の他に、浮上機構や作業ツールの収納とエネルギー源の内蔵という2つの大きな役割がある。

浮上機構は前述のようにヘリウムガス発生装置と浮上用空気袋である。また、エネルギー源としてはガソリンタンクの他に、バイオマスエンジンを搭載している。バイオマスエンジンは人跡未踏のジャングル中に長く滞在して建設作業を行うときに有効である。

## 5) 情報処理装置

6足の制御、大小4本のマニピュレータの制御、視覚情報処理、人間操縦の補助機能などを行うために強力なコンピュータが搭載されている。コンピュータや電子回路はほとんどCMOSで構成され、低消費電力となっている。

## 6) マンマシンコミュニケーション

頭部のコックピット内の人間より操縦される。操縦には手先の感覚のフィードバックが必要である。人間と機械との間の情報伝達は極めてよく行われているため、あたかも自分の手のようにマニピュレータが操縦される。このコックピットは本体より離れていても同等の機能が発揮できる。すなわち、遠隔操縦が可能である。

### 4-3-2 原子力ロボット

原子力ロボットの形態は、原子力プラント作業ロボット開発に関する研究報告書（昭和56年10月日本産業用ロボット工業会編）にも示されるように多種多様である。

ここでは水中やパイプ内を除けば、作業環境に柔軟に対処できる原子力ロボットの例をあげる。

図4・3・1は原子力ロボットの構成例を示す。移動のためには、はめ込み式の脚が用いられる。脚は、先端に取り付けた移動用ツールを取り換えれば、アームとしても用いることができる。平坦地走行のために、脚の先端に車輪を取り付ける。階段等の不整地を移動する場合は、車輪を固定し、脚により多足歩行を行う。それでも不十分な場合は、移動用ツールを取り代える。強力なグリップ（指）を先端に取り付けることにより、鉄骨組等をよじ登れるようになる。

こみ入った個所での作業には、アームによりその個所へアクセスし、細かい作業は先端の多自由度指やマイクロアームで行うことができる。作業の監視は、アームの先端に取り付けられたローカルビジョンを通して行われる。

ロボットの扱う作業対象は、大きいものから小さいものまでバリエーションがある。1本のアームで扱いきれないものは2本以上のアームで、更には多くのロボットの多くのアームによりハンドリングされる。

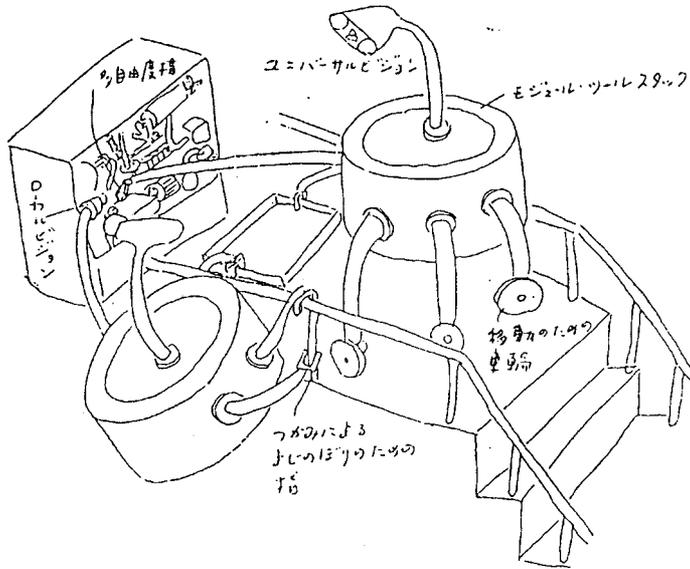


図4・3・1 原子力ロボット

#### 4-3-3 宇宙ロボット

図4・3・2は、大型構造物を宇宙空間において、ロボットが組立てる作業例である。ロボット①は構造物の基本となるビームに組立てるロボットで、6本のアームとパーサタイルビジョン及びボディから成り立っている。アームは対象物を操作すると共に、自己の位置と姿勢の保持、更には移動のために使われる。

ロボット②は、アーム又は脚により移動をロケット推進による移動にかえたロボットである。ロボット①のような空間を飛びまわれないロボットに、資材を供給したり、足場のない場所での作業を行う。

ロボット③は、ロケット推進による移動機能を持つローカルビジョンである。固定的なビジョンでは見にくい個所を見たり、対象に充分近づいて組立ての状況を監視したりするために使われる。

ロボット④は、大型構造物を最終的に組上げるもので、クレーンのような大型のアームとレール沿った移動機能から構成される。大型部材を組合せるために、ロボット②の助けを借りる。ロボット②は部材の先端を誘導し、組合せ作業と制御を行う。このロボットはまた、資材の運搬を行ったり、ミニアームを先端にはめ込み、広い領域で組立て作業を行ったりする。

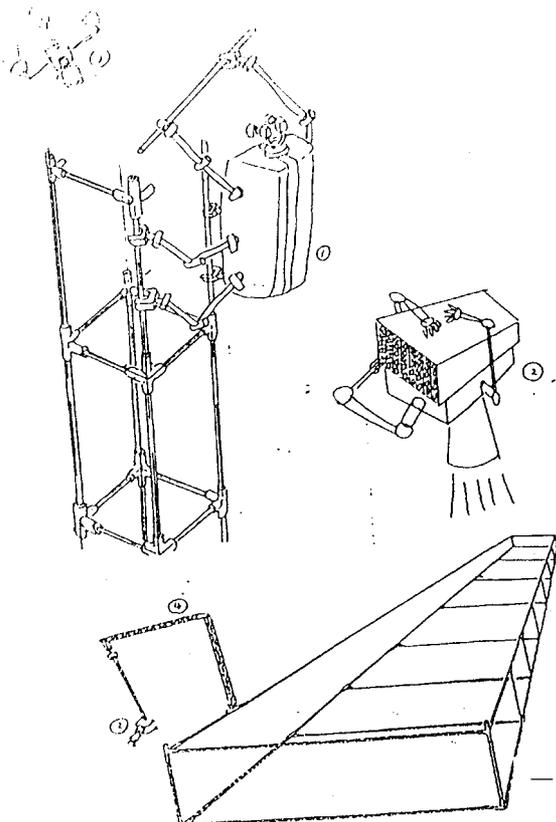


図4・3・2 宇宙ロボット

#### 4-3-4 災害救助ロボット

現在の地球上では、地震、洪水、台風、津波、火災、などの自然災害は避けられない。また、ビル火災、炭鉱のガス突出事故、タンカー爆発、石油コンビナート炎上、原子炉事故、地下鉄火災、旅客機のジャンクル内墜落、爆発物処理などの人災、半人災的な事故は後を断たない。

これらの災害時に危機に陥った人名を救助し、可能ならば災害の源を検知して原因を断ち、損害を復旧するロボットが必要となる。災害ロボットは勿論種類ではなく、災害に応じて数種類のもが必要であろう。ここでは火災ロボットを例に上げて簡単に検討してみよう。なお、災害復旧ロボットとしては、図4・3・1の建設ロボットに類似の機能が必要となろう。

##### (1) 火災救助ロボットに必要な機能

###### 1) 人命探索

火災ロボットの最も重要な役割は、煙に巻かれて床に倒れている人間の存在場所を発見する機能である。これは人命探索と呼ばれている。この人命探索機能を全うするためには、人そのものの存在を見出すセンシング機能の外に、それに至る探索動作を可能とする機能が必要となる。それは、移動機能、階段登降機能、移動を可能とする通路・環境・障害物認識などの機能である。

更に部屋や扉や壁、場合によっては廊下の熱しゃへい扉を打壊する機能なども必要となってこよう。

###### 2) 消化作業

まず火元を見つけること（火災探索）が第1である。ロボットによる火元の発見に上述の人命探索と同等の機能が必要である。

火元を発見し直ちに消化作業に移るが、これには水を用いる方法と泡を用いる方法がある。水を用いる場合ホースを火元まで伸ばし、しかるのち注水する。注水後のホースの移動は極めて重く、作業が困難であるため、ジープ程度の強力な車両が必要である。また、注水中でも水圧を高めると大変な反力がかかるので、この反力に耐える意味でも強力な車両が必要である。

泡を用いる場合も水に泡を混ぜて使用するため、基本的には水の場合と同様である。

##### (2) 火災ロボット開発上の問題点

- 1) 悪環境である高温・高圧、煙、ガス、粉じんなど。特に耐熱構造が必須である。
- 2) 環境がきわめて複雑である人、物、構造物、置き物、部屋、廊下、階段など環境が複雑であり、これらに敏速に対応して行動を取らねばならない。
- 3) 計測対象の種類が多い。環境が複雑であることに加えて、温度、湿度、人体、ガス、位置、障害物、など計測量が複雑多岐にわたっている。

#### 4-3-5 ロボット組立工場

システムロボットは基本ユニットを適宜組合せることによって、各種の作業向ロボットの構成が可能である。生産システムにおけるニーズ調査の解答例を参照すれば、複雑な機械の自動組立ロボット、配線作業のロボット化、ゴチャゴチャに入っている部品の選別・整列作業、納品者からの荷おろしロボット、クレーンとロボットの協調作業、自動運搬者との連繋、などに対する要望が強い。組対象として電気・機械両面を含むロボットを取り上げ、システムロボットを用いた組立工場を展開してみよう。図4・3・3はシステムロボットを用いて計画した組立ステーションの構想図である。

搬送ロボットは自由に床面を走行できる。3軸姿勢制御可能な被組立物保持テーブルが搭載されており、ここに組立対象のベース部品が取り付けられる。搬送ロボットの荷台空間には、1台のロボットを組立てるために必要な全ての部品が積み込まれている。搬送ロボットは、中央のコンピュータから指示された組立ステーション内に入ってドッキングし、そこでロボットの組立が実行される。

組立ステーションは、小型門形クレーン（視覚、ハンド付き）、1本のパワーアーム、2～3本のミニアーム、各種のグリッパー、ツール類から成る。

アームの手首部には、フォースセンサーが組込まれており、ハンド部は着脱可能であり、各種グリッパー、ツール類と自動的に交換する。作業のビジュアルフィードバックを行うための視覚ユニットは、アームの先端に取り付けられ、最もよいアングルから作業を監視し、調節する。部品箱からパーツを探して取り出すために、ハンドには小型の視覚が組込まれている。

組立ステーションは、1台だけでロボットの組立と配線作業を完全に実施することができる。勿論、生産量を多くするために数多くの組立ステーションを並列運転してもよいし、或いは、組立作業をいくつかの

テージに分割し、数台の組立ステーションをシリアルに活用して、能率的な作業計画のもとに運転してもよい。また、人手の助けを借りたいときは、搬送ロボットが作業長のところに移動して行けば、そこで人手による組立も可能である。

現場の作業長と対話を自然に行うために、搬送ロボットには音声認識、音声合成、技術指令書を示すためのグラフィックディスプレイは標準装備とする。

ロボット組立工場は、上述の組立ステーションの他に、加工工場から搬送されてきた部品や納品されてきたパーツ類から、1台のロボット分の必要部品から取り出して搬送ロボットへ収納する。部品調達ステーション、トラックで外部から搬入されてきた部品の荷卸し、開封等を行うアンロードステーション、出来上がったロボットの動作と性能試験を行うテストステーションなどから構成されることになる。参考までにこれらの工場内配置図の例を図4・3・4に示す。

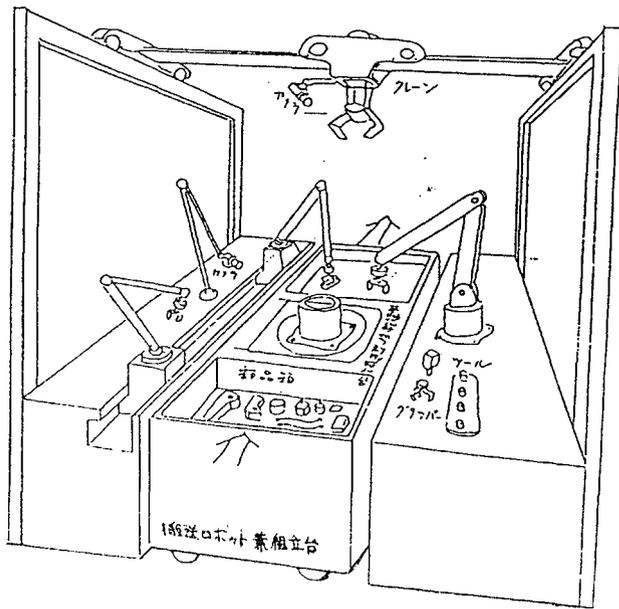


図4・3・3 組立ステーション概念図

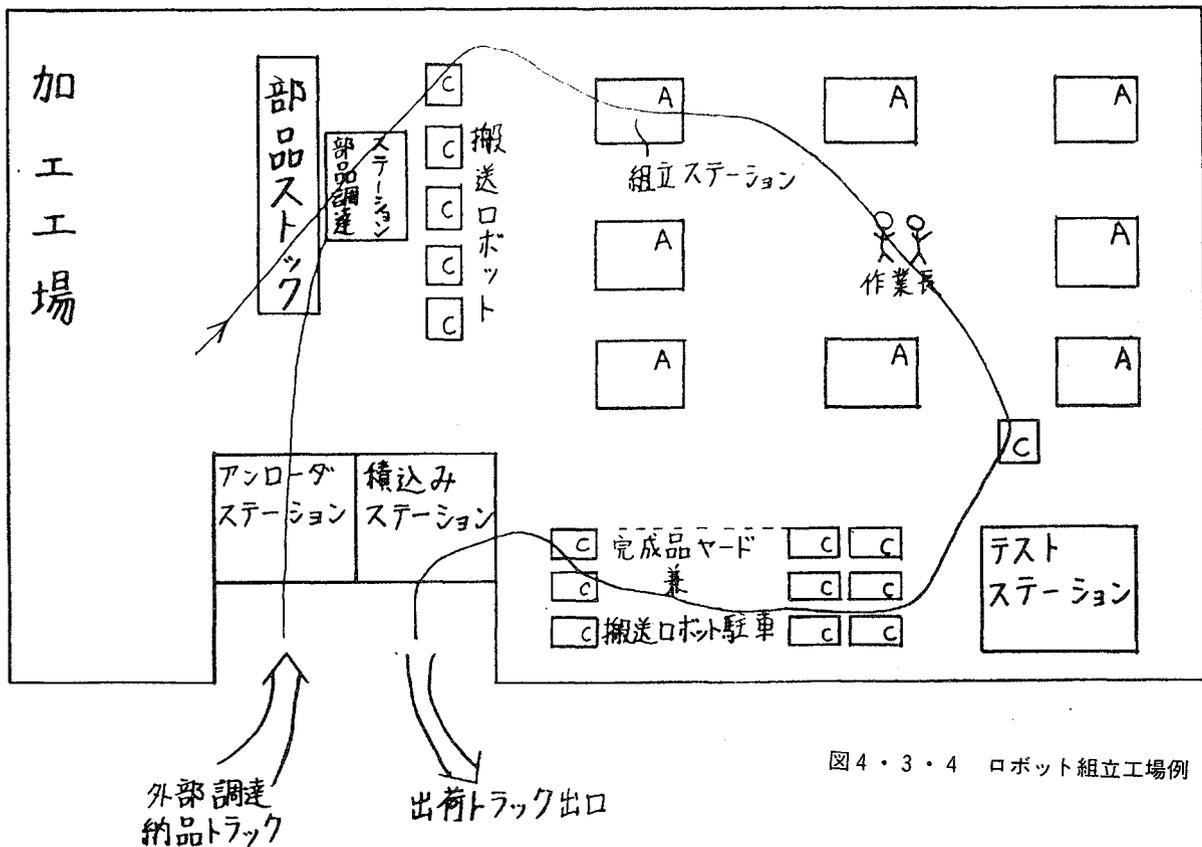


図4・3・4 ロボット組立工場例

## 5. 今後の課題及び結言・提言

### 5-1 海外における状況

高度自動化機械の開発に対する先進諸国の熱意は、看過できぬほど高まっている。米国では、大小様々の研究開発計画があり、民間産業のみならず軍事、宇宙、海洋に係る特殊な計画も多い。例えば、オハイオ州立大学が中心となって遂行中のUMV計画(Ultra Mobile Vehicle Project)は有肢歩行形作業ロボットであり、明らかに宇宙開発用として国防省がサポートした大がかりなものである。米国におけるこの種の計画は多数にのぼっているのは事実であるが、国家計画として十分にまとまって発表されていない。(表5・1・2)

欧州では英国、フランス、西ドイツなどが盛んである。

表5・1・1、表5・1・2にその要点がまとめられている。表から見られる通り、政府の政策は二つに大別できる。第1は実用化された産業用ロボットの普及促進であり、第2は基礎開発計画である。後者の代表例は、英国ではSCAMP計画、フランスではARA計画、西ドイツではHWC計画である。フランスのARA計画は1980年10月に従来のSPARTACUS計画を更に大規模化したもので、その最大の特徴は、全国の大学・国立研究機関だと総計30以上の研究期間を統合的に研究管理している点にある。西ドイツのHWC計画は労働の人間化とも言うべき広範囲のテーマをカバーする計画である。

#### 表5・1・1 政府の普及促進策

##### JIRA Survey (1981)

UK:

##### ①産業省 … 民間企業

ロボットの導入のための feasibility study費用 (Consultancy studies) の50%補助、ロボット購入費の25%補助 (補助金枠 1000万ポンド 81年発足)

W. Germany:

##### ①研究科学省 … 民間企業

Humanization of Working Condition  
DM 2.77 Mio. 約3億円 (1976-81)

フランス:

##### ①ANVAR … 中小企業 (3,000名以下)

Innovation Aids 330 Mio. F (1979)  
(Licensing, market study, 480 Mio. F (1980)  
experiments, conception and realization of prototypes)

##### ②工業省 … 民間企業

10億フラン (500億円) 定額設備資金 (1981)

##### ③工業省 … 民間企業

Middle Term Inovator Loan 75Mio. F 2-7 years loan

##### ④工業省 … フランスロボット工業会 750T. F (1981)

##### ⑤ADEPA … 1000名以下の会社

(Agency for Automated Production Development)  
投資の20%を補助 25 Mio. F (1980)  
60 Mio. F (1981)

##### ⑥Agency de l'Information 1000名以下の企業

投資の20%補助 11 Mio. F (1980)

##### ⑦ARA (Automatisation et Robotique Avanc'ee)

National Project (1981年発足)  
(1982年予算5億円)

表5・1・2 政府の研究開発助成  
JIRA Survey (1981)

米国：

- ①NSF … 大学への助成(Carnegie Mellon<sup>1)</sup>, SRI, U. of Rhode Island, Charles Draper Labs MSC, MIT etc.)  
人工知能、メカニカルシステムに関し、年間¥25, Mio~¥35, Mio 単位で各大学に交付
- ②NSF<sup>2)</sup> … Westing House (Programmable Assembly 過去4年間\$ 8 Mio, W. H. 投資 NSF 1.7\$(約4億円 補助)
- ③Dep. of Defense Air force … Mcdannel Douglas, General Dynamics への補助  
航空機翼加工自動化システム、ロボットのプログラム・ランゲージの開発等に対し助成
- ④同上 … ICAM Project (Lockyed, Douglas 等への補助19Mio, \$=44億円)
- ⑤Navy … San Diego Naval Air Facility,  
航空機翼リベット加工に\$ 1 Mio,
- ⑥National Aeronautics & Space Administration … Langly, Semi Automated Space Maintenance に \$ 1 Mio.
- (注) 1) 同大学ロボット研究所(1981年12月設立)に年間\$ 4 Mio, 補助(日経・平野記者現地ルポ)  
(基盤技術センタ Generic Technology Center(1981年度に設立。3つは商務省1つはNSF所管)に助成金を支給することを内容とした技術革新法を1980年10月成立させた)
- 2) National Project [APAS] 視覚付 IRs による小型モータ組立て自動化システム開発のために W, H に補助(日経・平野記者現地ルポ)  
National Center For Productivity & Quality of Working Life が1975年12月以降毎年15億円補助(民間研究機関対象)

イギリス：

- ①Science Research Council … 大学と民間の共同研究へ補助  
ロボット研究開発のための各種研究 Projects (1981—83) 約10億円
- ②産業省<sup>3)</sup> … National Engineering Lab, (APS計画<sup>4)</sup>を総括している)にロボット研究に2億円(1981—83)
- ③同上 … 産業省は民間企業の IRs 研究開発の25%補助
- 3) 産業省 … 1982年6月8日FMS振興策4ヶ年計画(予算枠6000万ポンド(約250億円)を発表)
- 4) APS計画(工場自動化計画(1976~)開発費14Mio, ¥56億円)  
SCAMP(600 Group 政府補助、開発費、約13億円(1980~1982)(日経平野記者現地ルポ)

西独：

- ①研究科学省<sup>4)</sup> … 研究協会、大学、民間  
National Project [Humanization of Working Life] DM, 36.1 Mill, (1976—1983)
- ②研究科学省 … 大学、研究協会、民間  
センサー、IRs 研究にDM, 12.2 Mill, (2億円)
- (注) 4) National Project [Production Technology] DM, 35 Mio, (1978—80) 81以降継続  
4) Humanization of Working Life DM 304 Mio, (1974—80)  
81以降継続  
4) FMS … ザハンラドファブリーク者、Stuttgart 大学、ミュンヘン大学(約60億円補助) gear box 無人加工システム(日経・平野記者ルポ)

フランス：

- ①DGRST(General Delegation for Technical and Seientific Resarch) … 民間、公的機関へ補助 F380 Mio, 約190億円(うち約10億円 Robot関係)
- ②ANVAR (National for Reserch Volorization) … 中小企業(2,000人以下の企業) 1社 MF まで研

究費の25%補助 F150 Mio. 約75億円（うち約4億円 Robot関係）

(注) 5) CNRS (化学技術研究庁 … 大学、国立研究所、民間は補助ネオ・スパルタカス計画 (SPARTACUS project) 生産性向上を目的としたFlexible Automation 研究50億円

## 5-2 ニーズから見た高度自動化機械の開発課題

高度自動化機械の開発の要求は、製造業のみならず非製造業からも実に多い。これらの要求は各々の分野での切実なものであり、それぞれ多くの開発課題を有している。しかし、これらの課題をロボット工学から総合するとかなり共通的なものが抽出できる。

従って、高度自動化機械では要求のある各システムをそれぞれ開発対象とするよりは、各システムにある程度共通した要素技術の開発を軸にして、研究開発に着手することが望ましい。これは研究開発要因や費用の有効活用とを考え合せれば極く当然であろう。高度自動化機械の開発要求から抽出される開発課題は次のようにまとめられよう。

- 1) 高度の要素技術（特にセンサー類）
- 2) 特殊環境下での作業技術（高所、高温、地下、水中等）
- 3) 熟練工不足に対処する高い知能性

悪環境作業や危険作業といった、比較的自動化が遅れ、かつ人間にとって好ましくない作業の自動化要求は大変強い。このような作業は製造業に比べて非常に高い知能性の必要な作業のため、中・長期の技術開発課題分野として、これらの作業の自動化に貢献しうる要素技術を集約した開発テーマの設定が望ましい。また、これらの作業は、原子力プラント・炭鉱・電力プラント・石油コンビナート等国の基幹産業に関連するものが多いのも特徴といえよう。

以上をまとめると、ニーズを要約した開発課題は敢えて名付けるならば、極限作業用ロボットの開発と言えよう。この開発計画によって、たとえば炭鉱の作業（坑道、切羽内など）、災害防除作業（ビルやコンビナート火災時）、原子力プラント保全作業などが無人化され、その社会的な効用と意義は極めて大であろう。

## 5-3 シーズから見た高度自動化機械の開発課題

高度自動化機械の開発に必要な要素技術は次の3種にまとめられよう。

- 1) センサーを中心とした感覚機構と、その信号処理技術の開発
- 2) 高度の作業を実現するためのメカニズムと、それを構成する材料の開発
- 3) 多くの要素を組み合わせた機械の制御技術と、高度の知能性を発揮するための情報処理の技術の開発

センサーとその信号処理の技術は、現在の自動機械や産業用ロボットの分野でも広く開発が要求されている要素技術である。また、高度自動化機械ではその性質上、移動機能が不可欠であると考えられるが、移動機械のためには従来には無いタイプのセンサーが必要であるとも指摘されている。

メカニズムや材料の分野では、高所・高温・地下・水中等の特殊環境下で十分に良い作業性を発揮する機構・材料を開発しなければならないだけでなく、独立型の作業機械ではシステム的にも高い信頼性が要求される。また、移動型の機械では特に高品質のエネルギー源の開発も必要である。

更に、高度自動化機械を完成させるためには、機械システムの制御は勿論、人間の操作者（指令者）とのコミュニケーションをはじめ、各種センサーからの情報をまとめて全システムを管理する情報処理システムは不可欠である。この問題は従来、計算機化学の分野で人工知能問題として研究されているが、その初の応用例として開発されれば、高度自動化機械のみならず、他の多くの分野への波及効果は計り知れないものとなる。

以上の3つの要素技術の開発に成功すれば、最終的には前節に名付けた極限作業用ロボットは、知能ロボット本体及び工事の管理運用システムとしての統合管理システム (supervisory system) から構成されよう。

## 5-4 結言

高度自動化機械の概念のもとで調査研究を行った。

シーズ調査及びニーズ調査をもとに得られた結論、及びそれらを総合的に討議した要点をまとめると以下のようなになる。

- (1) ニーズ調査から導出された高度自動化機械の開発課題は、言うなれば極限作業用ロボットの開発に尽

きる。すなわち製造業のみならずそれ以外の極めて広い分野で、現在かなり危険な作業が劣悪な環境下でやむを得ず行われているが、そのような作業は炭鉱、ビル、コンビナート、原子力プラントなどで大規模な事故につながる可能性も指摘されており、公共の面からも早急に自動化をせまられている課題となっている。

(2) シーズ調査から分析された開発課題は、センサー・認識機能、メカニズム・材料、制御・情報処理の3つの要素技術の開発テーマのもとにまとめられた。これらの要素技術は、最終的には極限作業用ロボットとして、高度知能ロボット本体と統合管理システム (supervisory system) にまとめ上げられよう。

(3) 以上の調査結果をもとに、今後のわが国における高度自動化機械のあり方、技術的な開発計画、諸外国における実情、などを総合的に判断して結果本委員会としては、国家的なレベルで行われるべき以下のような開発計画案を提示する。

- ・極限作業用ロボットシステムと呼ぶべき研究開発計画を樹立し実施する。
- ・この計画は上記(2)で指摘した要素技術の開発を柱として構成され、最終的にはそれらの成果を総合して一つの極限ロボットシステムにまとめあげることが可能である。
- ・本計画の実施にあたっては、多くの専門分野の学校、技術者の参加が必須であり、最終ゴールに至るまでにはかなりの規模と機関を要するであろう。
- ・極限作業用ロボットシステムは、高度な知的機能を備えたいわゆる知能ロボット本体、及び作業目的に応じた統合管理システム (supervisory system) からなる。
- ・本システムは、期待される応用分野は極めて多岐にわたるが、極限作業という特殊な作業環境と困難な作業条件を強いられるため、知能ロボットには作業目的に応じた多くの種類の特化機台をもつロボットが必要と思われる。また人間オペレータがロボットを直接操作・操縦して高度の判断・思考機能を分担することも要請されよう。そのためのman-robot系工学的問題の基礎技術はあらゆる極限作業にとって共通的に必要であり、この点は計画策定にあたって十分に考慮すべきである。

以上に提示した大規模な研究・開発計画は、高度自動化機械の革新的な技術突破口を与えるのみならず、他の産業分野への波及効果もきわめて大きいものと思われる。