

高機能移動式軽作業ロボットの開発

(Development of the Mobile Manipulator for Inspection and Maintenance)
(in Nuclear Power Plants and Application of the Modular Devices)

大道武生・穂坂重孝・西原正敏*

(Takeo Ohmichi) (Shigetaka Hosaka) (Masatoshi Nishihara)

中山淳二・佐藤正俊**

(Junji Nakayama) (Masatoshi Sato)

まえがき

原子力発電所では従来から、遠隔操作装置が積極的に開発・適用され、特に、作業者の被ばく低減に大きく貢献している。本種装置は対象作業を限定し、専用化されているために、最も高い機能を果すよう考案されているが、要求が多種多様となった場合、装置数が必然的に増大し、装置管理が複雑化する恐れが生じている。

一方、近年エレクトロニクスに代表されるロボット技術の発展は目ざましいものがあり、これらの技術の導入による汎用化されたロボットの適用によるパフォーマンス向上をはかる機運も起ってきている。

原子力発電所における汎用ロボット導入に対する最も大きな障害は、その環境性にあり、狭隘性からくる極端なまでの小型化、厳しい温・湿度条件、さらには耐放射線性等が、高い信頼性のもとに確立される必要がある。これらの要求を満足させるためには、従来の考え方代る新しい発想による設計を実現化するための要素技術の開発、先端技術の積極的導入が不可欠とされる。

本開発は、このような状況のもとに、運転中の異常の早期処置を行う軽作業マニピュレータを目指して、通産省補助事業のもとに5年間を費やして実施された。

すなわち、仕様の絞り込みから着手し、小型化検討と設計の精度向上、マスタスレーブマニピュレータの制御手法の開発と主要部品の開発、開発部品の性能評価と作業性機能評価用マニピュレータの

試作と進め、最終的に、移動脚を含めた全システムの試作・性能（機能・耐久性・耐環境性等）の確認を行った。開発は成功裏に終了し、今後の実用化が期待される。以下に、その要点のみを記載することとする。

1. システム構成

1.1 全体システム

図1に示すように、本ロボットは大別して、容器内で動作するスレーブロボット部と中央制御装置部から構成される。

スレーブロボットは、モジュール化されたマニピュレータアーム本体と、制御装置を実装したスレーブ制御装置・走行台車および立体視覚装置に分類される。

スレーブ制御装置は、多重化通信装置・各種センサ信号処理部・駆動用信号処理部・電源部が組込まれ、必要な情報信号は、光信号化されて中央制御装置とリンクされる。

走行台車は移動用のもので、車輪走行、ほふく走行が可能なように計画されている。

中央制御装置は、メインパネル・走行パネル・ジョイスティックパネル(JSパネル)およびマスターアーム装置に分割される。これらの各装置は全て光ファイバで連結されるため、その配置関係は自在とすることができる、非常に柔軟な使い方ができる。

視覚装置は、任意位置からの目視による監視を可能とできるように、多自由度マニピュレータに搭載されていて、その先端部に立体カメラ装置が搭

*三菱重工業㈱ 高砂研究所
(Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

** 神戸造船所
原稿受付 昭和61年3月17日

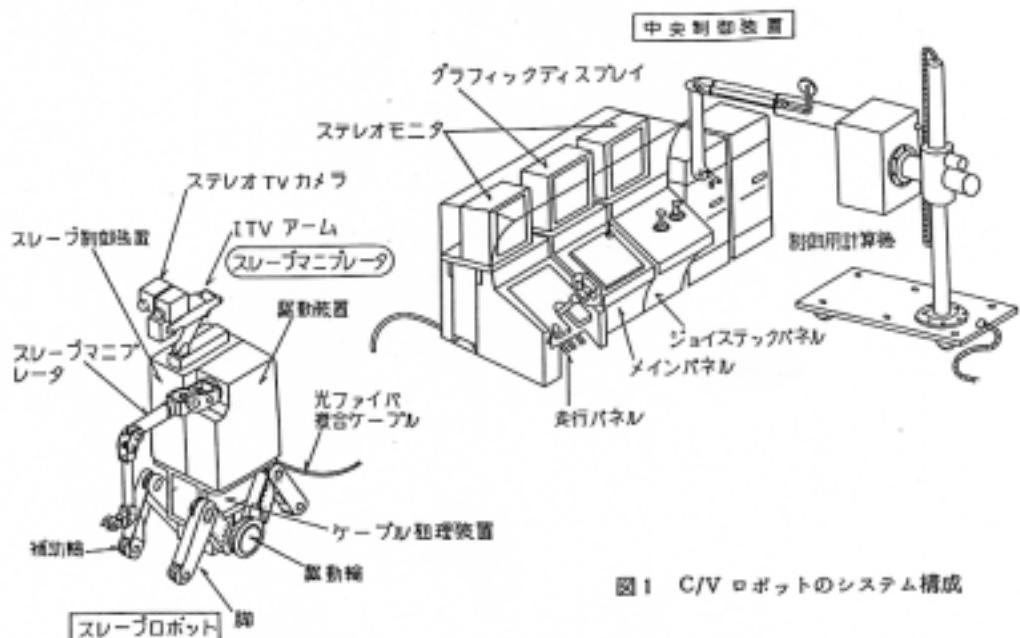


図1 C/V ロボットのシステム構成

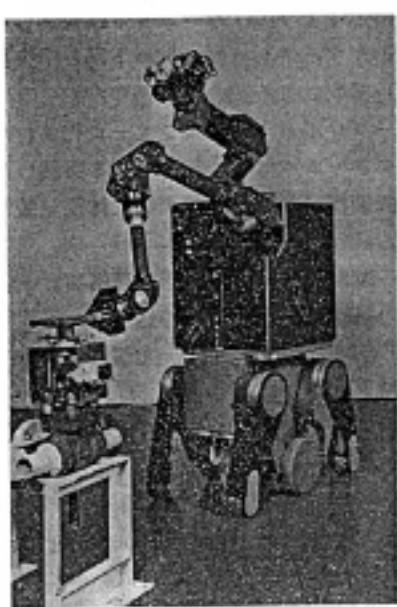


図2 バルブ保守中のC/V ロボット

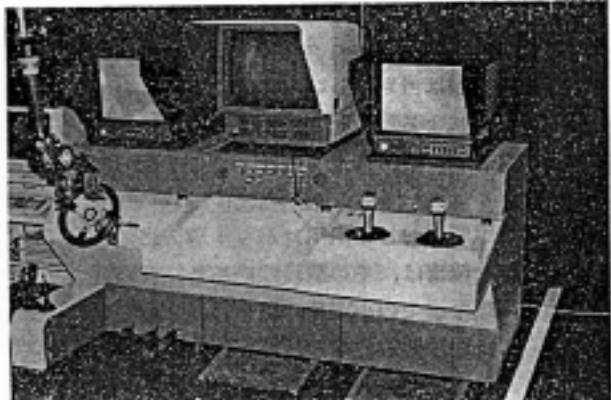


図3 中央制御装置

ト外観イメージを、図3に、集中配置化された中央制御装置の外観を示す。

1.2 スレーブロボット

(1) スレーブアーム

図4に示すように、スレーブマニピュレータは7軸（肩：S軸、上腕回転：L軸、肘：E軸、下腕回転：A軸、手首振り：W軸、手首回転：T軸、グリッパ：F軸）から構成される。

各軸の駆動には、アーム重量を軽減するために全てロープ駆動方式を採用し、滑車とアイドルブーリーを使用して、関節部とモータユニットとを連絡するとともに、強度部材にはカーボン繊維強化

載されている。

また、本システムには、作業の容易化と高速化をはかるため、工具システムが付加されている。

なお、スレーブロボットは完全にニット化されており、種々のシステムに容易に組みかえられるよう設計される。

なお図2に、作業状態におけるスレーブロボッ

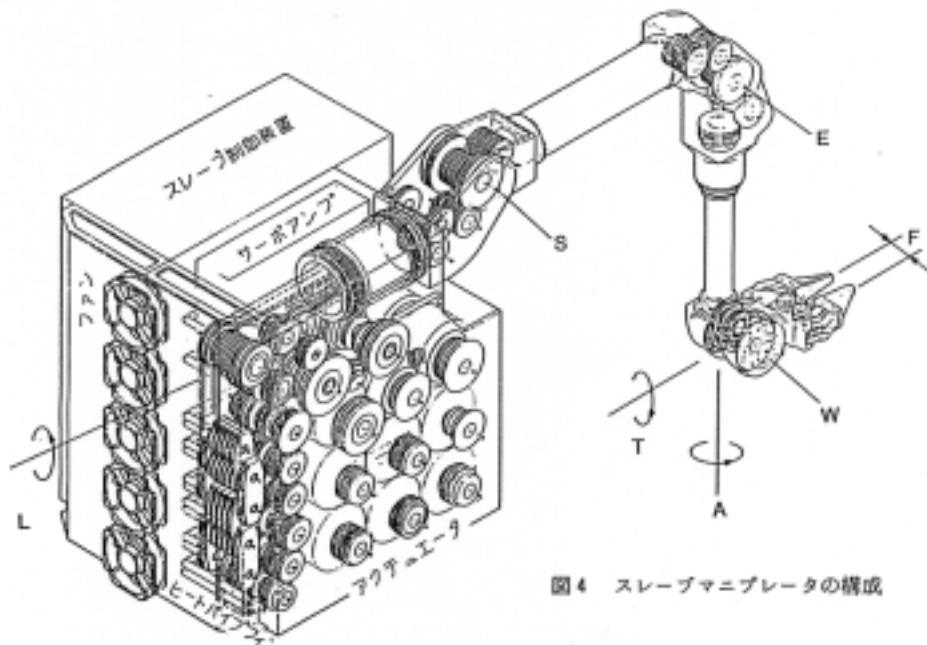


図4 スレーブマニピュレーターの構成

プラスチック(CFRP)を全面的に採用し、一層の軽量化を行った。

筐体は、モータユニット出力軸(減速機軸)で全てシール構造とし、モータの発生熱はL型ヒートパイプを使用して除去される。また、上部に組込まれたサーボアンプもモータユニットと同様に冷却される。

(2) スレーブ制御装置

図5に示すように、スレーブ制御装置は、電力ケーブルと光ファイバケーブルを一体とした複合ケーブルによって中央制御装置と接続されており、スレーブロボット側に必要な電力およびデータの転送を行っている。一方、光ファイバによって4波長多重で転送される信号は、光通信系およ

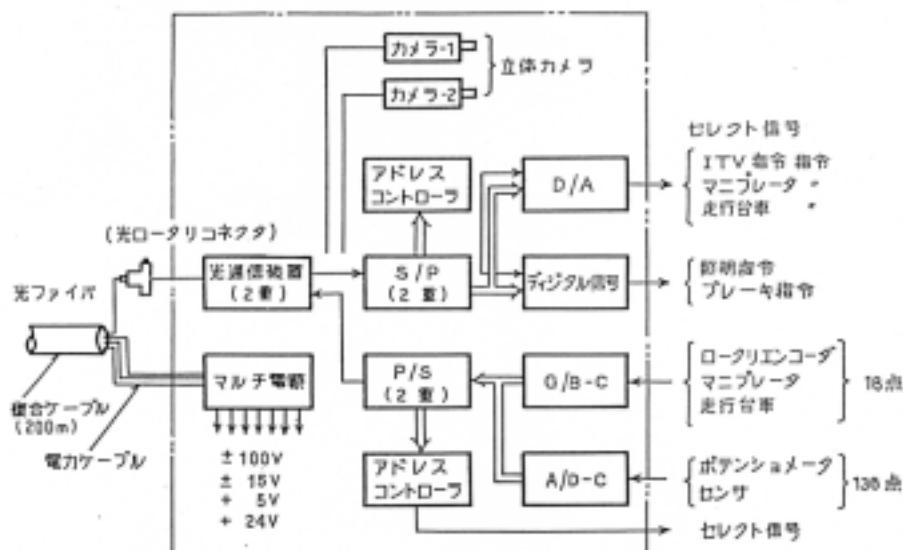


図5 スレーブ制御装置電装系ブロック線図

び、本ロボットシステムのために開発された専用ICで処理される。これらの回路はそれぞれ2系統設けられ、情報伝送の信頼性の向上をはかっている。

(3) ITV アーム

ITV アームは、5軸+幅狭角調整軸の6軸で構成される ITV カメラの案内用マニブレータ装置、立体感覚を得るために設けられた2台の ITV カメラ、モータで絞りおよび焦点調整機構が連絡でドライブできるレンズ、照明に用いるライト、臨場感を得るために設けた2台のマイクロフォンから構成される。ここで、作業用のマニブレータ手先部をマニブレータの腕部にさえぎられることなく目視可能とするために、ITV アームは、その伸長状態ではカメラ先端がマニブレータ肘軸位置まで届くよう配慮されている。(図8)

(4) 走行台車

移動装置としての走行台車は、本体下部両側に駆動輪、4脚の各足先に補助輪の、合計6輪の車輪を有し、床面走行の機能を有する。また、前後左右に4本の脚を有し、1本の脚は股および膝の2関節で構成されており、凹凸面および階段昇降機能を有する。

さらに、脚の間にケーブル処理装置があり、台車の動きに対応したケーブルの送り出し、巻取り機能を有する。

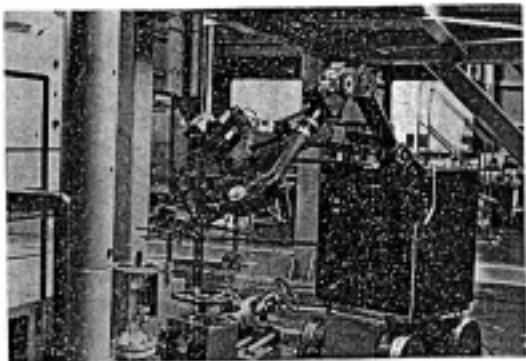
移動の信頼性を上げるために、距離センサ(本体前後に2個、足先に4個)・接地センサ(駆動輪に2個、補助輪に4個あり)・傾斜センサ(本体内に2個)・マークセンサ(本体底部前後に2個)を有する。

ここで、サーボアンプも本体前部に搭載され、走行台車すべてのモータのドライブを自分自身でも行うことができる自立性の高い装置となっている。

1.3 中央制御装置

(1) メインパネル

メインパネルは、スレーブロボット・マスター・JS パネル・走行パネルのそれぞれと、計算機間のデータ伝送のためのインターフェイス、および電源関係の統括機能を有している。また、グラフィックディスプレイとタブレットを用いて操



伸長状態における前方目視

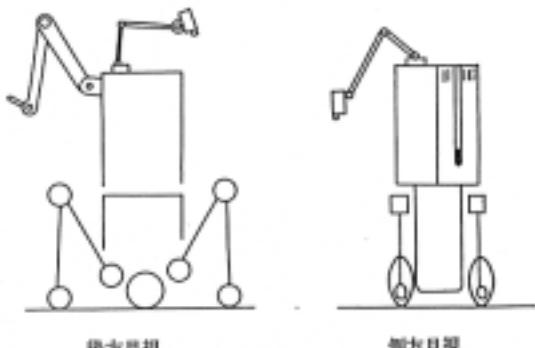


図8 ITV カメラアームの動作状態の例

作モードの切換、あるいはスレーブロボットの状態をモニタするなど、操作パネルの中心的な役割も受持っている。(図7)

(2) JS パネル

JS パネルは、力フィードバック可能な4自由度のジョイスティック2本、およびスイッチ式立体テレビモニタから構成され、ITV アームまたはマニブレータの操作器としての機能を有する。

(3) 走行パネル

走行パネルは、自動車の運転席を模擬した操作部と、JS パネルと同様なスイッチ式立体テレビモニタから構成され、走行台車を運転するための操作器としての機能を有する。

(4) 立体モニタおよび表示系

中央制御装置は、3面のブラウン管を有しており、JS パネル・走行パネル上の2面はスイッチ式立体モニタであり、メインパネル上の1面は操作モードメニューあるいはスレーブロボットの状態を表示するグラフィックディスプレイである。

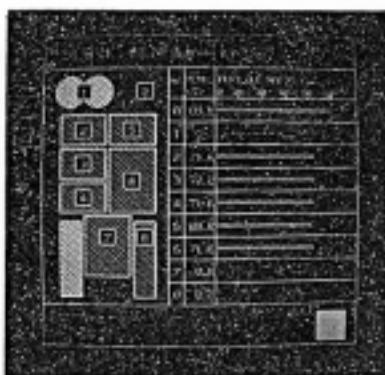


図7 グラフィックディスプレイへの表示例

スイッチ式立体モニタは、カメラ制御器・スイッチ・モニタおよび電子シャッタを使用した鏡から構成される。

(5) 音声入出力装置

音声入出力装置は、信号処理用プロセッサ・音声認識装置・音声合成装置から構成され、スレーブロボットのITVカメラの操作器としての機能を有する。

(6) マスタアーム

基本的にはスレーブと全く同様であるが、操作者との取合いから、L軸を延長したこと、自重補償にカウンタウェイトを取りつけたことが主な相違点である。

(7) 専用工具

システムに必要とされる工具の種類を極力減ずるよう配慮し、図8に示すように、工具を区分けした。

図8で、手工具とはマニピレータのみの力で作業可能なもので、電動工具とは工具自身がトルクを発生するものを示し、汎用とはかなり多数の非形状に対応可能なものと示す。図8では考え方を明確化するため、大多数の非類が汎用電動工具と手工具で対応可能としたが、もちろん、極めて特殊な形状の非については小トルクでも専用工具を必要とするものがある。試作工具の一例を図9に示す。

2. システムの特徴と機能

2.1 機能的特徴

(a) 格納容器内の狭い通路を通過でき、凹凸面

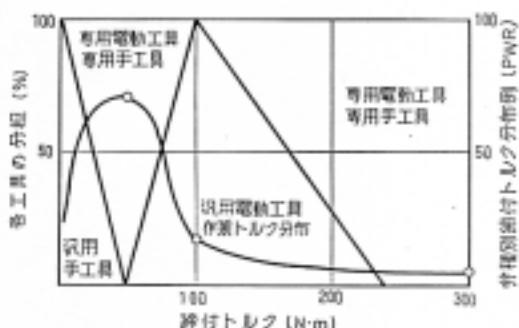


図8 作業対象トルクと工具の領域分担

等の3次元移動ができる。

- (b) 専用工具との協調によって、種々の作業ができる。
- (c) プラント側へ付加する設備を殆ど必要としない。
- (d) 地震時を含め、プラントに対し悪影響を及ぼさないよう配慮されている。
- (e) 実用を考えた場合の十分な環境性を有している。

—などの特徴を有するが、何といっても最大の特徴は、実プラントを想定した形状寸法に仕上がったことであり、この制約の中で装置としての移動能力と作業能力を実証したことにある。

2.2 技術的特徴

本マニピレータは極めて高度な要求により開発されたもので、種々の技術的特徴を内在する。

- (a) 超小型光部品の開発
- (b) 4波長多重光伝送システムの開発
- (c) 脚式ほふく移動方式の開発
- (d) 全CFRP超軽量アーム
- (e) 耐環境対策
 - (i) 高効率冷却方式
 - (ii) 全密閉構造
 - (iii) MIL部品の大幅採用
- (f) 耐放射線対策
 - (i) 部品選別手法
 - (ii) 耐放射線部品の抽出
 - (iii) 耐放射線設計手法
- (g) スイッチレス対話型制御盤
- (h) 多様なオペレーション
- (i) イメージ化操作装置

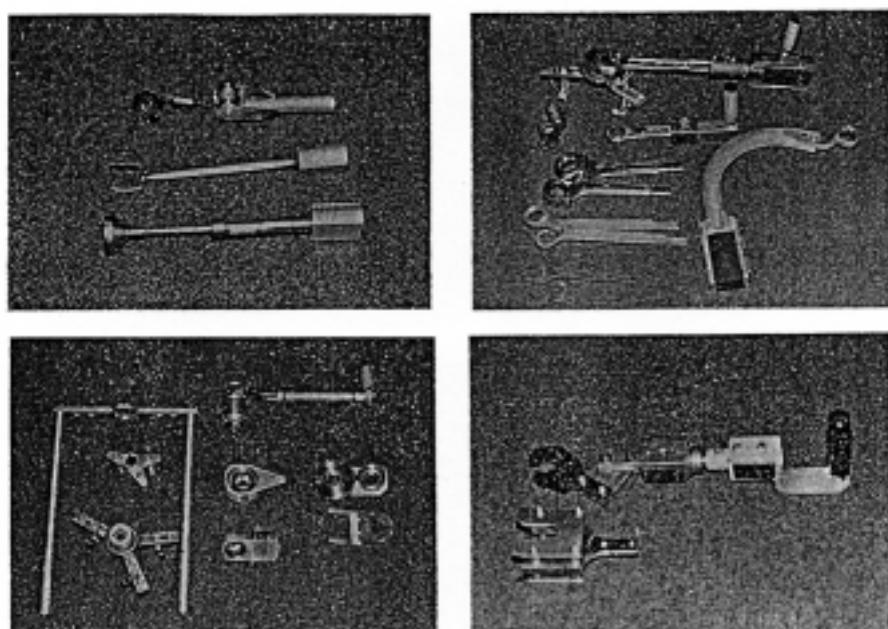


図9 開発された工具例

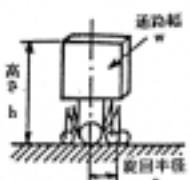
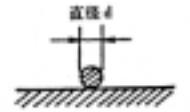
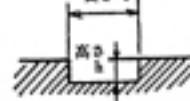
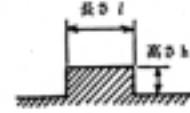
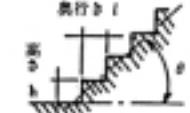
- (J) 分散モジュール型システム
 - (i) 拡張型スレーブロボット
 - (ii) 設計方式可変型制御装置
 - (iii) ソフトウェアバイラテラル制御
 - (iv) 手と目の協調動作制御
 - (v) 力フィードバックジョイスティック制御

2.3 機能
 (1) マニプレーション
 ① 単独作業機能
 手先の移動、押引き、旋回(回転)把持を組合せることによって種々の作業を行うことができる(負荷200N)。その限界等はオペレータの能力に

表1 マニプレータ単独での作業性

動作	作業	作業領域
1. 移動動作	1. 物体搬送 2. ひもかけ 3. 工具等案内	・～200Nまで。ただし、握部に工夫を要する。 ・ひも材料と位置により限界あり。 ・～100Nまでがより容易。
2. 押し引き動作	1. 清掃 2. はめ合い 3. リミットスイッチ動作確認 4. ケーブル等の整理	・～200N。ただし現実的には100N。 ・0.1mm程度。 ・テーパ穴では、その形状によって大幅向上。 ・極めて小さいものは目視分解能によって決まる。 ・移動動作との組合せ。自分自身のケーブル処理に有効。
3. 旋回動作	1. ハンドル回し 2. ナット回し	・締切り前の軽回転領域。 ・～3Bまで。 ・手首回転による。最初は押し引きとの協調。 ・～60N.mまで。容易な範囲は15N.m程度。
4. 把持動作	1. 物体保持 2. カムロック等の着脱	・摩擦係数によって異なる。 ・階段昇降時の安全ベルト着脱および、工具類の着脱。
5. 工具協調動作	1. 工具回転 2. 工具はめ込み	・開発した全ての工具に適用可能。

表2 移動可能な対象

移動対象物			移動方法	速 度	その他の
名 称	形 状	寸 法			
平面走行		w = 600mm r = 375mm h = 1580mm	車輪	10m/min 以上	コンクリート面、グレーティング、チエフカーブレート
傾斜面走行		$\theta \leq 5^\circ$	車輪	10m/min 以上	本体との干渉によって決定
配管またぎ		$d \leq 180\text{mm}$	脚 + 車輪		管に接触せず通過
溝またぎ		$l \leq 600\text{mm}$ h制限なし	脚 + 車輪		
段差乗り越え		$h \leq 450\text{mm}$	脚 + 車輪		昇り、降り
凸部乗り越え		$l \geq 300\text{mm}$ $h \leq 450\text{mm}$	脚 + 車輪	約2~15分	
階段昇降		$h \leq 250\text{mm}$ $l \geq 200\text{mm}$ $\theta \leq 45^\circ$	脚	1段 約1~4分	昇り、降り

大きく左右されるが、おおよそ表1のものは可能である。ただし、作業に要する時間は1~5分程度となり、人の作業時間の3~10倍の値となっている。

② 工具使用作業機能

各種の対応する工具の組合せによって以下の作業が可能である。

- (i) ハンドル開閉 ~ 3 B の手動弁
- (ii) グランドボルト増結め ~ 3 B の手動弁

- (i) フランジボルト増結め ~ 3 B の手動弁
- (ii) リミットスイッチ動作確認
- (v) 清掃
- (vi) 床水サンプリング

(2) 走行系

車輪と脚の組合せ動作により移動可能な対象物は、その寸法・形状により非常に多くのものが考えられるが、それらの中で最も基本的なものを表2にまとめる。これらは代表例であるので、実際

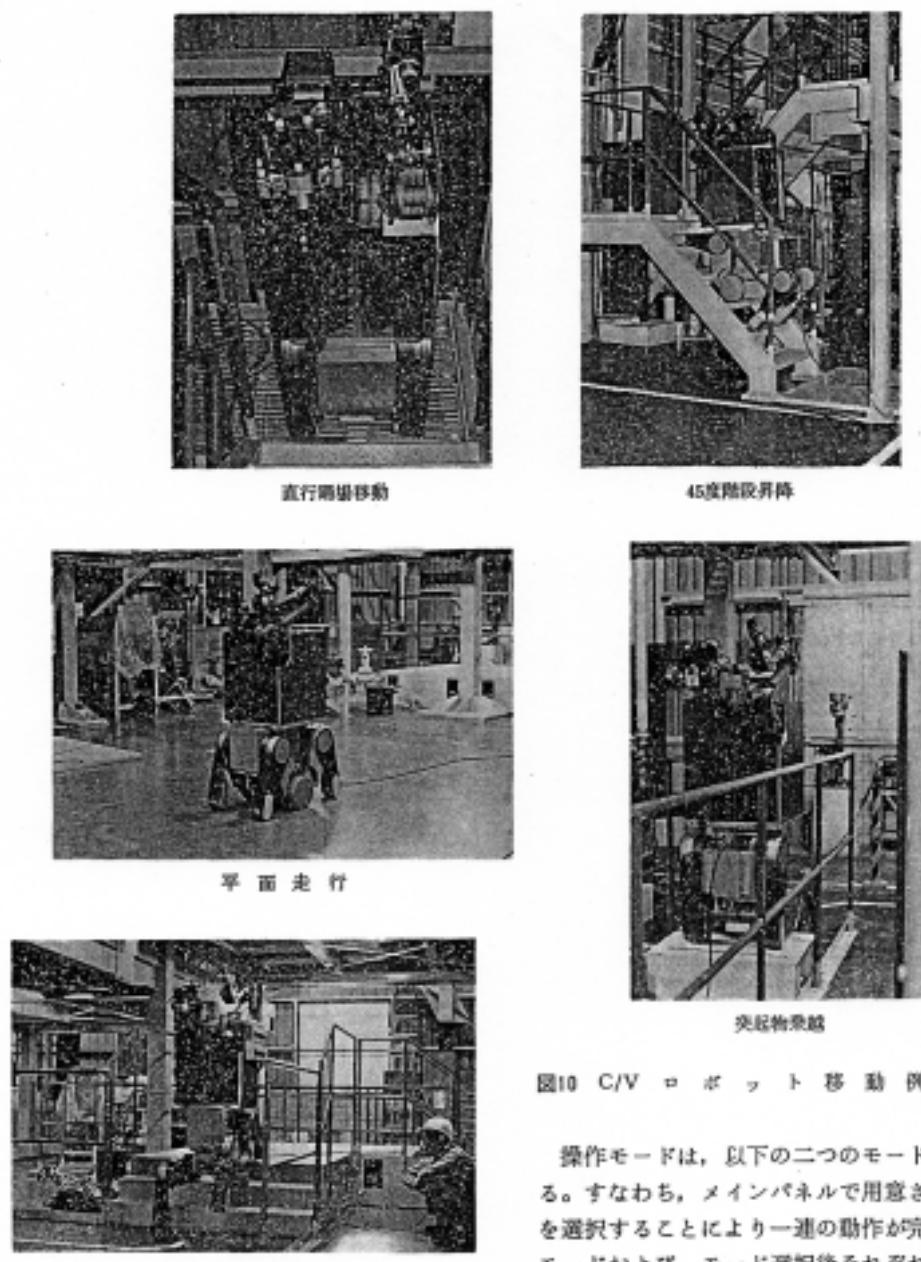


図10 C/V ロボット移動例

操作モードは、以下の二つのモードに大別される。すなわち、メインパネルで用意されたモードを選択することにより一連の動作が完結する自動モードおよび、モード選択後それに応じた操作器を用いてオペレーターが直接ロボットの動作を制御する手動モードである。図11に、種々用意された操作方式をまとめて示す。

② 対話型操作

グラフィックディスプレイとタブレットを使った対話操作を用いることによって、複雑になりが

には対象物の形状により表2より大きな物体でも越えられる場合がある。なお図10に、移動状態の例を示す。

- (3) 操作様式
- (4) 操作モード

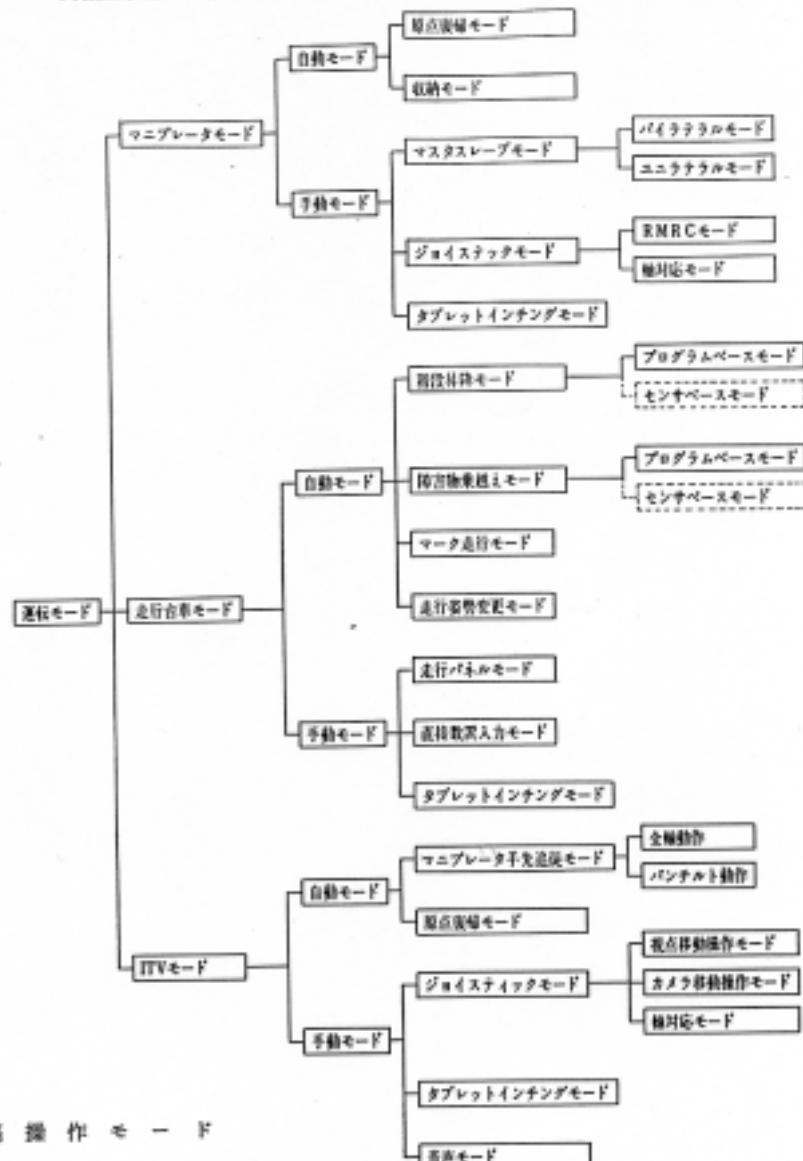


図11 運転操作モード

ちなロボットシステムの操作を手順良く行うよう
にすることで、誰にでも使える、使いやすいシス
テムにすることを目指すこととした。

③ 制御様式

本ロボットには種々の制御が用いられるが、こ
の詳細については別紙に譲ることとする。

2.4 耐環境性

スレーブロボット部は以下の環境下で動作でき
ることを想定して設計され、実験によって仕様を
満足することが確認された。

温 度 70°C

湿 度 100% R H

放射線 10⁶ R (集積)

耐 震 S₁ 地震 (想定される最大級の地震)
で プラントへの悪影響を与えること。
S₂ 地震の 1/3 程度 (約 3 ~ 400
gal 程度) で機能を維持すること。

3. 適用性と今後の展開

本システムの全体としての適用性は既に記載し

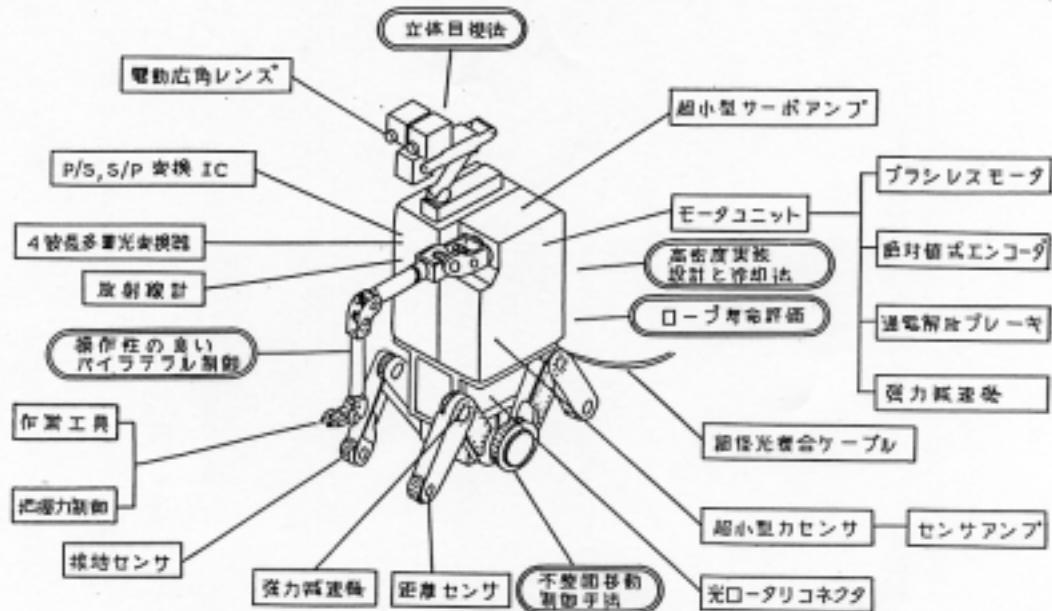


図12 スレーブロボットの開発要素

たが、前述のように、装置は完全にモジュール化されており、部品およびユニットレベル・装置レベルで応用できる範囲も広い。

3.1 部品およびユニットとしての応用

図12には、開発した構成要素・技術を示すが、

これらは単独あるいは組合せで使用することができ、ロボットシステムの小型化・耐環境化をかるのに有効である。その一例として、センサの機能を表3に示す。また、通信系を用いれば、システム動作部と制御部を数kmの範囲で連絡するこ

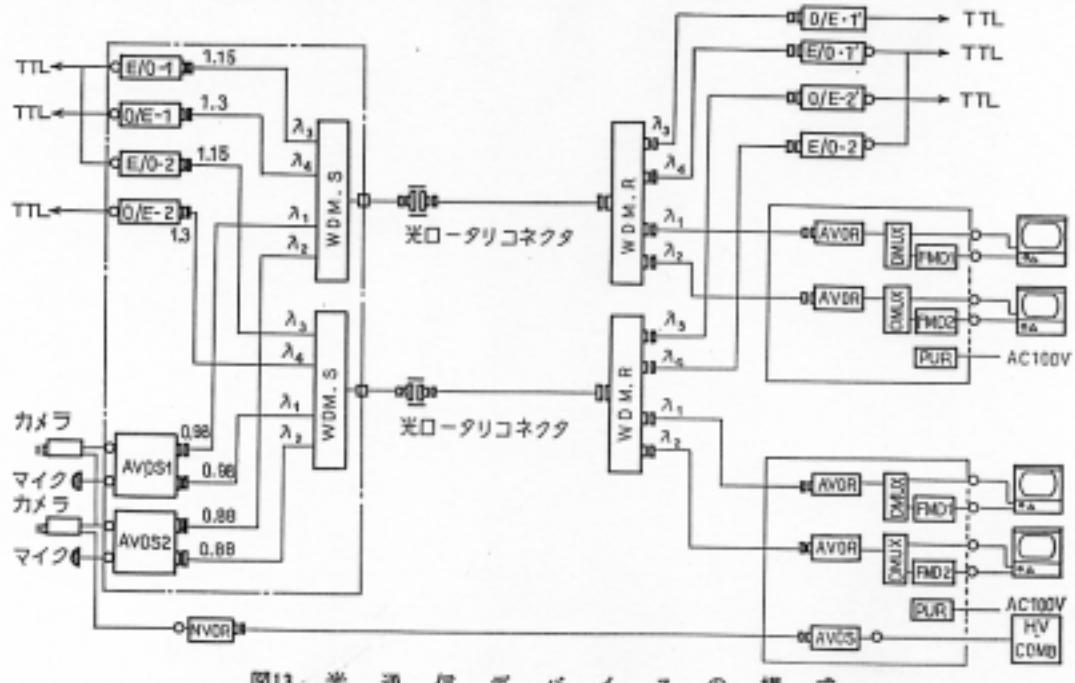


図13 光通信デバイスの構成

表3 センサの計測性能・耐環境性試験結果

センサ 名称	計測方式	検出	形状寸法	計測性能 (要求性能)		耐環境性	耐久性・安定性
				レンジ	直線性		
近接センサ	超音波式	階段の スナップ 検出	センサヘッド $\phi 60 \times 20\text{mm}^2$ 距離 $50 \times 40 \times 20\text{mm}^2$	0~300mm (同上)	$\pm 3\%$ ($\pm 5\%$)	良好 (70°C, 100%)	良好 (10°R)
接地センサ	正式	脚の 接地 検出	$\phi 50 \times 20\text{mm}^2$	0~200kg (同上)	$\pm 1\%$ (同上)	良好 (70°C, 100%)	良好 (10°R)
マーク センサ	光学式	走行誘導 (反射ナーブ使用)		設定・検出 距離 $35 \pm 10\text{mm}$ (同上)	マーク識別 精度 $\pm 3\%$ (同上)	良好 (70°C, 100%)	良好 (10°R)
傾斜計	チーポ 加速度式	姿勢検出	$\phi 25 \times 25\text{mm}^2$	$\pm 30^\circ$ (同上)	$\pm 0.1^\circ$ (同上)	良好 (85°C, 50% 以下)	良好 (10°R)
放射線 センサ	電離箱式	放射線レベ ル検出	$199 \times 195 \times 40\text{mm}^3$	$10 \sim 10^4\text{Mrad}$ (同上)	± 0.5 デカード (同上)	良好 (85°C, 50% 以下)	良好 ($2 \times 10^4\text{R}$)

注) 近接センサ、接地センサ、マークセンサは外界用のため70°C, 100%、傾斜計、放射線センサはロボット本体内部に設置されたため85°C, 50%以下の温・湿度条件とした。

とができる。したがって従来、格納容器内に持込んでいた制御装置を容器外に設置することが可能となり、装置設置時間を大幅に短縮するのに寄与すると考えられる。図13に、本ロボットに適用された光伝送系のブロック図を示す。

3.2 装置としての応用

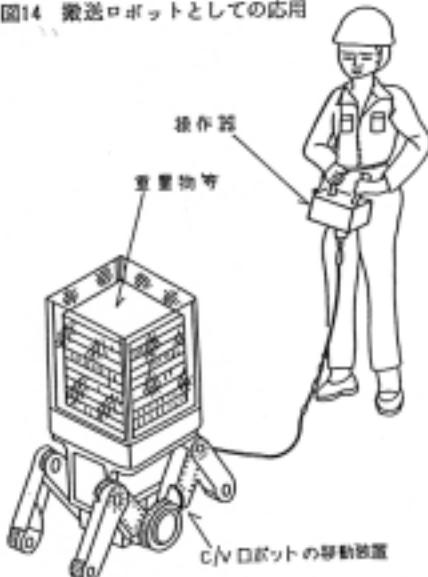
装置としては、腕(ミニブレータ)・目(ITVアーム)・足(走行台車)としての利用が考えられる。

ミニブレータの利用は詳述する必要はないと思うが、ここで開発したミニブレータは、種々の操作が可能(マスタスレーブ・ジョイスティック・力矩遮断・ジョイスティック等)となるよう配慮されているため、必要に応じた様式を選択できる。

ITVアームは、手先追従・ジョイスティック(目標指示および動作方向・位置指示)・音声での操作が可能であり、各種目視検査装置として利用できる。

走行台車は、各種移動装置としての適用が期待できるが、例えば複雑・凹凸通路における荷役・

図14 搬送ロボットとしての応用



搬送車としての応用等がある。(図14)

また、少し改良を加えれば、垂直梯子・壁面移動可能な点検ロボット等への展開も容易であると

判断される。(図15)

4. 結 論

本ロボットシステムによって開発された技術は極めて広範に及ぶが、要約すれば以下となる。

- 手・足・目を持つ高機能汎用ロボットの実現性を示した。
- さらに、本ロボットは部品の開発によって実用化に必要な寸法形状に収めることができることを示した。
- 最新の制御手法を導入することによって、計算機支援遠隔制御による実用作業が可能ことを示した。
- 厳しい環境条件下(70°C ・ 100% R・ 10^6R)における動作のできることが確認された。

あとがき

手・足・腕・首・目および頭脳をもった、高度汎用ロボットを世界に先がけて実現化し、その実用性を種々の確性試験を通じて実証した。本ロボットは、今後到来するであろう汎用ロボットの導入に確実なステップを踏出したと信ずるものであるが、今後ともさらなる研究によって、よりニーズに適合するようなものに改良していく予定である。また、ロボットの開発のために導入した種々の部品の中には極めて優れたものもあり、この観点からの技術的波及結果も期待している。

最後に、開発を通じ御指導をいただいた通商産業省、国の委員会および分科会の方々関係各位に謝意を表するとともに、本開発の成果が少しでも原子力発電所で試用いただけることを願うものである。

参 考 文 献

- (1) 浅井ほか：「原子力ロボット」日本原子力学会誌 Vol. 25 No. 11 (1983)
- (2) Matsubara T., Ohmichi T. et al : 「Development of Mobile Manipulator for Maintenance and Inspection in Containment Vessels of Nuclear Power Plants」 IAEA-SR-103/44
- (3) Ohmichi T., Hosaka S. et al : 「Development of the Multi-function Robot for the Containment Vessel of the Nuclear Plant」 ICAR '85 (1985-9)
- (4) Hosaka S., Ohmichi T. : 「Teleoperation of Robot for Maintenance and Inspection in the Containment Vessels of Nuclear Power Plant」 ICAR '85 (1985-9)
- (5) T. L. Brooks & T. B. Sheridan : 「SUPER-MAN, A system for supervisory manipulation and the study of human/computer interactions」 MIT See Grant Program, MITSG-79-20 MIT (1979)
- (6) 大道ほか：「原子炉格納容器内移動式軽作業ロボットの開発」三菱重工技報 Vol. 22 No. 6 (1985)

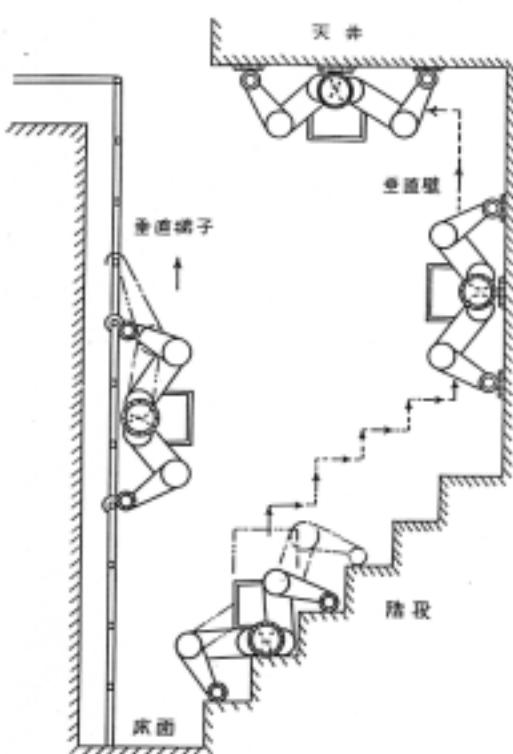


図15 高度検査ロボットとしての応用

(1984)

- (1) Ohmichi T., Hosaka S. et al : 「Development of the Multi-function Robot for the Containment Vessel of the Nuclear Plant」 ICAR '85 (1985-9)
- (2) Hosaka S., Ohmichi T. : 「Teleoperation of Robot for Maintenance and Inspection in the Containment Vessels of Nuclear Power Plant」 ICAR '85 (1985-9)
- (3) T. L. Brooks & T. B. Sheridan : 「SUPER-MAN, A system for supervisory manipulation and the study of human/computer interactions」 MIT See Grant Program, MITSG-79-20 MIT (1979)
- (4) 大道ほか：「原子炉格納容器内移動式軽作業ロボットの開発」三菱重工技報 Vol. 22 No. 6 (1985)