

両腕型サーボマニプレータの開発総括報告書
(制御関連他)
(業務報告)

2000年 3月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
ください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

両腕型サーボマニプレータの開発総括報告書
(制御関連他)
(業務報告)

三木 安夫*、川野邊 一則**、小林 雄一**、
小泉 務*、青嶋 厚*

要 旨

核燃料サイクル機構では、核燃料サイクル関連施設における施設稼働率の向上と点検保守作業時における作業員の被ばくの低減化等を目的として、大型セルによる全遠隔保守方式の開発を行ってきた。本方式を成立させるためには、遠隔保守技術の確立が必須であることから、当グループを中心として遠隔保守の中心的機器となるマスタースレーブ方式の両腕型バイラテラルサーボマニプレータ (Bilateral Servo Manipulator : BSM) の開発を実施してきた。

BSM2基のガラス固化技術開発施設 (TVF) への設置後は、リサイクル機器試験施設 (RETF) への導入に向けて、いわば完成版BSMとも言えるマニプレータ (RETF型) への改良を実施してきた。

本報告書は、完成版BSMへの改良点、特に操作性の向上に関わる点を主体に、機械設計、制御設計について総括したものである。

* : 先進リサイクル研究開発部 機器開発Gr

** : 常陽産業(株)

目 次

1.	はじめに	1
2.	サーボマニプレータ開発の経緯	2
2.1	概要	2
2.2	試作1号機の開発	4
2.3	試作1号機の機能向上対策	9
2.4	試作2号機の開発	11
2.4.1	エルボウダウンモデル(片腕モデル)の試作	11
2.4.2	試作2号機の開発	12
2.4.3	日米高性能マニプレータ性能評価試験	17
2.4.4	遠隔自己保守試験	27
2.4.5	バイラテラル機能の評価	29
2.5	TVF適用に向けて試験2号機の改良	38
2.5.1	マスターアーム操作力低減のための改良	38
2.5.2	バイラテラル性能の向上	39
2.5.3	スレーブアーム手首動作範囲の拡大	39
2.5.4	スレーブアームの握力向上	39
2.6	RET F適用に向けてのシステム改良	43
2.6.1	トランスポータシステム	43
2.6.2	視聴覚システム	45
2.6.3	光信号伝送システム	46
3.	機械設計	48
3.1	マニプレータ形状	48
3.2	スレーブアームの駆動系	52
3.3	スレーブアームの分割	55
3.4	スレーブアームの耐放射線性	56
3.5	マスターアームの駆動系	56
4.	制御設計	58
4.1	バイラテラルサーボの基礎解析	58
4.1.1	解析手順	58
4.1.2	バイラテラルサーボの基本要件	58
4.1.3	制御の判定基準	58

4. 1. 4	バイラテラサルサーボの解析	59
4. 1. 4. 1	基本型の解析	59
4. 1. 4. 2	基本型+速度フィードバック解析	64
4. 1. 4. 3	基本型+速度・加速度の正帰還解析	68
4. 1. 4. 4	基本型+トルクフィードバックの解析	71
4. 2	マニプレータ制御系のシステム構成	76
4. 3	制御方法	77
4. 3. 1	インデックス補償	79
4. 3. 2	カフィードバックの安定性	79
4. 3. 3	マスタースレーブ動作の追従性	80
4. 3. 4	4・5軸の協調制御	82
4. 3. 5	7軸開閉制御	82
4. 3. 6	制御演算周期の短縮	82
4. 4	遠隔操作性能評価	82
4. 4. 1	単体操作カスレッシュヨルド (マスターアームスレッシュヨルド) 値	82
4. 4. 2	バイラテラル反カスレッシュヨルド値	83
5.	おわりに	85
6.	謝辞	85
7.	参考文献	86

1. はじめに

高レベル放射性物質を取り扱う原子力施設のように、直接人間がアクセスできない環境下（極限環境下）での作業において、作業員は安全な場所から保守機器の操作を行うための遠隔操作技術開発が1940年代から進められてきた¹⁾。

核燃料サイクル開発機構（JNC）は、核燃料サイクル関連施設の施設稼働率向上と点検保守作業時における作業員の放射線被ばくの低減化を目的に、大型セル方式の開発とセル内で遠隔保守の中心的役割を果たす機器となるマスタスレーブ方式の両腕型バイラテラルサーボマニプレータ（Bilateral servo Manipulator：以下「BSM」という）の開発を実施してきている。

既に東海事業所のガラス固化技術開発施設（以下「TVF」という）に採用されている。

さらに、BSMの採用を前提としての保守設計を行っているリサイクル機器試験施設（RETF）への導入に向けて、いわば完成版BSMとも言えるRETF型マニプレータへの改良を実施してきた。

本報告書は、完成版BSMへの改良点、特に操作性の向上に関わる点を主体に、機械設計、制御設計について総括したものである。

2. サーボマニプレータ開発の経緯

2.1 概要

核燃料サイクル開発機構東海再処理工場では、機械処理工程機器やポンプ等の回転機器を除くほとんどのプロセス機器に対して直接保守方式を採用している。この方式では直接保守を前提としている機器が故障した場合や更新等が必要となった場合には、作業員のセル内立ち入りが可能となるまで機械式マスタースレーブマニプレータ（以下「M/Sマニプレータ」という）等で機器及びエリアの除染を行った後に、作業員が直接保守作業を行う事となる。一般的に除染作業には長時間を要する上、完全に放射性物質を除去する事は不可能である事から、施設稼働率の低下や作業員の放射線被ばく、さらには除染作業に起因する二次廃棄物の発生といった課題があった。

このような状況の中で核燃料サイクル開発機構では、諸外国の動向を勘案しつつ、1970年代に計画されていた高速炉燃料再処理パイロットプラント（以下「F再PP」という）において、これらの課題を解決すべく、電気式マスタースレーブマニプレータ（以下「EMSM」という）等による大型セルによる遠隔保守方式の概念を採用する事とし、要素技術の開発に着手した。本方式では放射性物質により汚染される保守対象機器をラック（規格化されたフレーム構造体）の中に収納した上で、クレーン等の大型の保守機器が配置されている大容積のセルに設置し、人間が直接取り扱う代わりにクレーンやEMSMで保守作業等を行おうというものである。これにより、セル内の除染が不必要となり保守時間の大幅低減、二次廃棄物の大幅削減が達成できる上、作業員の被ばくも低減できる事が期待された。大型セルによる遠隔保守の概念を図2-1に示す。

このEMSMにはセル内の保守対象機器を確実、かつ容易に保守できるかという操作性だけでなく、EMSM自身が故障せずに長期間の使用に耐えられるという信頼性と、万一の故障時にも作業員がセル内に立ち入る事なく修理できるという遠隔保守性も必要である。そこで、操作性、信頼性と遠隔保守性を兼ね備えたEMSMの開発を目標に掲げて、1982年度より核燃料サイクル開発機構版EMSMの開発に着手した。以下開発の経緯に触れる。

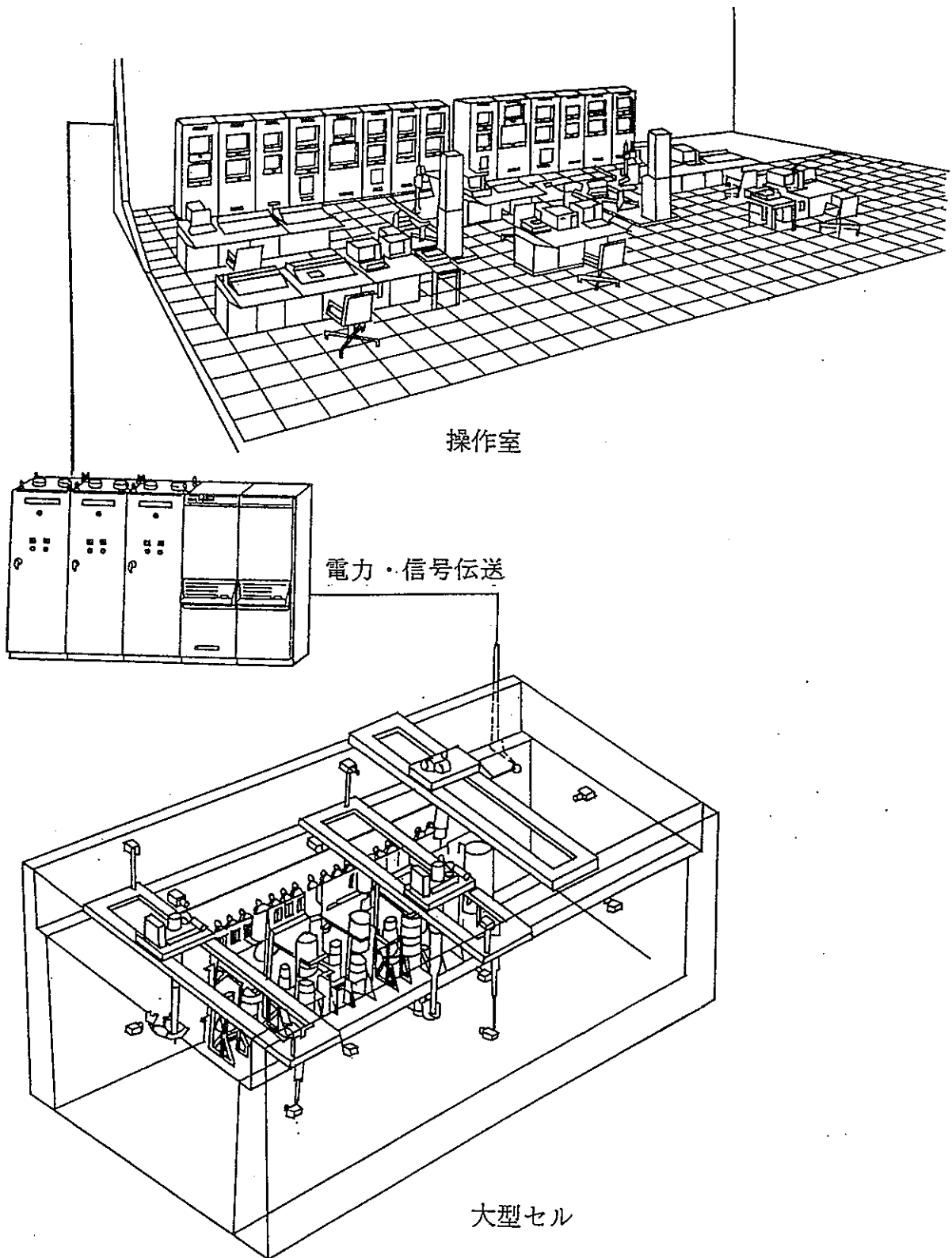


図 2-1 大型セルによる遠隔保守の概念図

2.2 試作1号機の開発

開発に着手した当時、カフィードバック型マニプレータの研究開発は既に欧米を中心に進められていたが、核燃料サイクル施設等での継続的使用という意味で、実用化されたものは皆無であった。そのため、BSMの基本構想をまとめるに際しては、BILARM83の開発経験や文献調査を基にせざるを得なかった。

このBILARM83は、1970年代末から核燃料サイクル開発機構が当時早期建設が計画されていたF再PPへの適用を目標として、M/Sマニプレータのようなマスターアームで操作できるようにエグゾスケルトン型マスターアームを採用し、かつ微細作業を担う手首部の3自由度には、バイラテラル機能を実現する方策として力帰還方式を取り入れた新しい概念のP/Mとして開発したものであった。しかし、動作速度が遅い事から連続的な操作が困難である事及び本体の遠隔保守性に問題があった事から、実施設での使用は見合わされていた。BILARM83の外観を写真2-1に示す。

BSMとしての設計は1982年に開始し、翌1983年8月に試作1号機の製作を完了した。試作1号機は制御上厄介なスレーブアームの自重補償を最小限とするため、肘が外側を向いた形状のプレーナ型を採用した。この形状は保守対象機器に対して側面からのアクセスに適しており、上面からのアクセスにはあまり向いていない事は当初より予想されていた。試作1号機の外観を写真2-2に、主要性能を表2-1に、アーム形状と適する作業形態を図2-2に示す。

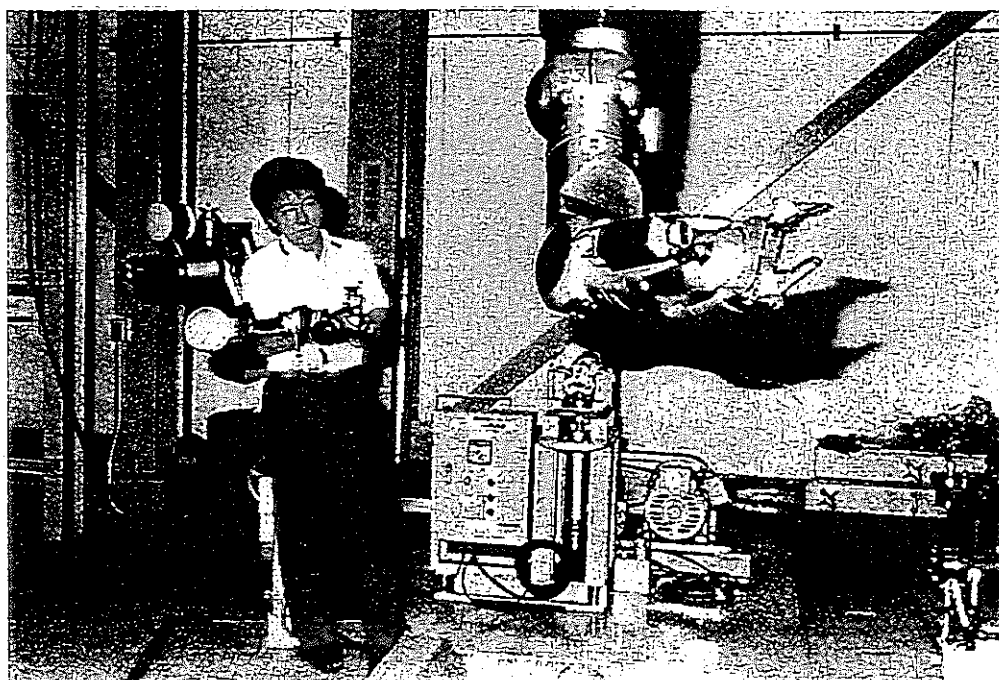
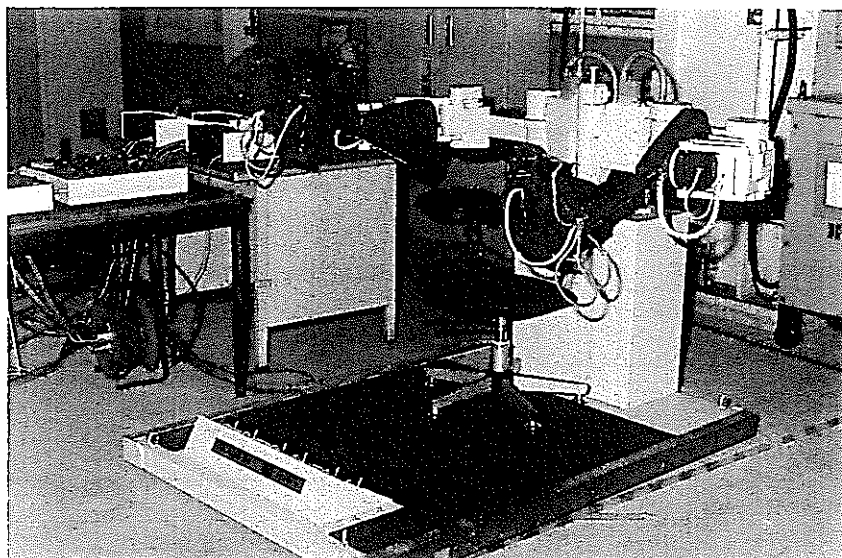
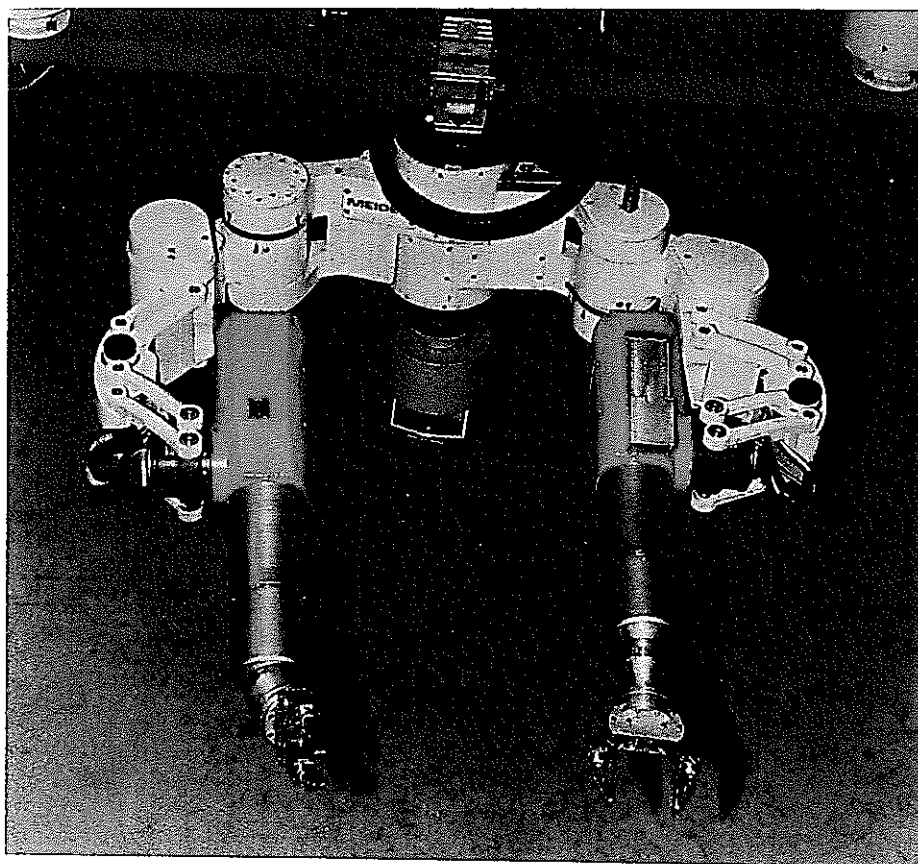


写真2-1 BILARM83の外観



マスターアーム



スレーブアーム

写真2-2 試作1号機の外観

表 2-1 試作 1 号機の主要性能

項目	仕様	項目	仕様		
操作方式	マスター・スレーブ方式	作動部	動作範囲	動作速度	備考
制御方式	アナログサーボコントロール	肩軸垂直回転	400°	5° /sec	力帰還無し
駆動方式	DCサーボモータ	肩軸垂直回転	180°	5° /sec	力帰還有り
アウトリーチ	1295 mm	水平伸縮	240 mm	50° /sec	力帰還有り
取扱荷重	10kg(両腕で 20kg) (吊り下げ荷重)	肘回転	±120°	5° /sec	力帰還有り
		手首振り	±75°	5° /sec	力帰還有り
握力	30kg	手首上下	±75°	5° /sec	力帰還有り
自由度	8	手首回転	±連続回転可	5° /sec	力帰還有り
分割数	片腕当たり 5 分割	指先開閉	0~80 mm	8 mm/sec	力帰還無し

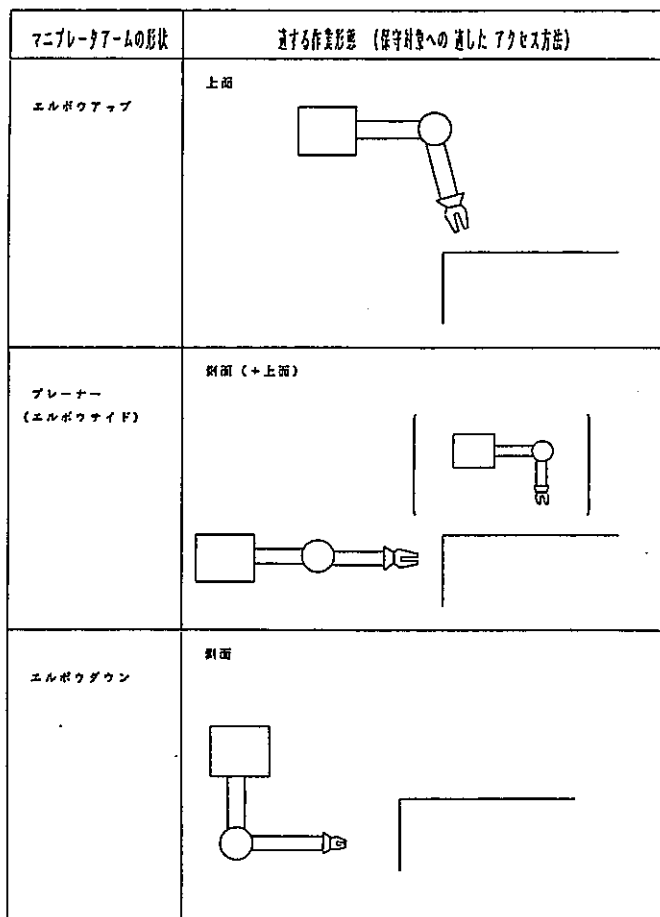


図 2-2 アーム構造に適する作業形態

試作1号機では、手首の上下振り（ピッチング）、左右振り（ヨーイング）、回転（ローリング）の回転軸がそれぞれ直交し、かつ近傍に開閉（グリップ）が配置された小型4自由度手首を採用した。このような手首構造にすれば人間とほぼ同様な動作が実現でき、EMS Mとしてはより操作しやすくなるものと考えられた。なお、一般産業用のロボットで、このような思想で設計されたものは例がない。類似のものとしては米国ORNLのASMがあるが、ASMの小型4自由度手首がギヤトレン方式であるのに対し、試作1号機のそれはジンバル機構を2段組み合わせたものであり、それぞれ特徴のあるメカニズムとなっている。ORNLが採用したギヤトレン方式は、クロスカップリングと呼ばれる動作軸が複雑に組み合わされた手首構造において各軸間の干渉を補償するための制御が必要になる事、ギヤを多く用いるためバックラッシュ（ガタ）が大きく微細な作業がやりにくくなる事及び摩擦が大きくスレーブに働く小さな反力を検知できない事等の課題が指摘されていた。EMS Mにとってこれらは重大な問題である事からORNLは干渉補償制御のほか、高精度で低バックラッシュでかつ低摩擦のギヤ列の開発を行った。

一方、試作1号機が採用したジンバル機構は各動作軸間の干渉がほとんどない事から、そのための補償制御は不要であるものの、高精度で低バックラッシュでかつ低摩擦の球面軸受けを開発する必要があった。両方式の比較を表2-2に示す。

試作1号機では各関節の近傍にモータを配置し、ギヤで各関節を直接駆動するモータ分散配置ギアダイレクトドライブ方式を採用していた。BSMは再処理施設を始めとする原子力化学プラント機器の遠隔保守を作業員に代わって円滑に実施する事を目標としている事から、それらの保守対象機器に比べてスレーブアームは極端に大型化する事ができない（プロセスの規模に比べて極端に大きなものは施設規模の適正化という観点から望ましくない）。このため、スレーブアーム内に分散配置されるモータには自ずとその大きさに制約があり、高速化や重荷重化には対応しにくいという面がある。このような欠点を回避するため、諸外国において同様な目的で開発された他のEMS Mの多くは、モータを大きさ制約の比較的少ない肩部に集中配置して、動力をトルクチューブやワイヤで各関節まで伝達するという方式を採用している。

例えば、ANLのE1～E4や仏国のMA22～MA23やORNLのTOS229及びM2ではワイヤ方式を、ORNLのASMではトルクチューブ方式を、さらに東芝のEMS Mではトルクチューブ方式とチェーン方式の組み合わせをそれぞれ採用している。なお、独国のEMS MI及びIIは核燃料サイクル開発機構と同様のモータ分散配置ギアダイレクトドライブ方式を採用していたと言われている。

表 2-2 ジンバル方式とギヤトレンとの比較

比較対象	ジンバル機構によるセクショナルドライブ方式	干渉のあるギヤトレン法トルクチューブ方式
バックラッシュ	それぞれの関節が単一モータ、ギヤ系で駆動されるため、バックラッシュを小さくできる。	それぞれの関節が干渉しているため、手先に届くほどバックラッシュが大きくなる。
慣性力	関節を直接駆動する事からモータの配置は関節近くとなり、小型モータと大きなギヤ比が必要となる。このため、慣性力の影響を制御上軽減する必要があり、P-P制御方式とする。	モータは肩口に集中配置できるため、比較的大型のモータが選定できギヤ比を小さくできる。したがって、軸まわりの慣性力は小さくできるが、トルクチューブの重量が大きくなり、全体としての慣性力の低減は困難となる。
摩擦力	ギヤを介した直動式のため、摩擦力を小さく抑える事ができる。	ギヤ構成が複雑化し、これによるバックラッシュを抑えるためにギヤの噛み合いをきつくすると摩擦力が大きくなる。P-P制御ではバックドライブビリティを確保するためにバックラッシュを犠牲にして摩擦力を抑える制御方式がとられる。
モータの選定	関節を直接駆動するため、小型で高速回転型モータを選定する。	選定に際して、特に小型等の要求はないが、干渉系による速度補償が必要となり、手先に近いモータほど高速回転が要求され、必要容量以上のモータの選定となる。
位置精度	位置検出が容易で、かつ減速機によるバックラッシュも小さいために精度がよくできる。	干渉によるバックラッシュが大きくなり正確な位置検出が困難となる。また、補償するために検出範囲も大きくとる必要がある。
制御性	干渉がない事から1:1の制御となるため、各関節間の補償が必要なく制御系を単純化できる。	干渉による各関節間での位置補償、速度補償、トルク補償が必要となり、制御系が複雑化する。
製作性	比較的単純な関節駆動構成となる事から、製作は容易となる。	バックラッシュを抑えるために高精度のギアと軸受けの精度が要求され、製作が困難となる。

試作1号機では、モータを小型化する必要性から（小さいモータで大出力を得るため）高速モータを減速比の高い減速機で減速して使用する事としていた。このように減速比を高くすると、スレーブに働く反力がモータ及び減速機部に正確に伝わったとしても、モータの回転に影響を与える事が難しく、結果として対称型バイラテラル制御では正確に反力を検知する事ができない。そのため各軸にトルクセンサを設置し、基本的には力帰還制御方式を採用するとともに、検出したトルク値でスレーブアームに逆回転指令を出し、スレーブアームの摩擦抵抗を補償するという制御手法を開発して採用した。

2. 3 試作1号機の機能向上対策

試作1号機は東海事業所モックアップ試験棟B I L A R M 8 3の2号機用トランスポータ（クレーン型移動装置）に取り付けて、TVFのラック設計に基づく模擬実寸ラック及びラックの上部半分だけを模擬した部分モデルラックを遠隔保守対象としての遠隔操作性評価試験を1983年10月から12月にかけて行った結果、手首部のバックラッシュが大きく操作性が良くない事が判明した。

このため、手首部のバックラッシュを削減する事を目的として、上下振り（ピッチング）、左右振り（ヨーイング）の動作範囲が $\pm 85^\circ$ から $\pm 42.5^\circ$ に減少する事を覚悟の上で、球面軸受けを2段から1段に減らす改造を1984年に施した。その結果として、バックラッシュ量は $1/3 \sim 1/4$ 程度に減少したが、当然の事として手首のみの動作による操作可能範囲は大幅に減少した。改造後の操作性評価試験の結果では、手首の操作可能範囲が大幅に減少したマイナス効果が認められるものの総合的に見て操作性は向上したと評価された²⁾。

（この操作性評価試験に供した試験対象は図2-3に示すペグスタンドと呼ばれるもので、手首の動作範囲の減少によるマイナス効果があまり大きく出ない性格のものであった）これらの試験を通じて得られた結論は、試作1号機で円滑な操作をするためには、スレーブアームの動作速度を相当程度（例えば、手首の動作については10倍近く）上げる必要がある、という事であった。即ち、試作1号機のスレーブアームの動作速度が遅く、操作員が動かすマスターアームの動きに追従できない事から、操作員はマスターアームをスレーブアームの動作速度にあわせてゆっくりと動かす、もしくは予めスレーブアームの動作を予想した上でマスターアームを速く操作した後、スレーブアームが追従してくるのを待つという、いわゆる予測操作を行う必要が生じる。

このスレーブアームの動作に対する配慮の必要性がBSMの操作に習熟を要したり、操作員の疲労の原因につながる事が分った³⁾。

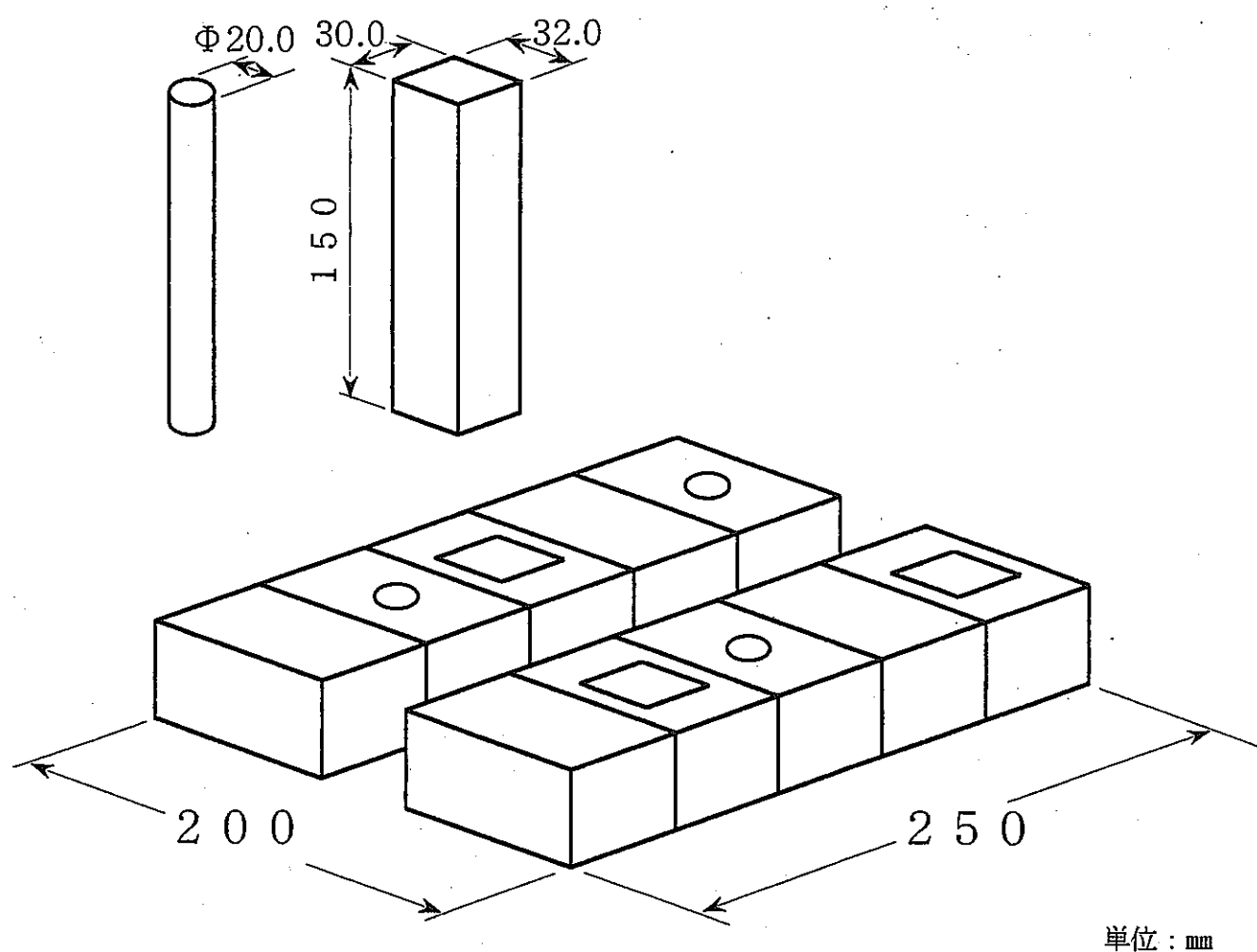


図 2-3 ペグスタンドの外観図

2.4 試作2号機の開発

2.4.1 エルボウダウモデル（片腕モデル）の試作

前述の通り、肩部にモータを集中配置する方式のうちワイヤ駆動方式は、アーム内に多数のワイヤが複雑に張りめぐらされているために、スレーブアームが万一故障した際には、もう1台のEMSMで故障した部品だけを交換する（BSM開発当初における自己保守思想）という自己保守はほとんど不可能である。そこで、このような自己保守思想と試作1号機でのスレーブアームの動作速度不足に対応するために、諸外国で行われていたようなモータを肩部に集中配置する方式を採用すると、各軸へのトルク伝達方式としてはトルクチューブ方式を選択せざるを得ない。しかしながら、モータ集中配置トルクチューブ方式には、干渉補償制御、ギヤの高精度加工、ギアトレーンの摩擦補償制御、等の重大な課題があった事から、取り合えず片腕だけの部分モデル（以下、片腕モデルと称する）を試作し、試験・検討する事とした。

片腕モデルの試作に際しては、ラック保守では真下に向かったの作業が存在するが、試作1号機で採用したプレーナ型では、この作業性に難がある事が分かっていた事から、エルボウダウモデルのスレーブアームを採用して1984年末に完成させた。片腕モデルの外観を写真2-3に示す。

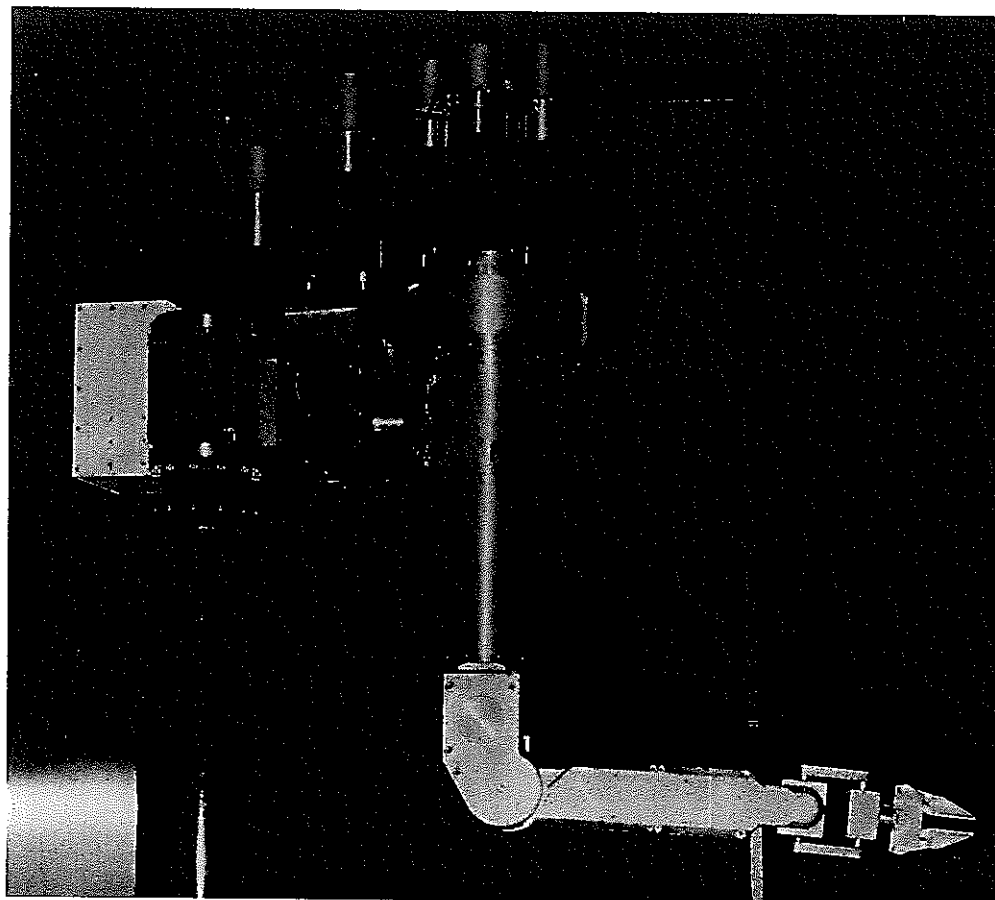


写真2-3 片腕モデルの外観

しかしながら、完成した片腕モデルはJIS規格品でのギヤ系を形成した事もあり、予想以上にギアの摩擦とバックラッシュが大きくなってしまった上に、腕の重量も予想外に重くなってしまった事から、当初から予定していた干渉補償制御、摩擦補償制御に加えて、自重補償制御及び慣性補償制御が必要となった。

これら多くの補償制御に対する計算が必要となった事から、予定していた制御用CPU（インテル製8086）6台では制御周期が40ms程度となり、滑らかな制御が達成できなかった。このため、翌年には制御用CPUを12台に増設するとともに、ソフトウェアの簡素化を図った事で制御周期20msを確保したが、それでも滑らかな制御は達成できなかった。

2.4.2 試作2号機の開発

1985年から試作2号機の開発に着手した。試作2号機の設計は試作1号機での経験及び片腕モデルでの成果を受けて、比較的高出力で、かつ速い動作速度を必要とする肩関節及び肘関節については、モータ集中配置トルクチューブ駆動方式を採用するとともに、微細な位置決め動作や滑らかな動作が要求される手首部には、試作1号機に採用したるジンバル機構を用いたギアダイレクトドライブ方式とする。また、スレーブアーム手首部を極力小さくするために、人間工学的な解析に基づく操作員腕の動作能力試験^{*1}を行った上で手首動作速度を決定するとともに、手首部のバックラッシュ量を少なくする事を目的として、球面軸受けを1段（手首部の動作範囲は $\pm 42.5^\circ$ ）とする。

*1： 操作員の腕の動作能力測定は、M/Sマニプレータ、BILARM83及びP/Mを用いて数人の被験者から行った。その結果、M/Sマニプレータは肩と肘を用いて操作するため220deg/sec前後と速いが、マスターアームが人の腕と相似形となっているBILARM83及びP/Mでは最大でも160deg/sec程度である事が分かった。このため、人の腕と相似形のマスターアームを想定している試作2号機では上下振り（ピッチング）、左右振り（ヨーイング）ともに160deg/sec程度とする事とした。

試作2号機の主な特徴を以下に示す。

- ① 作業員と同等の作業が行えるようにエルボウダウン型多関節アームとし、動作力、動作速度、動作範囲等は、ほぼ成人男子と同様にする。
- ② 作業員の考えている動作が違和感なくスレーブアームに伝達できるように、相似型マスタースレーブ方式を採用する。
- ③ 操作の安全性（ヒューマンエラーによるアーム本体もしくは保守対象機器の損傷防止）及び操作性の向上を目的に力帰還方式を採用する。

- ④ 万一、スレーブアームに故障が生じた場合は、故障部位をもう1台のBSMで容易に遠隔交換できるようにスレーブアームを11分割構造とし、それぞれの部位重量はスレーブアーム片腕の把持能力の15kgより軽くする。
- ⑤ 万一、トランスポータ部に故障が生じた場合は、もう1台のBSM及びインセルクレーンにて分解・組立ができるように構成部品をモジュール化する。
- ⑥ 信号ケーブル数の低減化を図るため、光信号伝送システムによる信号伝送多重化方式を採用する。

以上の設計方針により製作された試作2号機は1986年10月に完成し、実規模開発試験室（以下「EDF-Ⅲ」という）に据え付けて基本機能を確認した後、ペグスタンドでの基本的な操作性評価試験を行い、試作1号機及びM/Sマニプレータとの比較評価を行った⁴⁾。その結果、試作1号機よりは向上したものの、M/Sマニプレータと比較すると依然としてかなりの操作性に差がある事が確認された。

また、後述するように日米遠隔技術情報交換協定に基づく国際協力のひとつのテーマとして、日米相互の高性能型両腕マニプレータ性能比較試験を1987年2月から実施して機能評価を行うとともに、試作2号機本体の遠隔自己保守試験を1987年6月から実施して、ホット施設適用に向けての課題抽出と対策検討を行った。

EDF-Ⅲの外観を写真2-4に、模擬セル内外観を写真2-5に、また、試作2号機の外観を写真2-6に、主要性能を表2-3に示す。

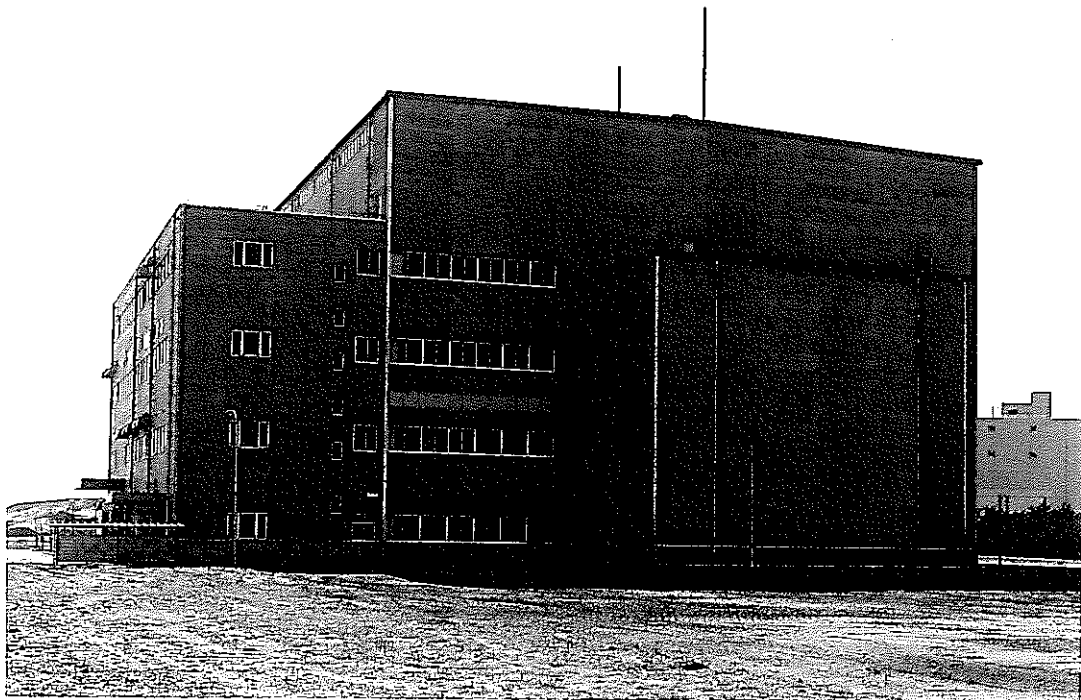


写真2-4 実規模開発試験室の外観

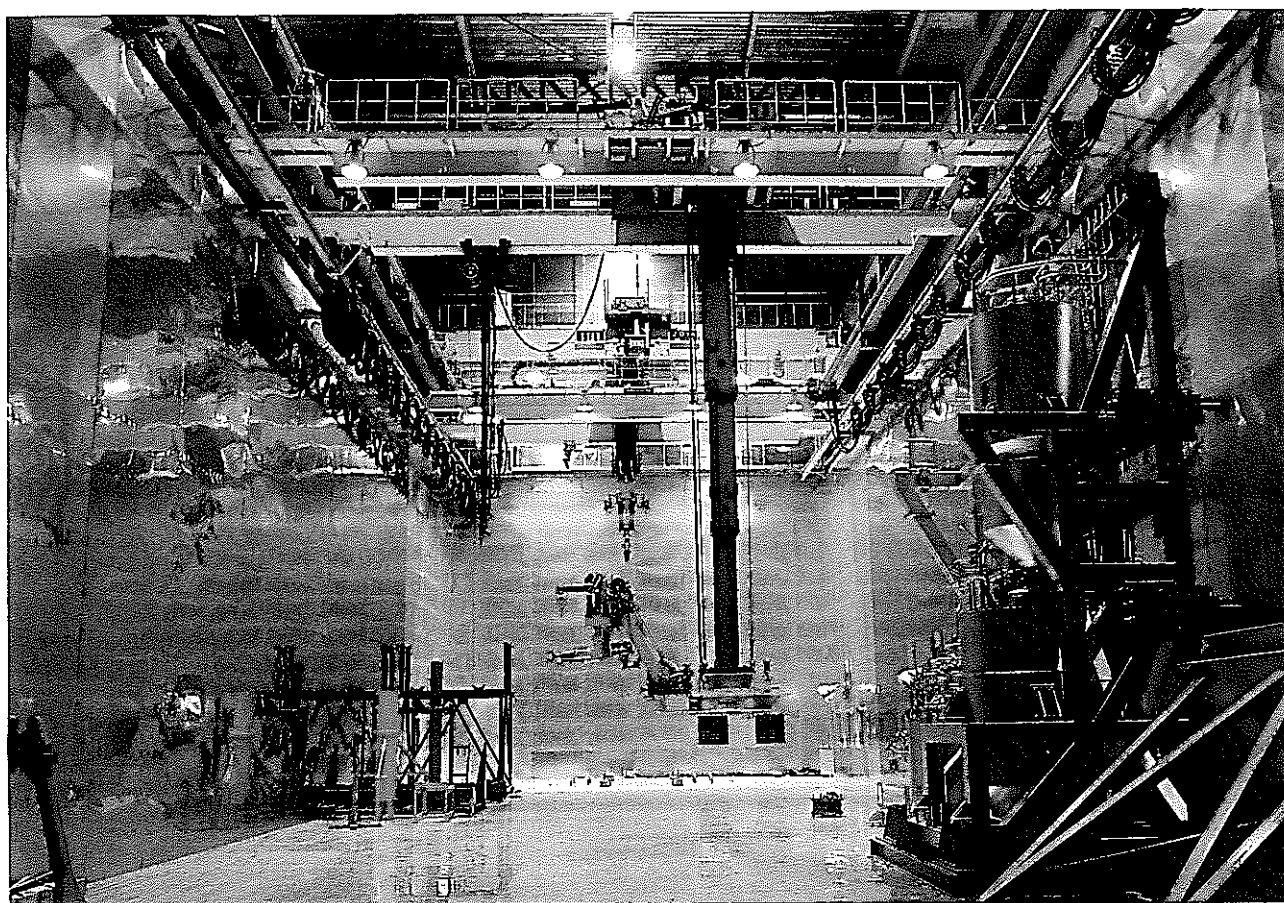
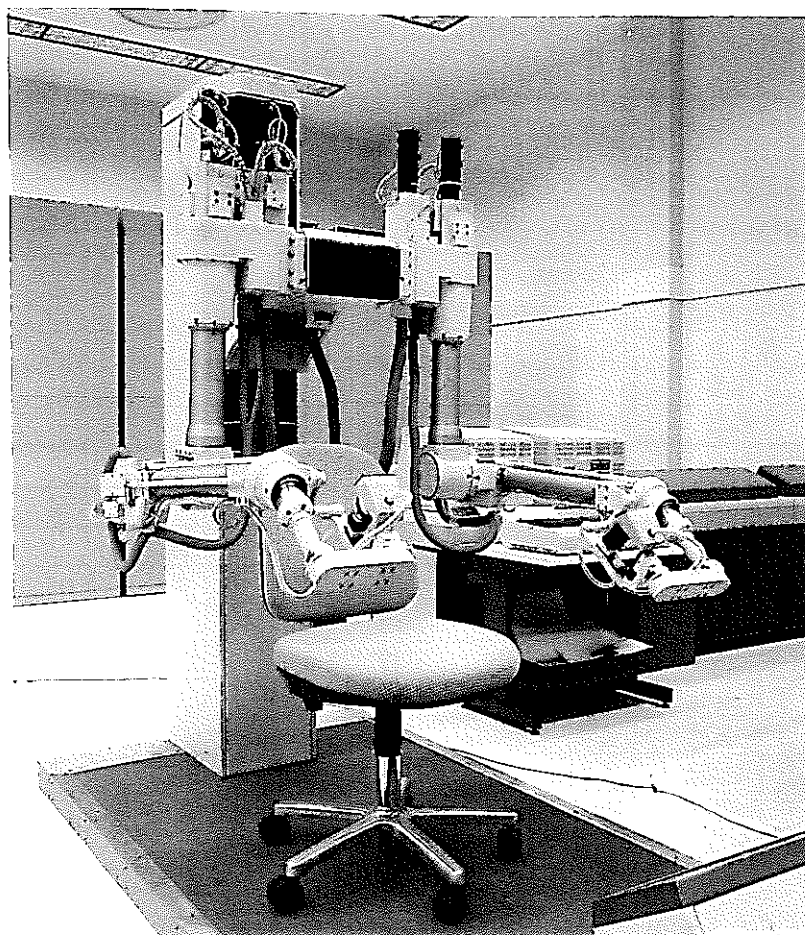
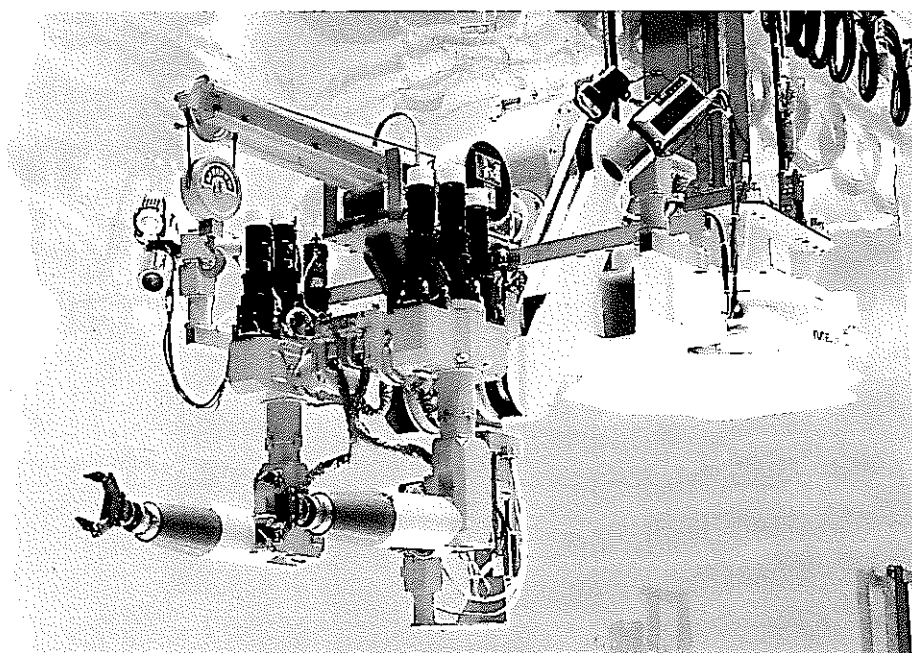


写真 2 - 5 模擬セル内の外観



マスターアーム



スレーブアーム

写真2-6 試作2号機の外観

表 2-3 試作 2 号機の主要性能

項目	仕様
操作方式	マスター・スレーブ方式
制御方式	デジタル制御 (コンピュータによる制御)
駆動方式	DC サーボモータ
アウトリーチ	1360 mm
取扱荷重	15kg (両腕で 30kg)
握力	30kg
自由度	7
分割数	片腕当たり 11 分割

項目	仕様		
作動部	動作範囲	作動速度	備考
肩上下	+135° ~ -45°	40° /sec	力帰還有り
肘上下	+35° ~ -215°	60° /sec	力帰還有り
肘回転	+45° ~ -60°	60° /sec	力帰還有り
手首振り	±45°	160° /sec	力帰還有り
手首上下	±45°	160° /sec	力帰還有り
手首回転	±540°	160° /sec	力帰還有り
指先開閉	0~80 mm	100 mm/sec	力帰還無し
耐放射線性	2.58×10 ⁴ C/kg (1×10 ⁸ R)		

2.4.3 日米高性能マニプレータ性能評価試験

(1) 概要

本試験は高速炉協定に基づく国際協力のひとつのテーマで、日米相互の高性能両腕型マニプレータの性能を比較する事を目的として、1986年2月から5月にかけての約3ヶ月間実施した。

JNCからは試作2号機、ORNLからはM-2及びASMの計3基を性能評価の対象としたが、これらの両腕型マニプレータは、それぞれ制御方式、機械構造等が異なる事から、できる限り同一条件下で多くのタスクを行い、その結果及び特性等を解析して性能改善に寄与する事とした。M-2の外観を写真2-7に、ASMの外観を写真2-8に示す。

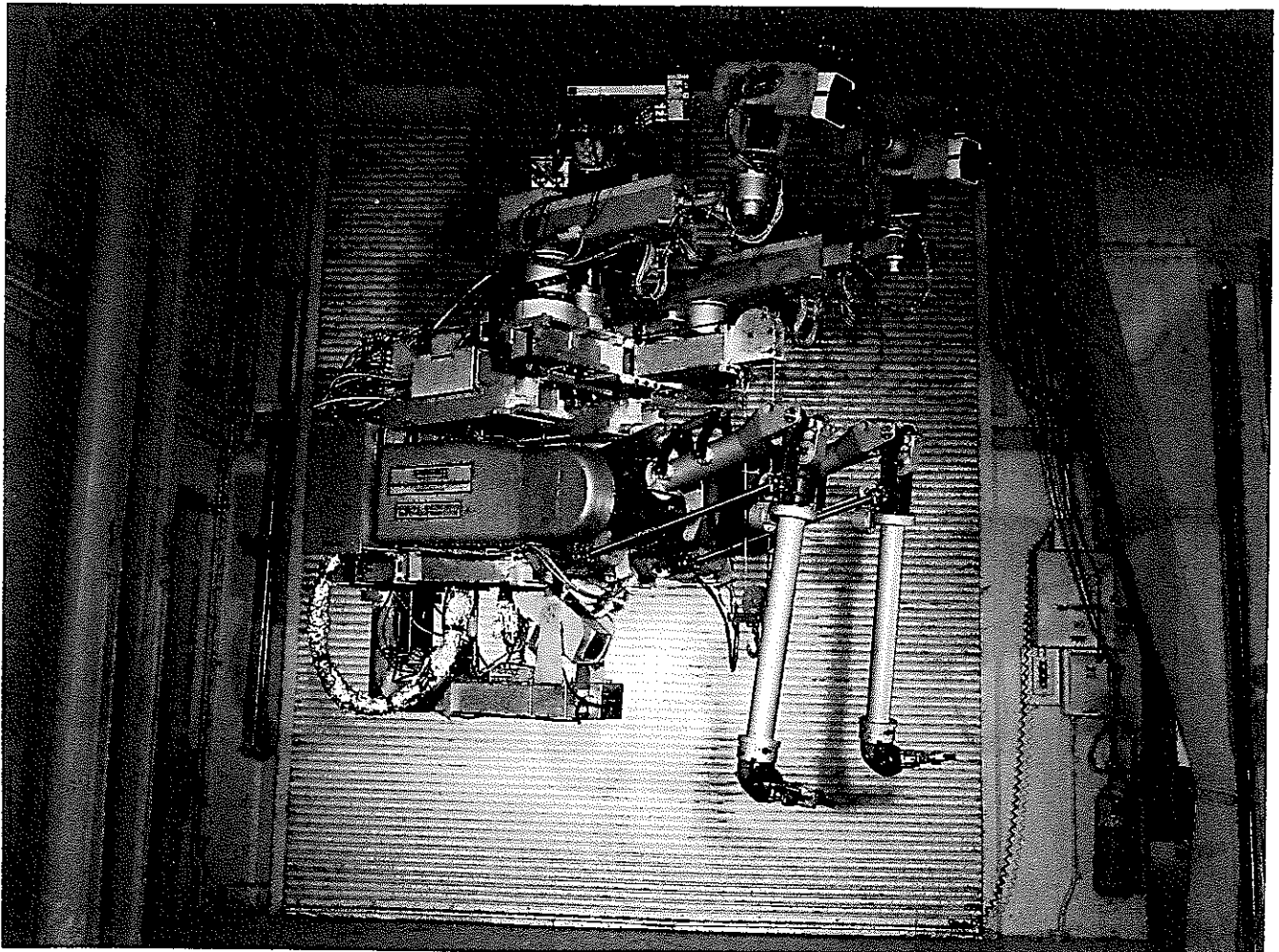


写真2-7 M-2の外観

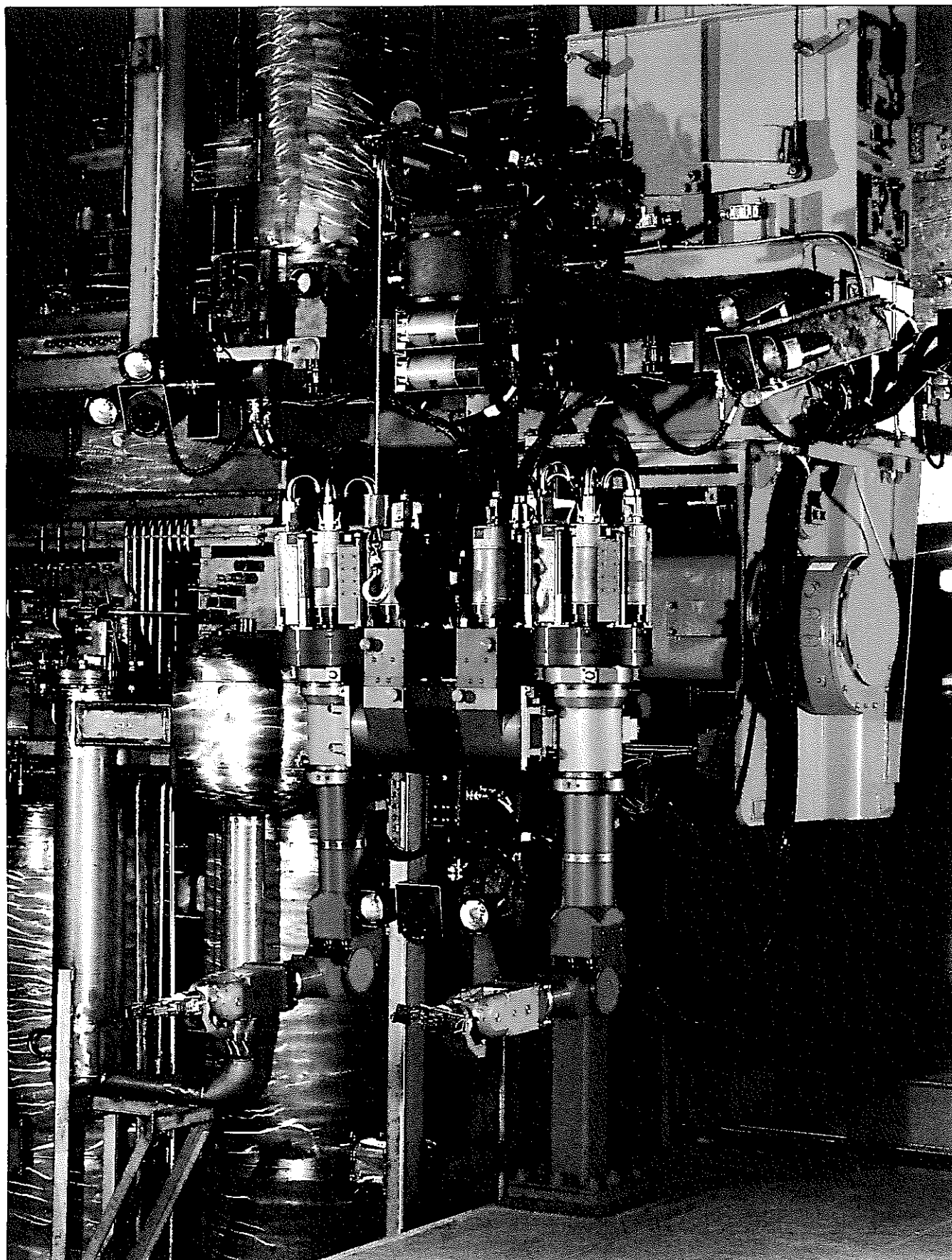


写真 2 - 8 ASMの外観

(2) 試験方法

マニプレータの性能を適切に評価するためには、①オペレータの操作技量に対する定量的評価、②試験タスク及び試験条件の統一化と適正化、が不可欠である。

このため、①については試験に先立ちオペレータ全員（各4名）に対して、専用のテストパネルを使用して一定の作業を、M/Sマニプレータで繰り返して行い、オペレータ個人の平均作業時間の差を評価した。また、②については双方が提案した計16種類の試験対象部品を配置する同一構造のテストスタンド（以下、「MTTS : Manipulator Test TestStand」 という）を製作した。

オペレータの操作技量評価に使用した専用テストパネルの概略を図2-4に、試験機器の配置状況を図2-5に示す。また、MTTSの外観を写真2-9に、試験対象部品名称と配置を図2-6に、試作2号機による試験状況を写真2-10に示す。

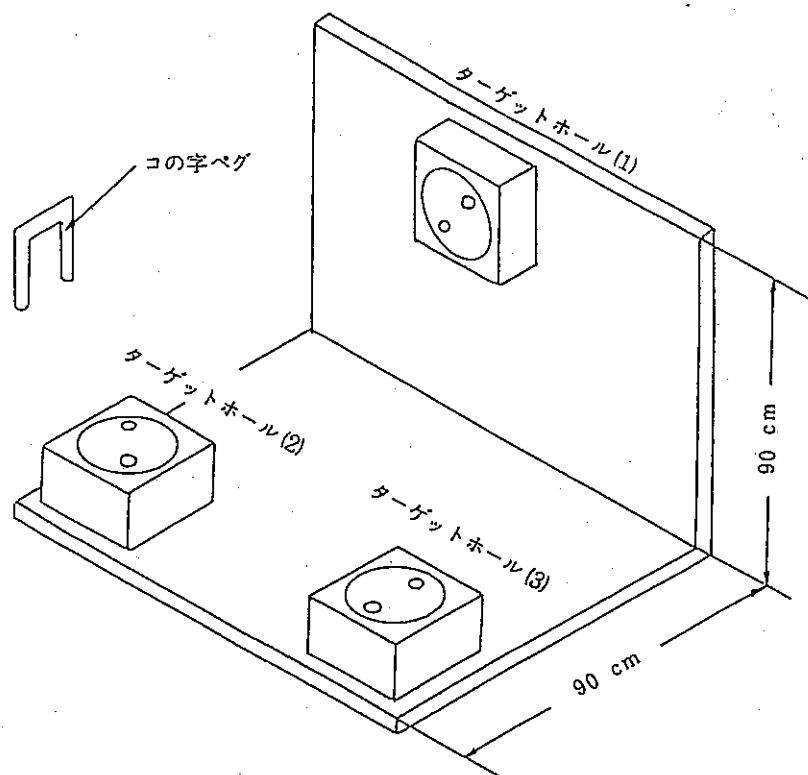


図2-4 オペレータの操作技量評価用テストパネルの概略図

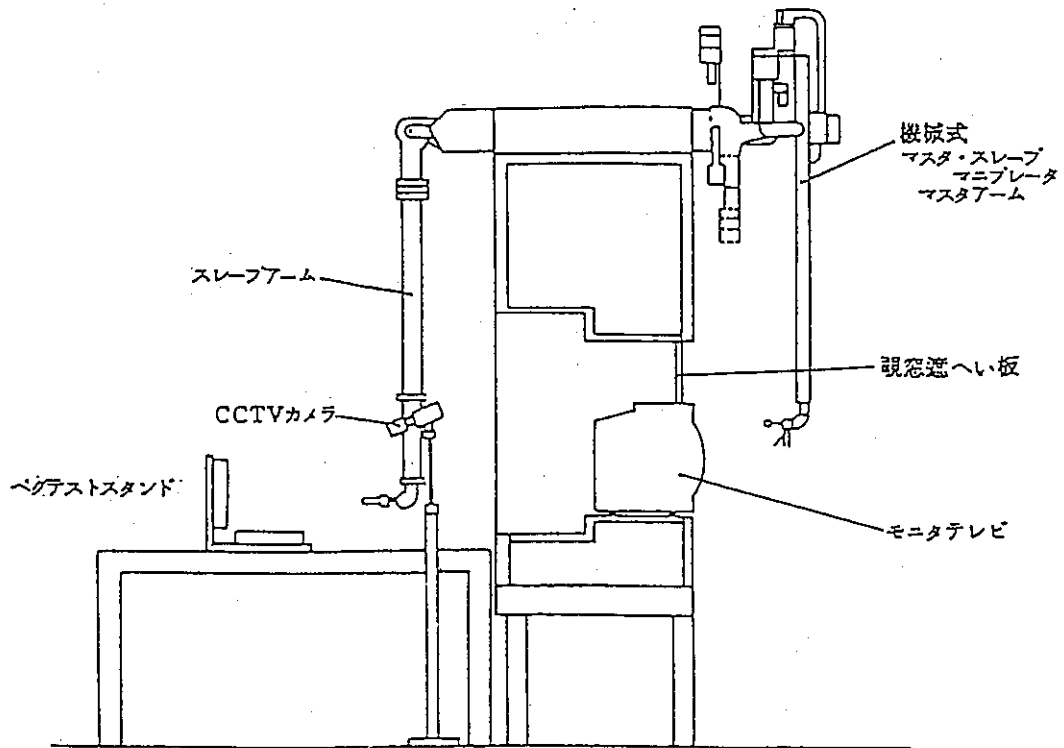


図 2 - 5 オペレータの操作技量評価用テストパネル配置略図

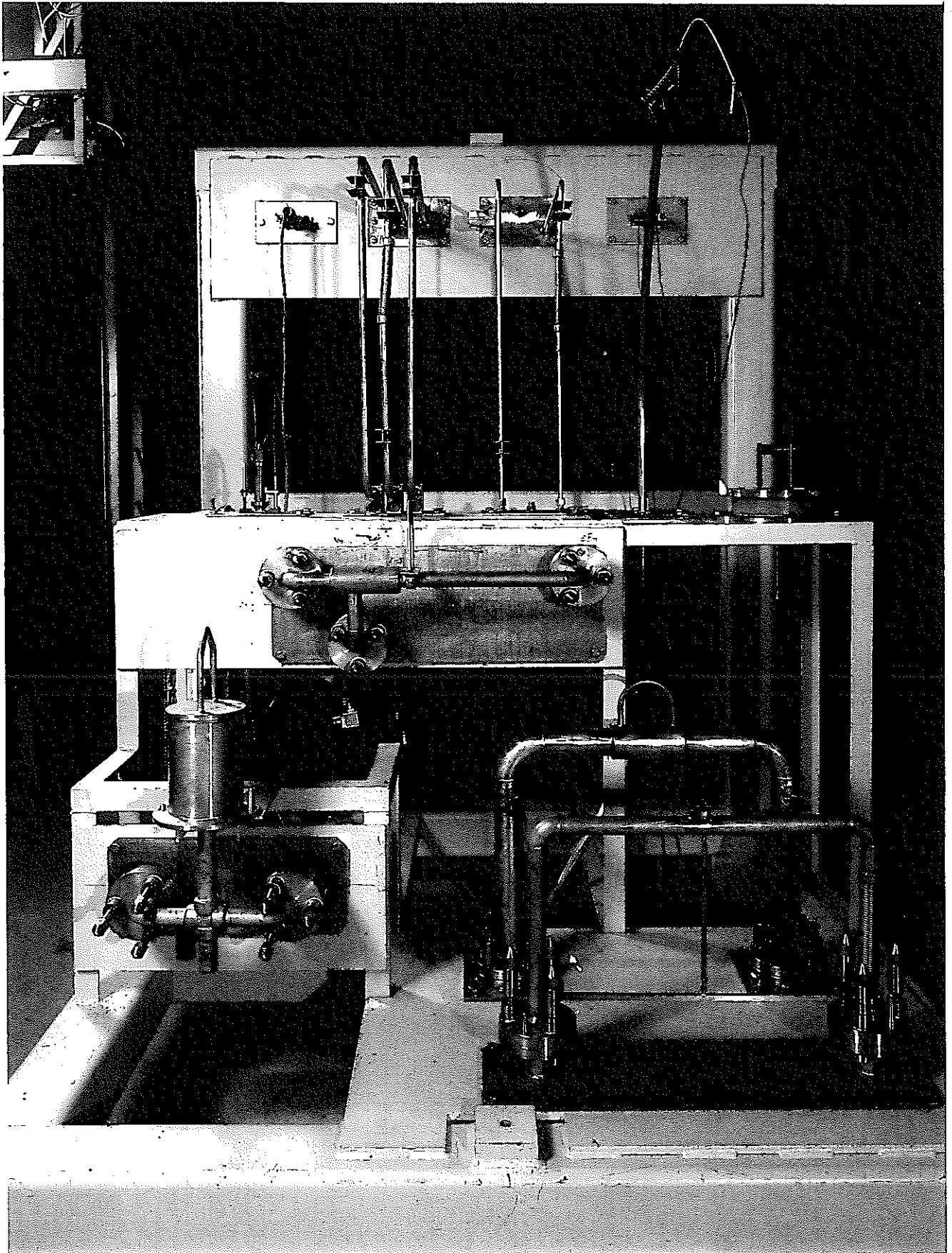
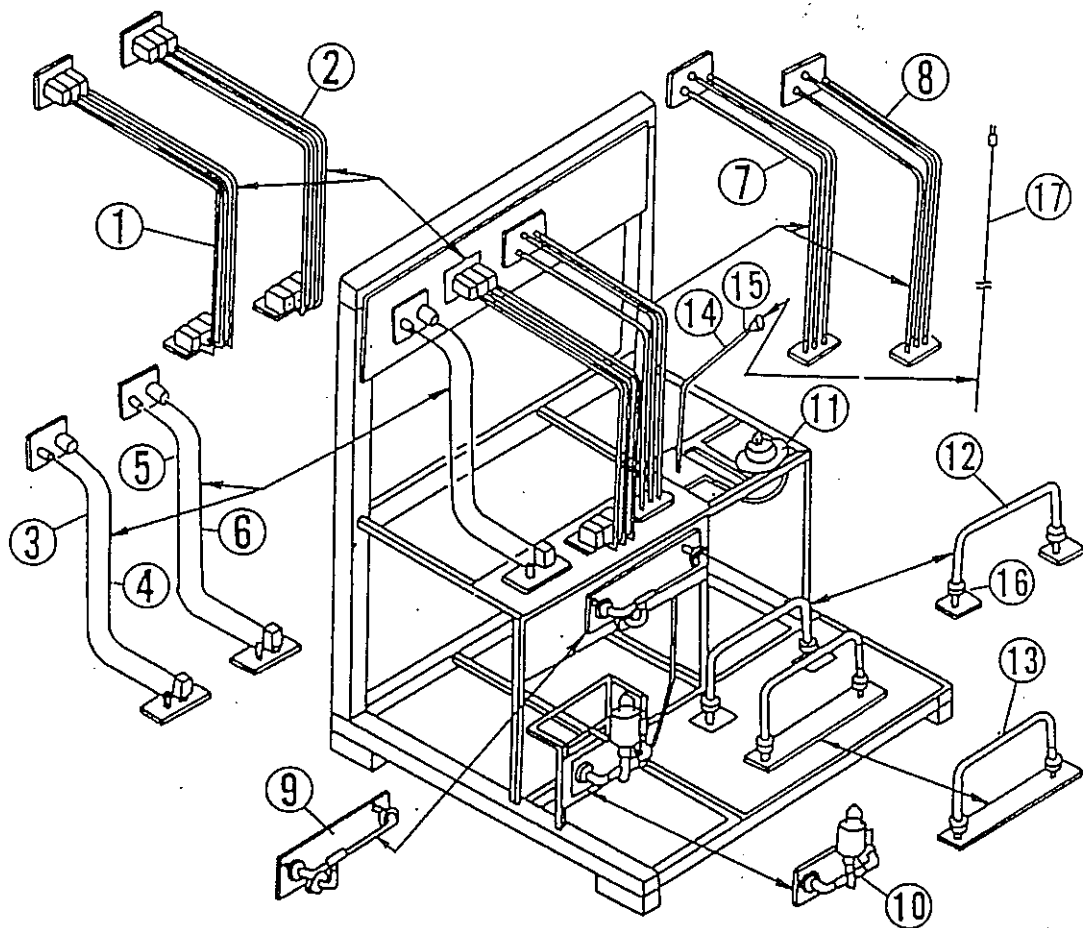


写真2-9 MTTsの外観



番号	名 称	番号	名 称
①	TRUコネクタ付ツィン管 (固定形, 3/4")	⑩	模擬バルブ
②	TRUコネクタ付ツィン管 (ベロー形, 3/4")	⑪	サンプリングステーション
③	電気コネクタ (10芯)	⑫	3 ボルトフランジ (25A)
④	電気コネクタ (60芯)	⑬	4 ボルトフランジ (25A)
⑤	電気コネクタ (8芯, 遠隔型)	⑭	保護管 A (曲げ半径 : R250)
⑥	電気コネクタ (40芯, 遠隔型)	⑮	保護管 B (曲げ半径 : R500)
⑦	スウェィロック付ツィン管 (固定形, 1/2")	⑯	3 ボルトフランジ (25A) Oリング
⑧	スウェィロック付ツィン管 (ベロー形, 1/2")	⑰	熱電対
⑨	模擬エジェクタ		

図 2 - 6 試験対象部品名称と配置

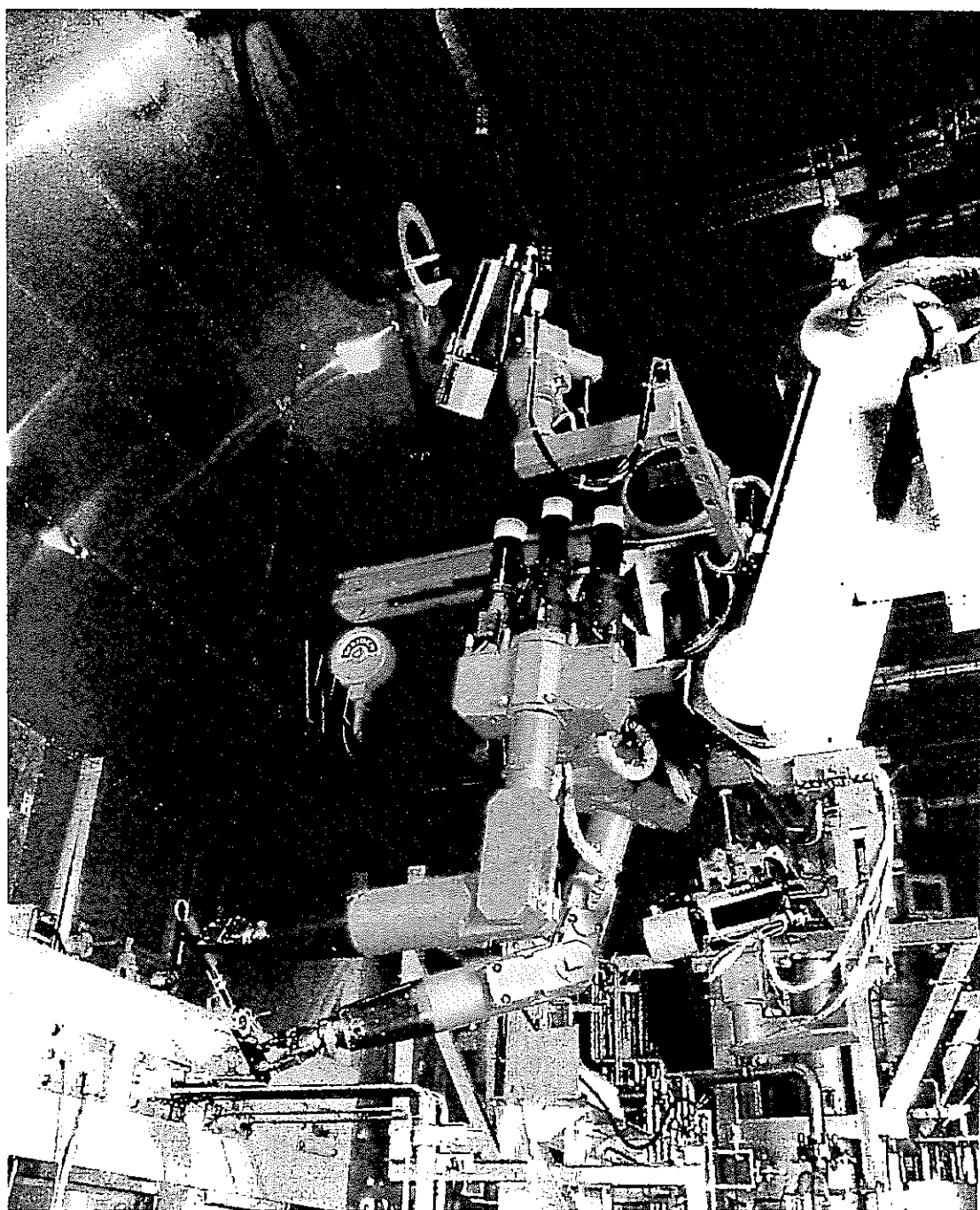


写真 2-10 試作 2 号機による試験状況

(3) 試験結果

電動工具もしくは手工具使用を前提として部品の取扱い等を含む、計16種類の試験対象部品に対する遠隔操作試験を全て実施する事ができた。しかしながら、BSMは総作業時間比で対M-2の約2.4倍、対ASM比の約2倍を費やす結果となった。代表的なタスクにおける操作時間の比較を図2-7から図2-11に示す。

また、他機種との比較はできなかったが、本試験遂行中に以下の定義に区分したエラー（操作ミス）が257件発生した。

- ① 取扱い部品及び工具の落下
- ② マニプレータとMTTSとの接触もしくは監視者の注意
- ③ 作業手順以外の操作（誤操作を含む）
- ④ その他、機器に異常を起こさせるような操作

これら、BSMが他のM-2及びASMと比較した場合、ほとんどの試験タスクにおいて多くの時間を費やす結果となった事、また、多くのエラー数が発生した原因についての作業解析を行い、

- ① マスターアーム（特に1～3軸）の操作力が大きく、始動力及び停止時の慣性力で操作者に疲労が生じる。
- ② パイラテラル機能（特に4～5軸）が効果的でなく、正確な位置決め操作が要求される作業では逆に操作を困難としている。
- ③ 手首の動作範囲が狭いため、機器の配置位置によっては横行、走行、旋回、昇降等のトランスポータ移動動作が必要となる。

等が判明した。

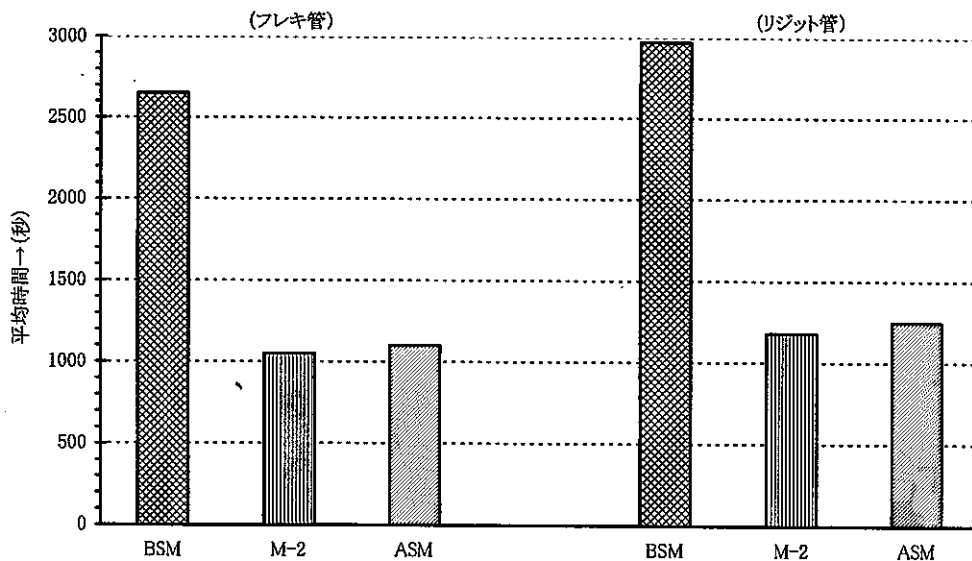


図2-7 TRU継手交換試験

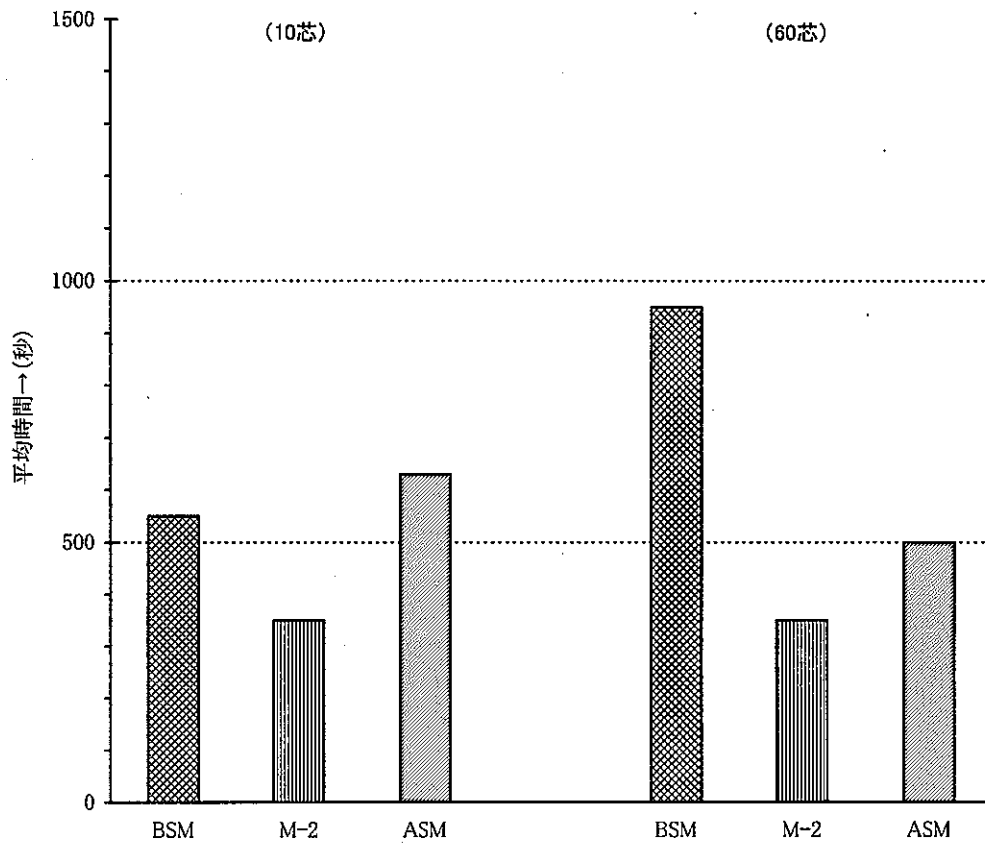


図2-8 電気コネクタ交換試験

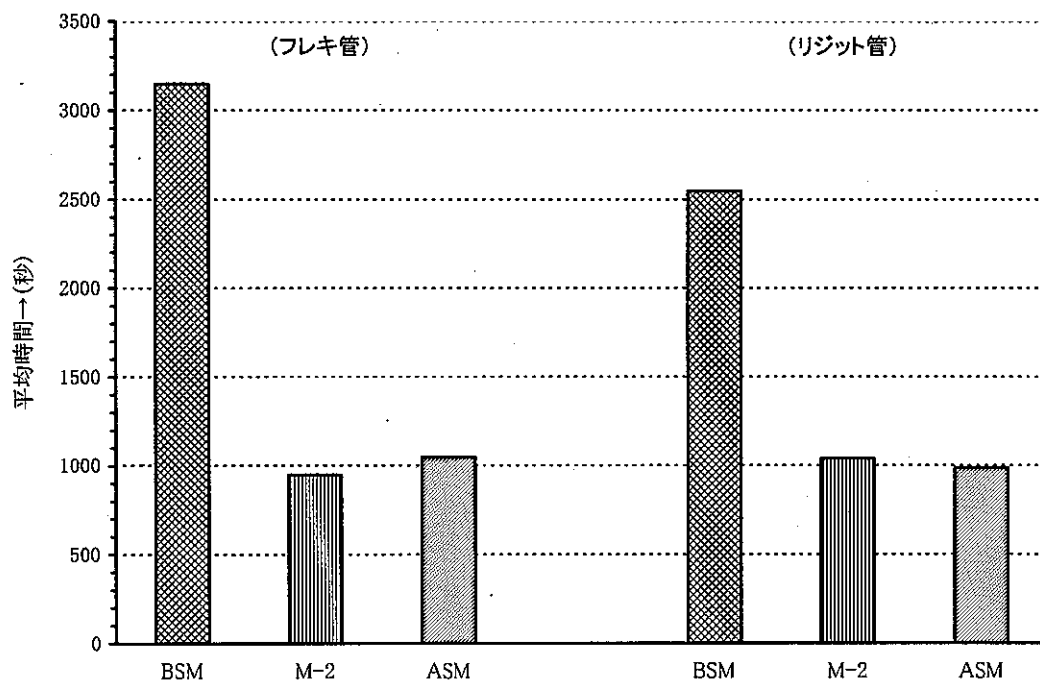


図2-9 スウェジロック交換試験

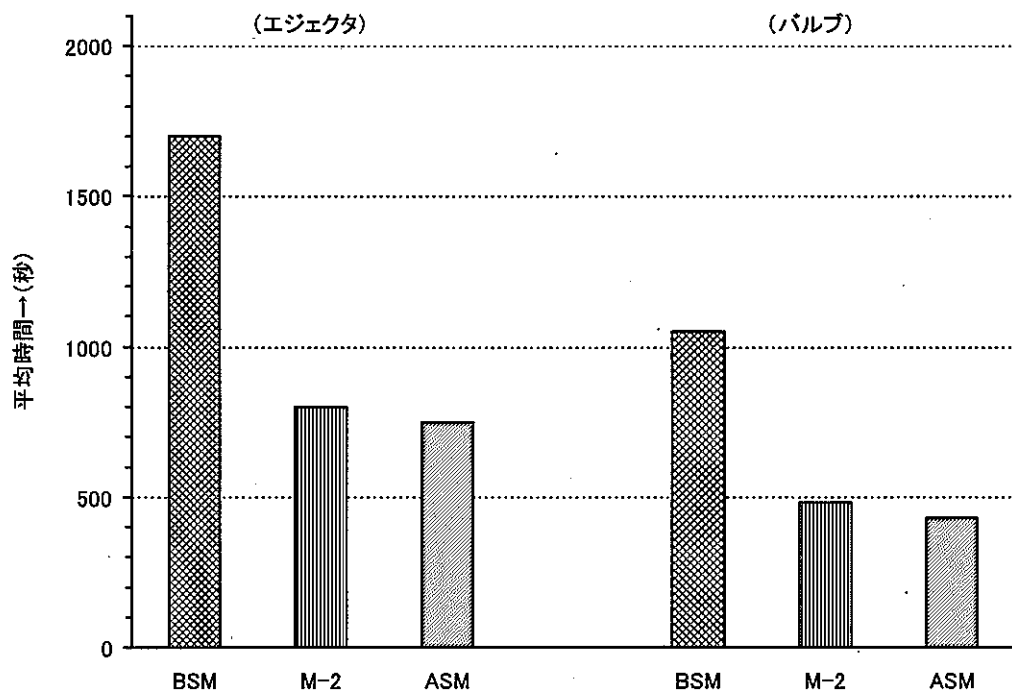


図2-10 エジェクタ及びバルブ交換試験

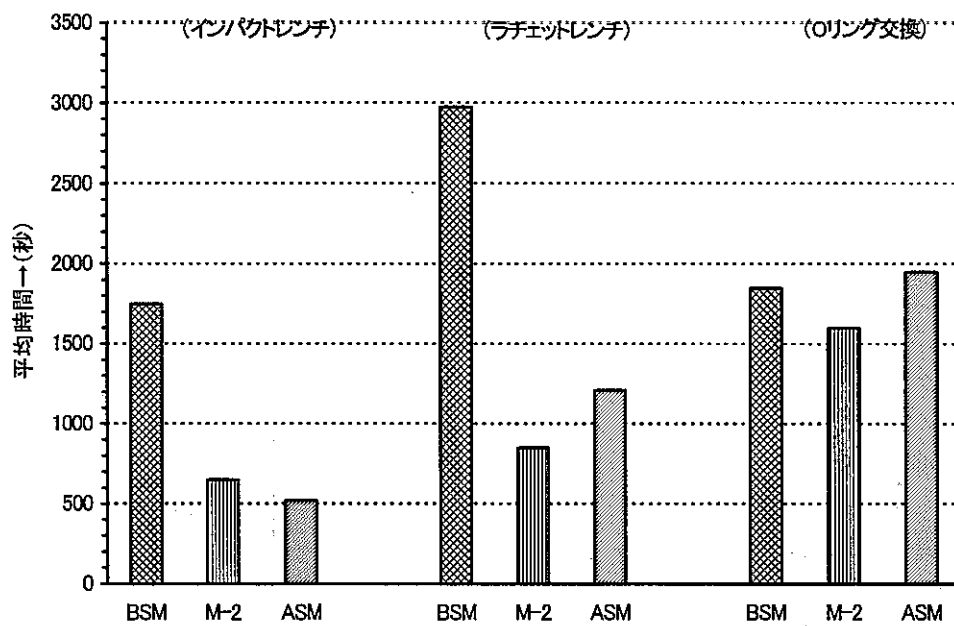


図2-11 3ボルトフランジ交換試験

2.4.4 遠隔自己保守試験

(1) 目的

全遠隔保守を前提とする大型セルに採用されるB S Mシステムは、ラック等のプロセス機器及びインセルクレーン（以下「I / C」という）等の遠隔保守・補修を行うが、万一B S M本体が故障した場合には保守・補修の対象機器となる事から、他の遠隔保守用機器を用いて保守・補修ができる機能（自己保守機能）を備えている事が必須となる。

このため、B S Mはシステム本体の遠隔保守性を考慮して、各構成部位が遠隔操作で交換できるモジュール化構造としており、本試験を通して、

- ① 自己保守対象機器の遠隔着脱機能の検証
- ② 遠隔着脱治具の評価
- ③ 作業手順ならびに作業手順の評価
- ④ 作業における視認性の評価
- ⑤ 遠隔着脱作業時間の把握

を行い、その結果をT V Fの保守設計へ反映させる事とした。

(2) 試験期間

1987年6月9日から8月8日

(3) 試験内容

- ① スレーブアーム着脱試験
スレーブアーム一括着脱及び細分割試験
- ② 主作業I T Vカメラユニット着脱試験
- ③ 補助ホイスト着脱試験
- ④ 照明交換試験
- ⑤ キャリッジ駆動機着脱試験
- ⑥ テレスコ駆動機着脱試験
- ⑦ ケーブルトラック着脱試験
- ⑧ 旋回部着脱試験
- ⑨ ケーブル巻き上げリール着脱試験
- ⑩ テレスコチューブ着脱試験
- ⑪ キャリッジ横行試験
- ⑫ テレスコ昇降用装置機能確認試験

主なB S M遠隔自己保守試験の状況を写真2-11から写真2-13に示す。

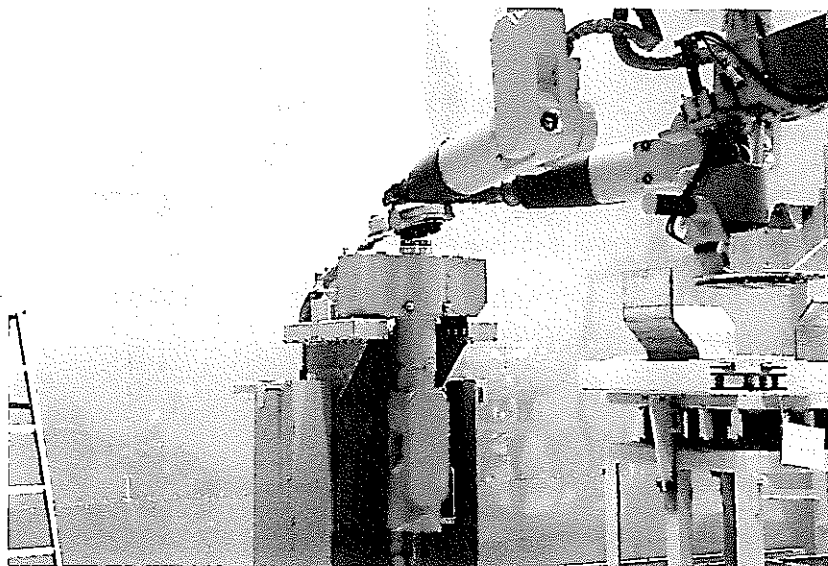


写真 2-11 スレーブアーム細分割試験状況

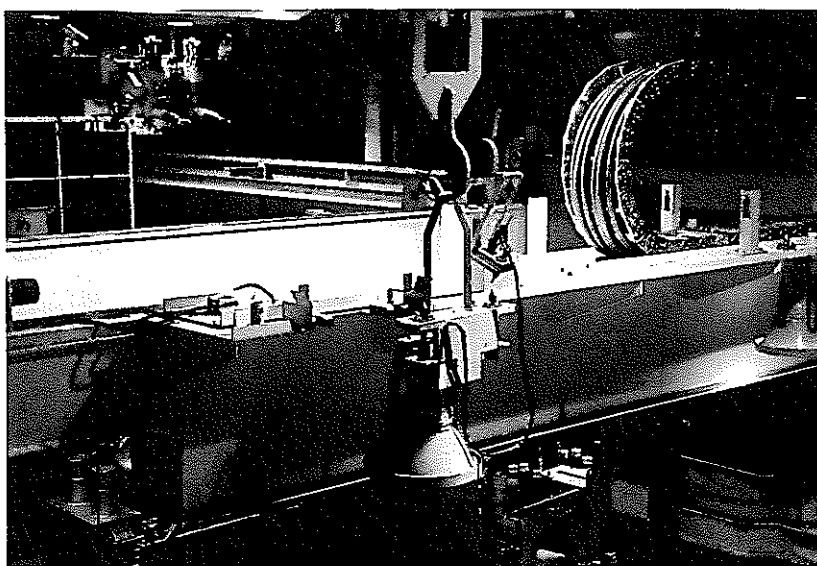


写真 2-12 照明交換試験状況

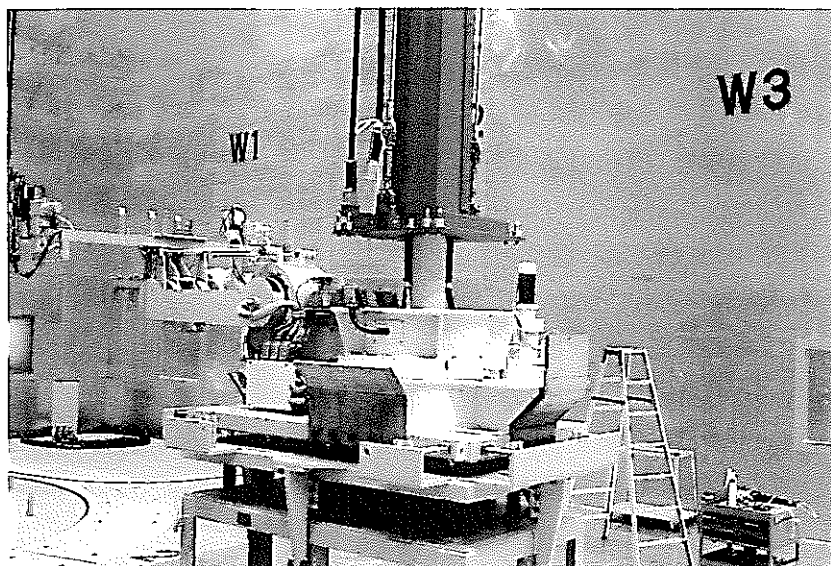


写真 2-13 旋回台着脱試験状況

(4) 試験結果

保守対象機器の形状及び取り付け位置に起因して、操作に対する難易度の差はあるものの、12項目にいたる各機器の保守はすべて可能である事が実証できた。

しかしながら、試験に使用した遠隔着脱治具については、それぞれの保守対象機器について専用の治具が必要な事及び治具本体が大型な事から、ホットセル内で使用する事を考慮した場合には、保管スペース、搬出時の除染等の問題があり、治具の合理化と小型化への改良が指摘された。

2.4.5 パイラテラル機能の評価

(1) 目的

B S Mには、スレーブアーム片腕当たり7自由度(7軸)のうちの「指先開閉」を除く6軸にロードセル(力センサー)を配置して、B S M操作中のスレーブアーム各軸に加わった力をマスターアーム操作者に伝達するパイラテラルフィードバック機能(以下「B F B」という)を有している。これにより、操作者がスレーブアームに加わった負荷を体感的に判断できる事から、B S M操作性の向上及びスレーブアーム本体への過負荷操作防止、他機器との接触時等における操作の安全性向上等に寄与していると考えられ、従来よりマニプレータ操作に対するB F Bの効果を評価する多くの試みが、米国を中心として実施されてきた⁵⁾⁻⁷⁾。

しかし、この評価は通常の機器特性評価と異なり、マニプレータを代表とするマンマシンシステムの場合には、運転員の操作行動を介して初めてその操作性が規定されるが、人間の行動特性は人間工学、実験心理学等の分野で知られるとおり、

- ① 人間から見て外的因子（タスクのタイプ、作業環境等）
- ② 人間に内在する因子（経験及び訓練、体調、疲労等）

等、多種多様の因子に影響され、特に内在的因子については各因子の大きさを測定評価する事が不可能に近い事から極めて困難であった。

このため、1989年度にBFBの有効性を定量的に評価する手法の開発を目的として、東北大学工学部の北村正晴先生にご協力をいただき、

- ① 適切な評価試験用タスクの設計
 - ② 実験計画法による試験手順の適正化
 - ③ 操作性評価のための手法導入
- 等を行った。

(2) 手法の概要

① 評価のためのタスク選定

(a) 垂直ペグ試験（図2-12参照）

この試験では、試験台に設置された0.3mm～1.0mmのクリアランスを持つ複数個のターゲットホールに対して規定サイズのペグ（円柱もしくは角柱）を挿入、抜去る操作を反復して行う。単純な操作ではあるが、空間的な位置決め（空間認知）能力と保持した対象物を一定方向へ直線的に移動させる操作（一定方向移動）能力の両方を評価できる。

(b) 水平ペグ試験（図2-13参照）

垂直ペグの場合には、ペグの先端が正確にホール入口にあてがわれてしまうと、スレーブアーム手首の操作により実際にホール軸方向に沿った移動操作を加えなくとも、重力効果を利用して自然落下的に挿入させる技巧操作が成立する。B S M操作経験が豊かな被験者は、この操作を利用する事により空間認知能力のみでの試験遂行が可能となり、垂直ペグ試験ではB S M操作経験の少ない被験者には一定方向移動能力を要求するが、習熟者についてはこれを要求しないものと予想される。

これに対して、水平ペグ試験は両者いずれにも空間的認知、一定方向移動の二能力を要求するという意味で異なった観点からの評価ができる。

(c) 傾斜ペグ試験 (図2-14参照)

この試験では、他のペグ試験と同様に複数個のターゲットホールにペグを挿入、抜去する操作を反復して行うものであるが、ターゲットホールの中心軸方向を試験台に垂直な方向から15～30°傾斜させており、中心軸方向設定での自由度が大きい特徴がある。

(d) ハンドル試験 (図2-15参照)

BFBの効果が顕在化するのには力情報が本質的な意味を持つ作業であるが、各ペグ試験における力情報はペグの挿入・抜去時の方向の適切さに対する情報のみである事から、その寄与は視覚情報より小さい事も考えられる。

以上の問題を回避する手段として、重量物昇降用リフター(1ton用)に100kgの荷重をかけ、昇降用ハンドル(レバー)を回転させる事とした。一見簡単と思われる操作ではあるが、スレーブアーム先端部が空間に描こうとする回転軌道の半径がハンドルの長さ合わない場合は、この操作は回転ではなくハンドルの軸方向に対して圧縮もしくは引張りの力を加える事となり、この結果、

- ・ ハンドル保持が困難となる。
- ・ リフターに強い外力がかかり大きな振動を引き起こす。
- ・ BSM故障(サーボエラー等)の原因となる。

等が予想され、これらの状態を回避しながら確実に操作を行うには視覚情報と力情報の適切な統合利用が不可欠となり相当な操作技量が要求される。

(3) 評価パラメータ

各試験タスクにおいて測定した試験パラメータは、

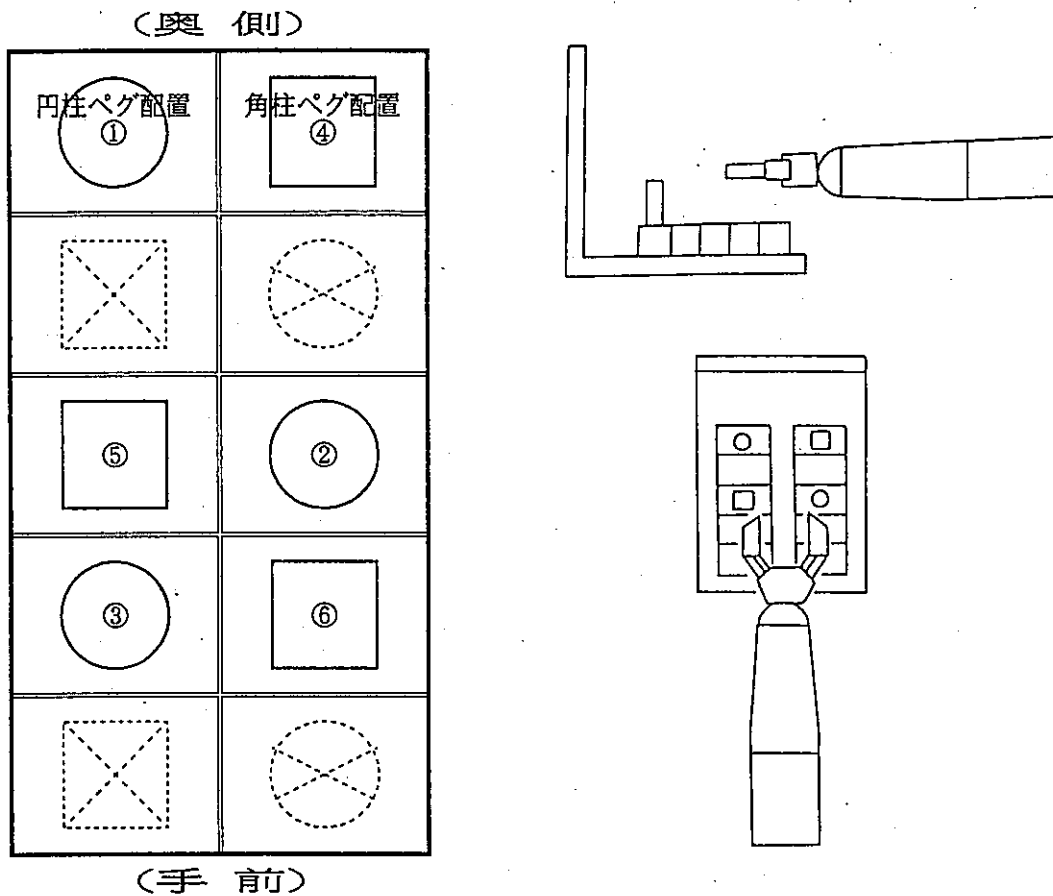
- ① タスクを遂行するのに要した時間(タスク遂行所要時間)
- ② エラーの数
- ③ スレーブアームの1から6軸にかかるトルクの大きさとした。

また、通常のデータ処理では「最小自乗法」「回帰分析」などの手法を用いるが、今回はBSMを操作する被験者が6名と少ない事から、データの代表値には通常用いる「平均値」に替えて「メディアン(中央値)」を採用した。

なお、結果の解析をより容易化するため、

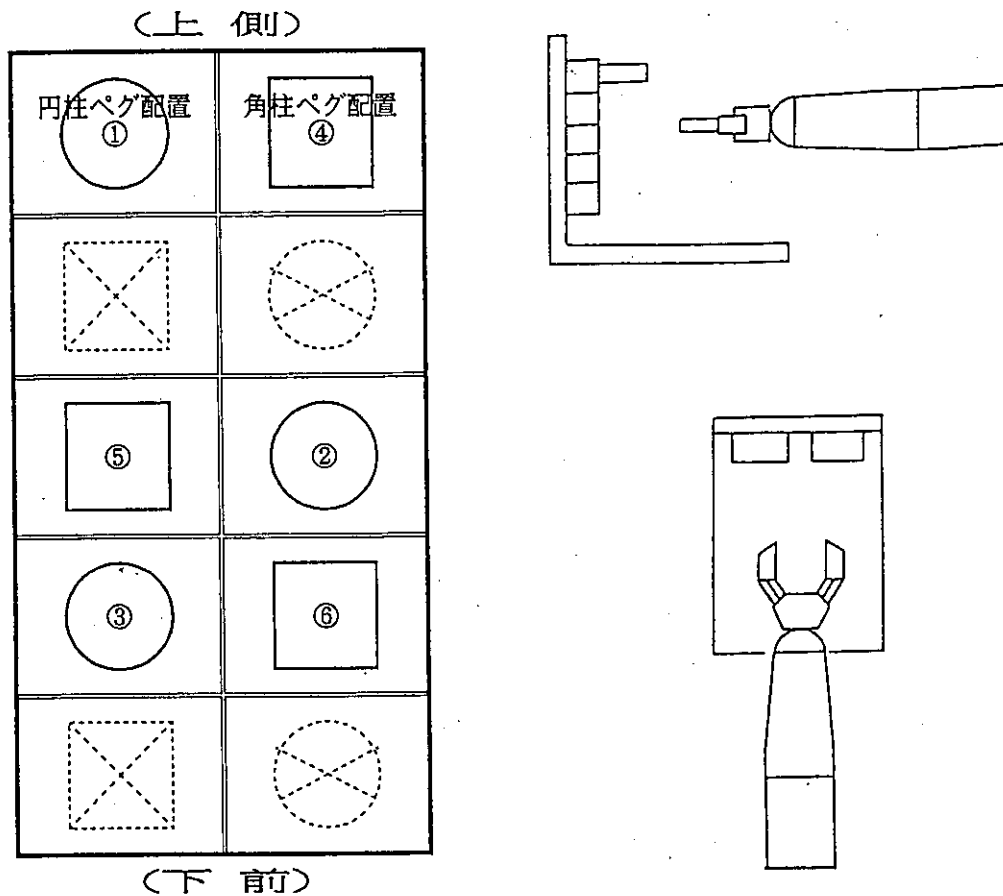
- ① 各タスク遂行の際のバイラテラル感度を1/30に統一する。
- ② ITVカメラは試験実施前に調節し、試験中の調整は行わない。

事とした。



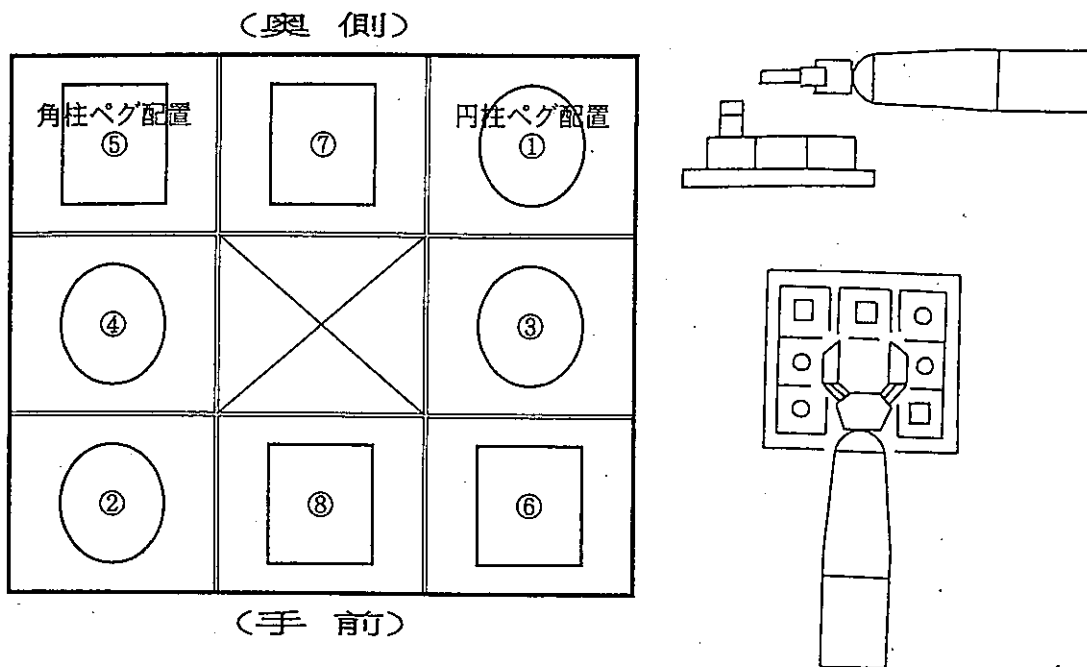
試 験 手 順
(1) STARTの合図で円柱ペグを握み①から抜去する。
(2) 円柱ペグを②へ挿入し、抜去する。
(3) 円柱ペグを③へ挿入し、抜去する。
(4) ①へ戻し、円柱ペグを離す。
(5) 角柱ペグを握み④から抜去する。
(6) 角柱ペグを⑤へ挿入し、抜去する。
(7) 角柱ペグを⑥へ挿入し、抜去する。
(8) ④へ戻し、角柱ペグを離す。

図 2 - 1 2 垂直ペグ試験の方法



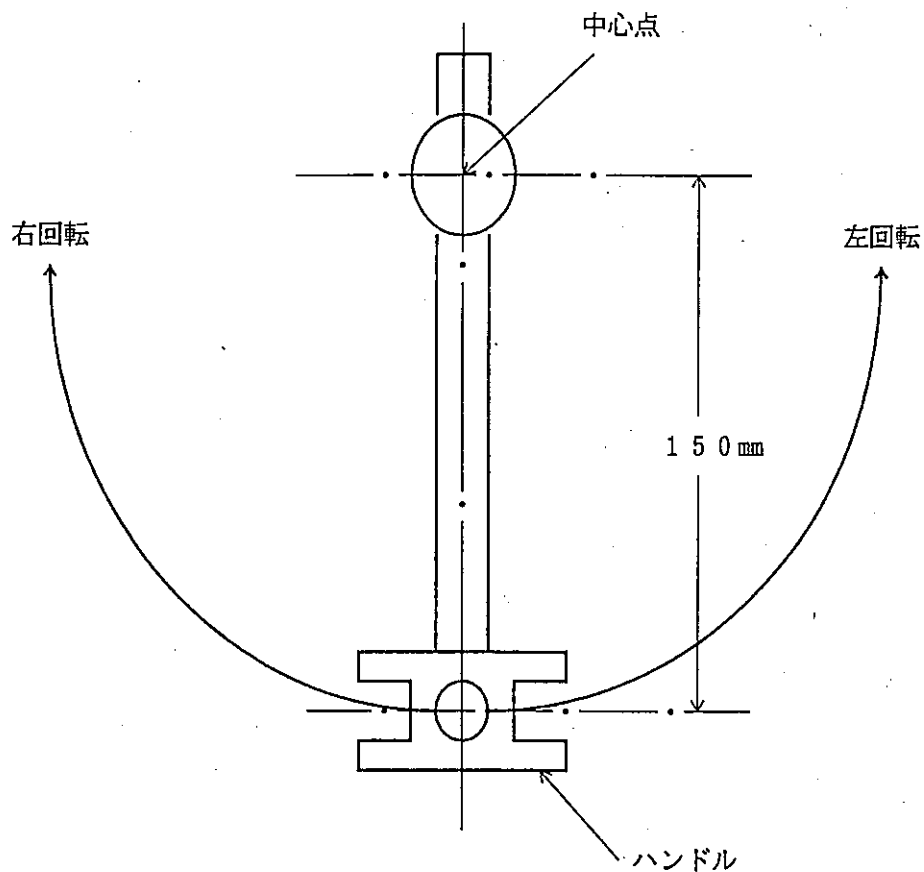
試 験 手 順
(1) STARTの合図で円柱ペグを掴み①から抜去する。
(2) 円柱ペグを②へ挿入し、抜去する。
(3) 円柱ペグを③へ挿入し、抜去する。
(4) ①へ戻し、円柱ペグを離す。
(5) 角柱ペグを掴み④から抜去する。
(6) 角柱ペグを⑤へ挿入し、抜去する。
(7) 角柱ペグを⑥へ挿入し、抜去する。
(8) ④へ戻し、角柱ペグを離して終了する。

図 2 - 1 3 水平ペグ試験の方法



試 験 手 順
(1) STARTの合図で円柱ペグを掴み①から抜去する。
(2) 円柱ペグを②へ挿入し、抜去する。
(3) 円柱ペグを③へ挿入し、抜去する。
(4) 円柱ペグを④へ挿入し、抜去する。
(5) ①へ戻し、円柱ペグを離す。
(6) 角柱ペグを掴み⑤から抜去する。
(7) 角柱ペグを⑥へ挿入し、抜去する。
(8) 角柱ペグを⑦へ挿入し、抜去する。
(9) 角柱ペグを⑧へ挿入し、抜去する。
(10) ⑤へ戻し、角柱ペグを離して終了する。

図 2 - 1 4 傾斜ペグ試験の方法



試 験 手 順
(1) STARTの合図でリフト機ハンドルを右回転（時計方向）させる。 —— 100kgのウェイトを上げる操作
(2) 右3回転で停止する。
(3) リフト機ハンドルを左回転（反時計方向）させる。 —— 100kgのウェイトを下げる操作
(4) 左3回転で終了する。

図 2 - 1 5 ハンドル試験の方法

(4) 被験者の選定

試験期間の理由により被験者数を6名とした。また、被験者はBSM操作経験者の中からできる限り操作技量レベルの高い人を対象とした。

この理由として、初心者の場合にはTCT値^{*2}が熟練者に対して桁違いに大きくなる事から測定データの統計的扱いが困難となり、それに伴って試験全体の所要時間も大幅に増大する事を避けるためである。さらに、ホットセル内において初心者がマニプレータ操作を行う事はありえないからである。

*2 TCT値：タスク遂行所要時間 (Task Completion Time の略)

(5) 評価結果

① タスク遂行所要時間による評価

各タスクに対して、被験者ごとの「TCTmedian値」をBFB on/offの2条件についての比較を行った結果、タスクの種類により差があるものの大多数の被験者がBFB onの条件の方が短い時間で作業を遂行しており、BFBが操作性に有効に作用している事が確認できた。

また、垂直ペグと水平ペグについてはTCTmedianの低下量が傾斜ペグ及びハンドルと比較して全体傾向としては大きく、さらに、傾斜ペグ及びハンドルについては、BFB on/offの2曲線が極めて類似した傾向を示している事から、これらのタスクではBFBがほとんどの被験者について定量的にも類似した効果をもたらしている事が判明した。

これらを、整理するため各データから導かれるFER値^{*3}を、TCTmedian値及び変動量指標の両方についてまとめた結果を下表に示す。

*3 FER値：BFBがonの場合により高い操作性を示した割合 (Feedback-Effect occurrence Rate の略)

なお、変動量指標は以下の式により求めた。

$$\text{変動量指標} = (\text{TCTmax} - \text{TCTmedian}) / \text{TCTmedian}$$

この式は、メディアンからの最大偏差を示しており、操作の安定性を反映する評価方法のひとつである。TCTmax、TCTmedianは、それぞれ同一試験条件、同一被験者での反復試行におけるTCT値の最大値及び中間値であり、明確な特異値が存在しないデータの場合においてもTCTmaxの評価は可能となり、変動量指標が操作の安定性に関する目安となるものと考えらる。

BFBによるTCTmedian値及び変動量指標の低減効果を表2-4に示す。この表から、4種類のタスク、6人の被験者全体に着眼した場合、「TCTmedian」では24事例中20事例(80%以上)、「変動量指標」でも24事例中17事例(70%以上)において、BFBが操作性に有効に作用している事が判明し、さらに、ハンドル操作においては、すべての被

験者がBFB/ONの条件での結果が良好となっている事が確認できた。

ハンドル操作では、BFB on/off で各18試験を行ったが、すべての試験においてBFBがonの状態の結果のほうが良好であり、エラー数もBFBがoffではの状態では15回発生したが、BFBがonの状態での発生はなく、BFBが極めて有効に作用している事が判明した。

② トルクによる作業負荷評価

被験者全員の最大トルク値の低減率を各タスクにおいてBFB on/off の状態で比較した結果を下表に示すが、BFBをonの状態とした場合、すべてのタスクにおいて最大トルク値が減少しておりBFBの有効性が判明した。

特に全軸を動かすリフト機においてはこの傾向が顕著であった。

各タスクごとの最大トルクの低減率を表2-5に示す。

表2-4 BFBによるTCTmedian値及び変動量指標の低減効果(FER)

	TCTmedian	変動量指標
垂直ペグ	5 / 6	5 / 6
水平ペグ	5 / 6	4 / 6
傾斜ペグ	4 / 6	3 / 6
ハンドル	6 / 6	5 / 6

表2-5 タスクごとの最大トルク低減率

タスク	減少率
垂直ペグ	0.80
水平ペグ	0.63
傾斜ペグ	0.72
ハンドル	0.54

(6) 結論

- ① タスク遂行時間については、その反復測定データの代表値としてメディアンによる評価を行ったが、全試験タスクの80%以上の試験条件下で明らかな改善効果がみられた。この傾向は、傾斜式ペグ及びハンドル操作等のより難度の高いタスクにおいて特に顕著である事から、実際的な作業にも成立するものと思われる。
 - ② 同一試験条件下におけるタスク遂行時間の変動量もまたBFBが効果的に作用した事により低減されている。さらに、システムダウンに代表されるトラブル（エラー）についてもBFB効果により有意に低減されている。
 - ③ 作業遂行中における最大トルク値はBFB効果により50から80%に低下した。この事は、作業遂行時の運転員に対する負荷の大幅な低減を示唆していると思われる。作業負荷と操作ミスを生起確率とは密接な関係を有すると言われている事を考えた場合、大幅な負荷の低減は極めて好ましいと評価される。
- 以上の試験結果を総合すると、BFBを導入した事によりBSMの操作特性は、すべての評価指標に対しても明らかに改善されている事が判明した。また、BFBの採用はタスク遂行の安定性についても有意な寄与をもたらしており、ホットセル内作業を考慮した場合のメリットは特に大きいと考える。

2.5 TVF適用に向けて試験2号機の改良

試験2号機は完成後、多くの遠隔保守試験に供し、その結果をシステムの機能向上、信頼性の向上、遠隔保守性の向上等に反映させた事により、実用に耐えうる機器として一応の完成に至った。本項では、試験2号機がTVFに採用されるまでに行った主な改良の内容を記載する。日米高性能マニプレータ性能評価試験での作業解析の結果をもとに、1987年度からBSMの機能の向上を目的とした改良を実施した⁸⁾⁻¹⁰⁾。

2.5.1 マスターアーム操作力低減のための改良

試作2号機では、設計仕様の検討に基づいてマスターアームの力反力（=出力）を最大4kgで設計し、また、マスターアームの自重補償には電気バランス方式を採用していた。このため、モータ及びマスターアーム本体が大型、かつ重量化した事から操作力を必要とする結果となった。試作2号機を使用して行った各種遠隔保守試験において、マスターアームの力反力は1kg程度あれば遠隔操作を行う上で支障ない事を確認している。

そこで、マスターアームに対して、力反力の低出力化（力反力=1kg）と自重補償を機械バランス方式に変更する事で、モータの低出力化への改良を図り、

- ① マスターアーム本体の小型軽量化
- ② 低摩擦力化
- ③ 低慣性化

を図った。また、マスターアームをより軽く動かすため、発振を抑えるとともに自重補償ゲインを高く設定する事ができるように、

- ① マスターアーム本体の高剛性化

② センサ系の低ヒステリシス化

③ 信号系の低ノイズ化

を図った。さらに、制御ソフトの簡素化を図る事で全体的に制御性を向上させた。これらの改良の相乗効果により、マスターアーム操作力の低減を可能とした。

2.5.2 バイラテラル性能の向上

試作2号機では、マスターアームの自重補償に電気バランス方式を採用していた事から、自重補償分、モータ出力が分散していた。そのため、モータ出力が有効に活用されず、その分バイラテラル性能を低下させていた。

そこで、マスターアーム操作力の低減に加えて、改良型マスターアームの機械設計においては低摩擦モータと小型ギアを採用する事とした。この結果、マスター側の不感帯を低く抑える事ができ、また、マスターアーム操作力の低減と相まって、さらに、各制御ゲインを高める事で、バイラテラル性能の向上を可能とした。

2.5.3 スレーブアーム手首動作範囲の拡大

機械工具の操作や電気コネクタ等を装脱着する操作においては、手首動作範囲が広い方が操作が容易であり、作業能率が良くなる事が分かった。このため、手首機構を検討した結果、従来の1段ユニバーサルジョイント方式から2段ユニバーサルジョイントに変更する事により、既存の $\pm 45^\circ$ から機械的には $\pm 90^\circ$ まで拡大する事が可能な事を確認した。また、ガタの少ない設計・高剛性部材の適用及び精密加工の適用により、現状の一段ユニバーサルジョイント手首と同程度の性能が維持できる事が確認できた。

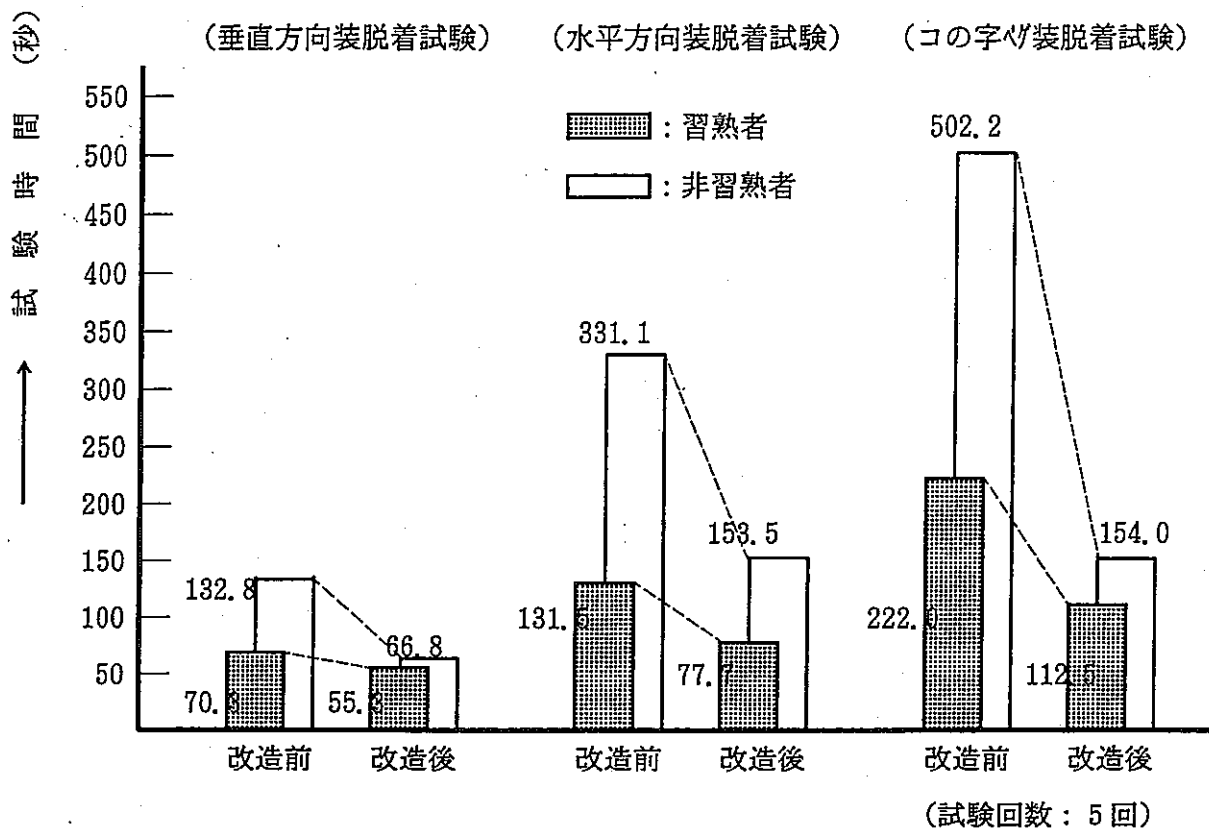
なお、EDF-Ⅲ用の手首はリミットスイッチ等の安全装置の動作域を考慮して $\pm 80^\circ$ で製作しているが、TVF用としては動作の確実性を重視して $\pm 70^\circ$ で設計製作を行っている。

2.5.4 スレーブアームの握力の向上

スレーブアームの握力を従来の20kgから30kgに向上させ、また、指先を閉じる操作を行った場合は、常時指先が閉じる方向へ微弱電流を印加し続ける事への改良を行った。これにより、機械工具の操作や電気コネクタ等を装着する場合に、工具類のフラツキを無くして位置決め操作をより確実化する事及び位置決め作業中に工具類を落下してしまうエラーの減少が確認できた。これら改良の有効性を評価するため、右腕改良後の1987年6月から「改良効果確認試験」を実施し、その効果がBSM操作に経験の少ない者（非習熟者）に対して、特に有効である事が確認¹¹⁾できた。このため、左腕に対しても同様の改良を行い、1988年11月から「日米高性能両腕型マニプレータ比較試験」と同一条件での試験を実施した結果、当時のASMとほぼ同等以上に操作性が向上しており、本改良の有効性を確認した。改良効果確認試験の結果を図2-16に示す。

また、改良後のBSMの外観を写真2-14に、TVF用BSMの外観を写真2-15に示す。

<試験所要時間の比較>



<エラー数の比較>

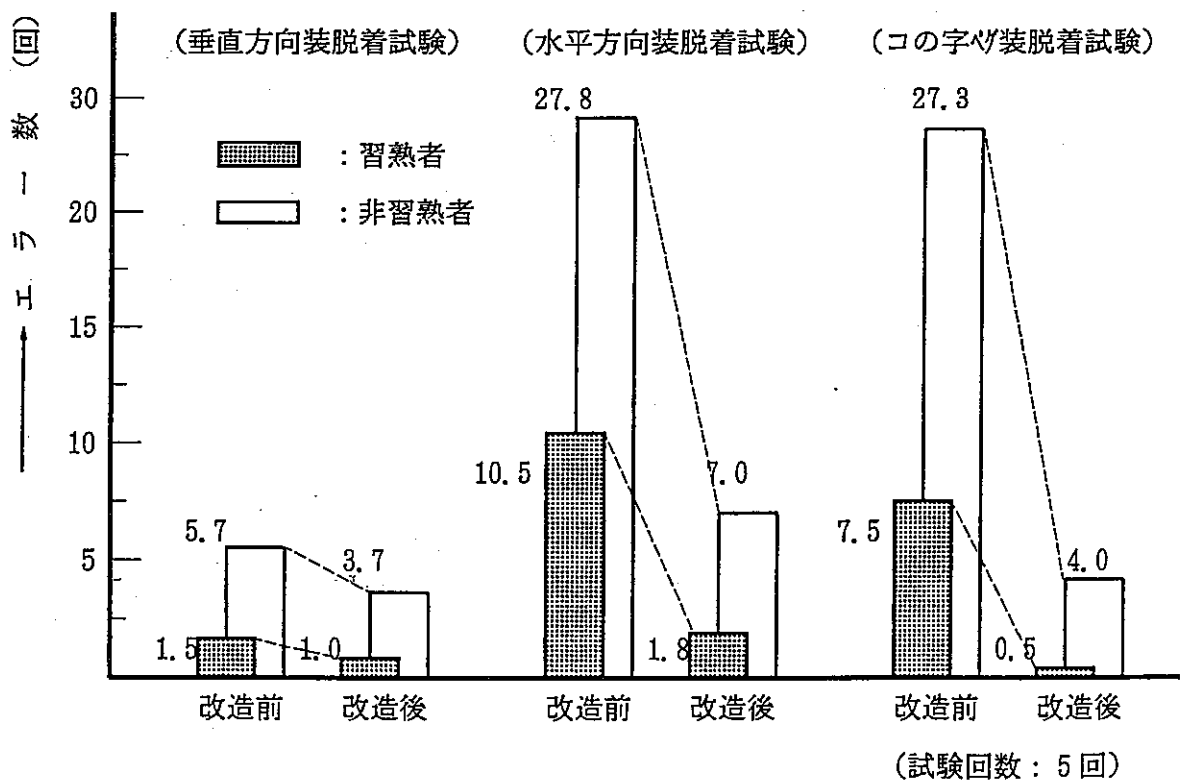
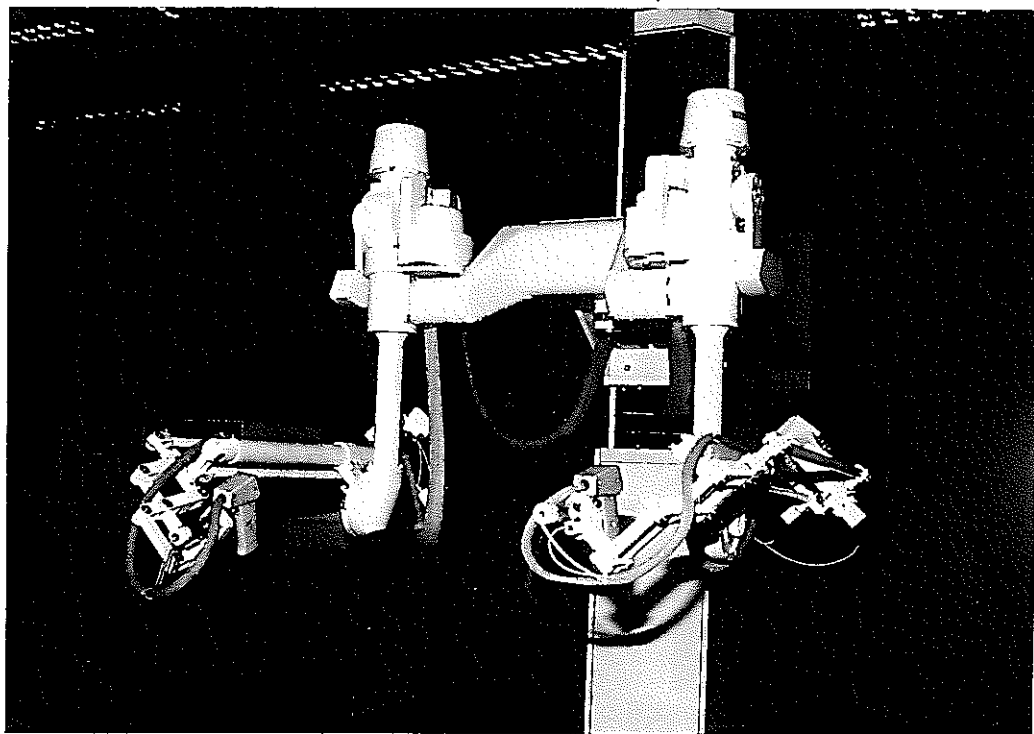


図 2 - 1 6 改良効果確認試験結果

マスターアーム



スレーブアーム

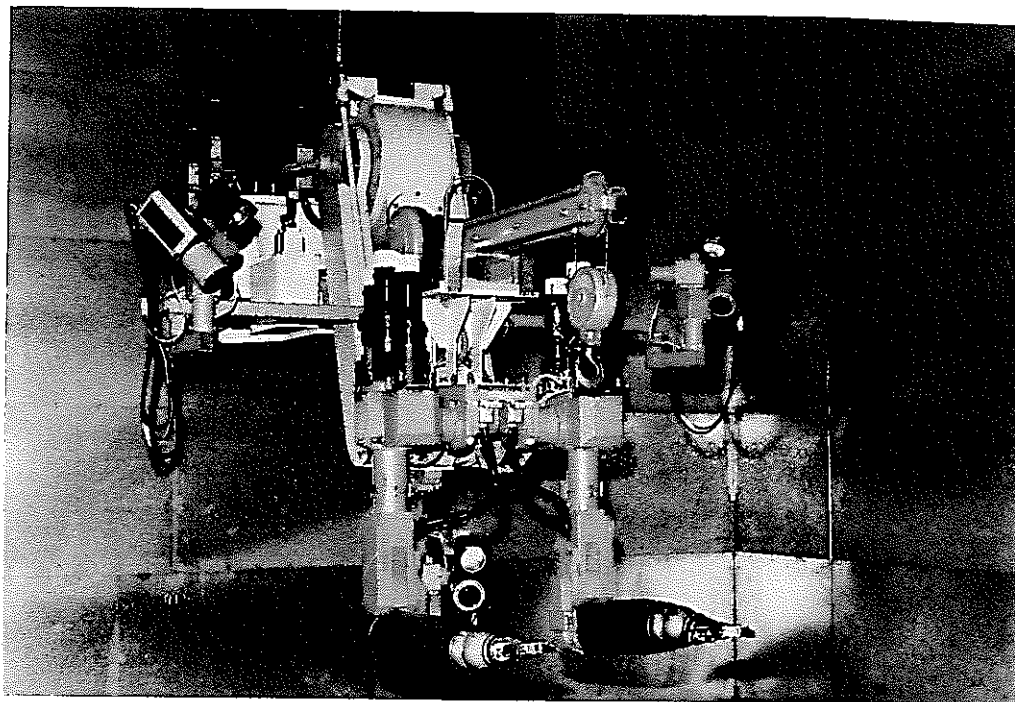


写真 2-14 改良後の試作 2 号機外観

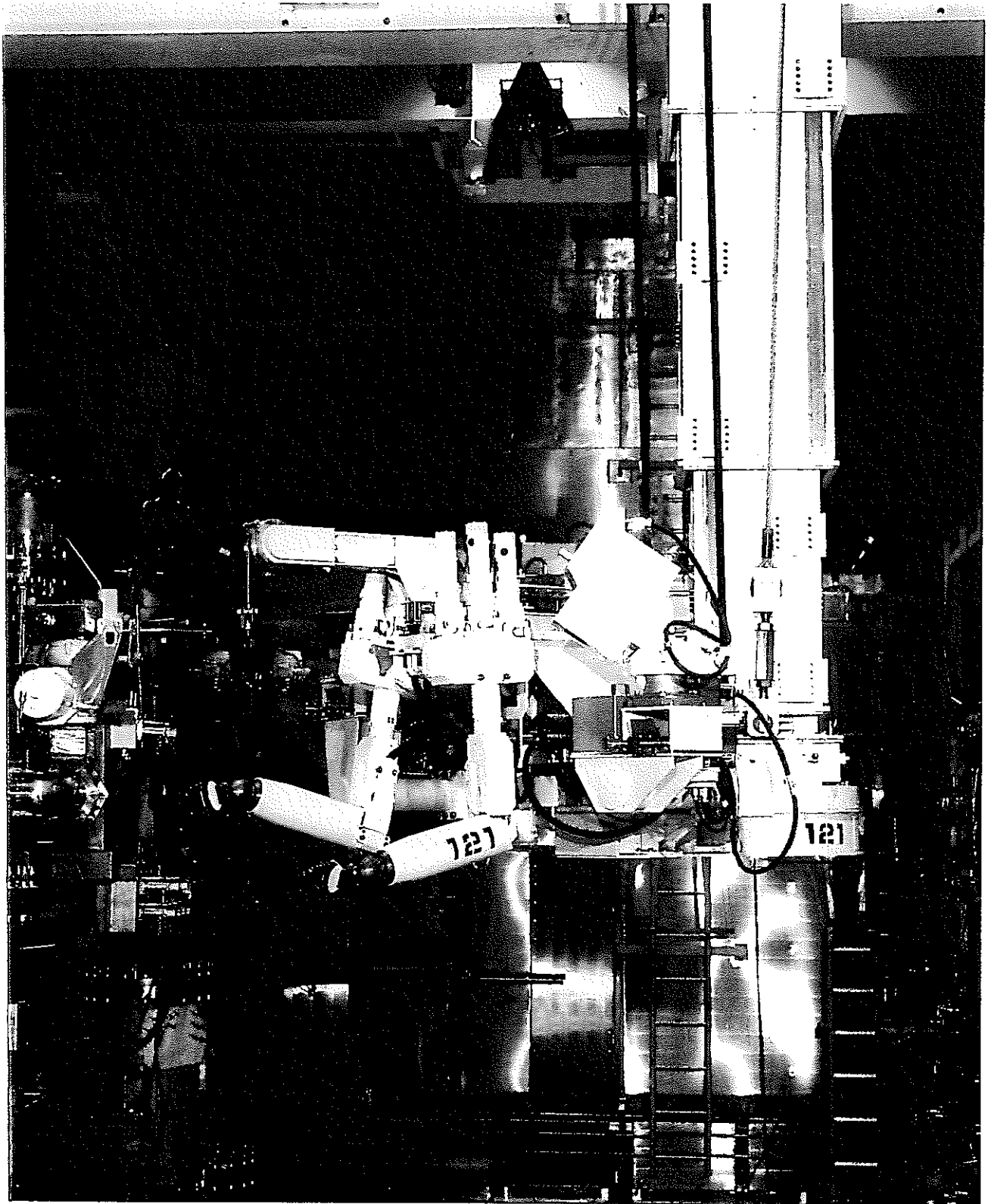


写真2-15 TVF用BSMの外観

2.6 RETF適用に向けてのシステム改良

2.6.1 トランスポータシステム

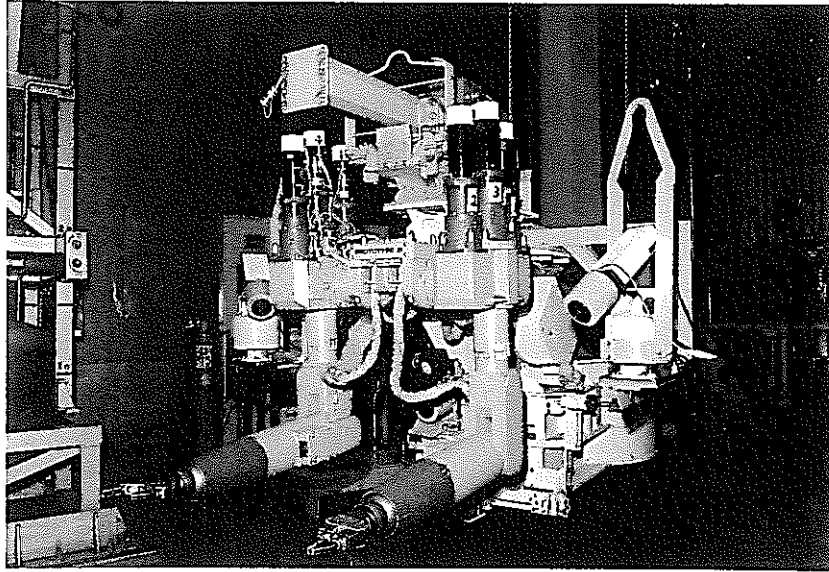
当初のRETF設計においては、セル壁際の配管スペースの削減及びその結果としてのセル高の削減を目的として、保守対象機器を搭載したラックを一旦セル壁から離れた場所の下ろし、壁際までローラ上を移動するロールイン方式のラック（以下、「ロールインラック」）の採用を検討していた。本方式においてラックに搭載した機器は、ラックラック間1.7mの狭隘部にBSMを進入させた後、ラックの側面から保守する事となる。

これに対して、小型旋回方式を採用しているUSMシステム（TVF用BSMとほぼ同じ旋回台構造）でも基準姿勢Iにおいて、スレーブアーム指先から旋回台の後端までの寸法が2.6mである事から、RETF設計に対応するために2段旋回方式のトランスポータブームを開発した。

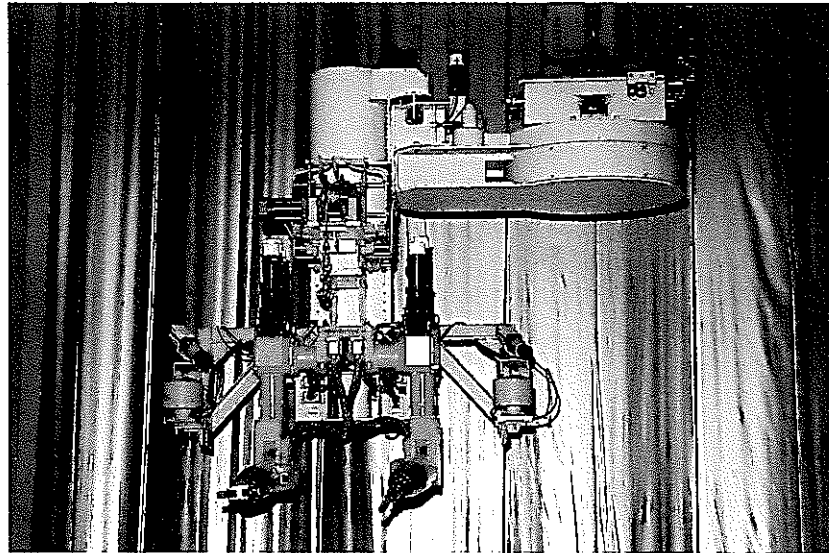
本トランスポータブームは、既存のUSM旋回台に第2旋回台を付加した事で、基準姿勢Iにおけるスレーブアーム指先から旋回台後端までの寸法を1.7mに小型化する事ができた。（設計上では第1旋回台を改造する事でさらに1.5m程度までの小型化が可能である）

以降、RETFの設計変更でラックはロールインラック方式からセットダウン方式となり、また、ラック搭載機器も正面から保守事となったが、開発した2段旋回方式のトランスポータブームについては、システム小型化の有効性からRETFでの採用を前提として設計されている。

改造前後の旋回台の外観を写真2-16に示す。



(改造前)



(改造後)

写真 2 - 16 改造前後の旋回台の外観

2.6.2 視聴覚システム

B S Mには、左右の肩口カメラ、中央カメラ（TVF用には配置されていない）、上部カメラが配置されており、操作者は各カメラからの映像でセル内の状況及び保守対象物を確認しながらマスターアームを操作する。このうち、左右の肩口カメラの映像は保守対象物を取り扱う上で特に重要な視覚情報となる事から、万一、スレーブアームが暴走した場合においても破損させず、かつ、最適な映像を映し出せる位置とするために、従来より試行を重ねて配置位置が決定された。

しかしながら、左右のスレーブアーム中心間が0.65mに対して左右の肩口カメラ中心間は1.85mとなり、各アームより0.6mも左右に張り出す結果となった事から、B S Mのコンパクト型化が要求されるR E T Fへの適用が不可能なため、

(1) 万一、スレーブアームが暴走した場合においてもカメラを破損させない位置で左右に張り出しを最小限に抑える事。

(2) 従来の映像と違和感のない映像が映し出せる事。

を目的として、従来のカメラ位置とスレーブアーム指先を結んだ直線上に近い位置に、左右の肩口カメラ位置を変更した。

この結果、左右の肩口カメラ中心間は1.45mとなり、また、カメラと指先までの距離が近くなった事で若干映像が大写しにはなったものの、作業上の違和感はほとんどなかった。改造後の肩口カメラの配置位置を図2-17に示す。

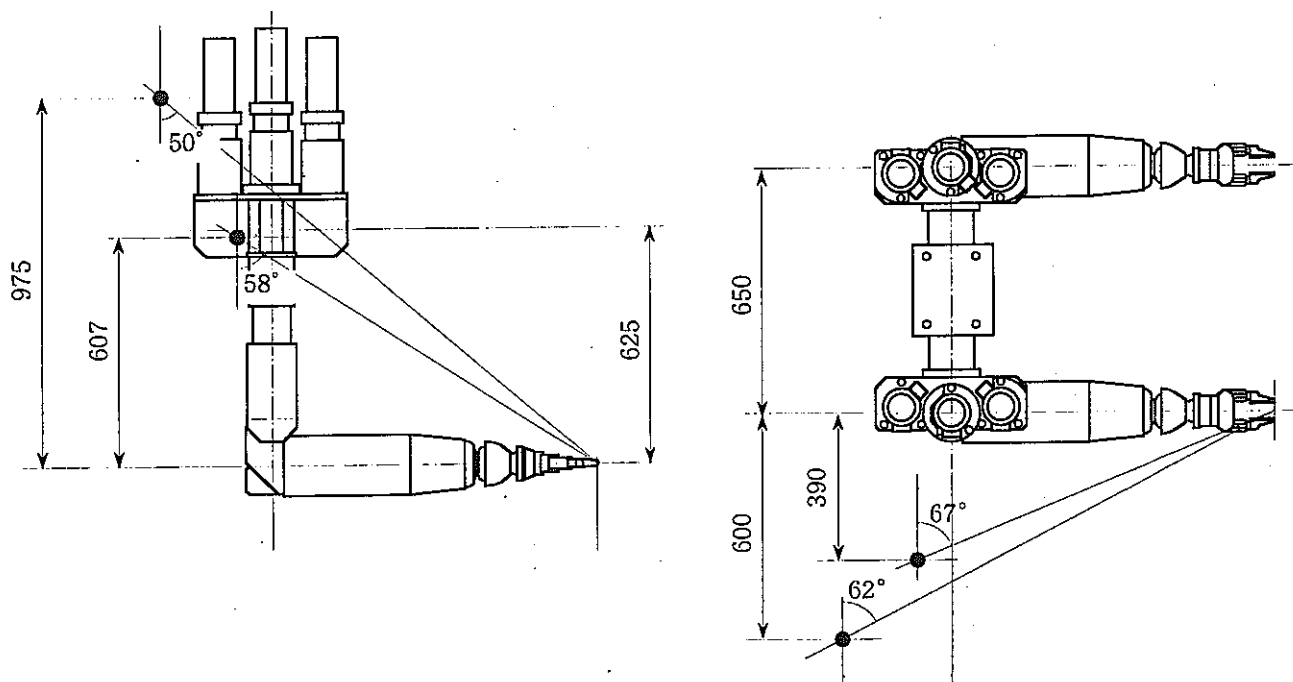


図2-17 改造後の肩口カメラの配置位置

2.6.3 光信号伝送システム

光信号伝送システムは耐ノイズ性が高く伝送帯域が広い事から、BSMシステムの信号伝送媒体に最も適している。また、問題とされていた光信号伝送装置の耐放射線性についても遮蔽を施す事で集積線量 $2.58 \times 10^4 \text{C/kg}$ ($1 \times 10^8 \text{R}$) まで正常に作動する事が確認できた。

しかしながら、本システムをホットセル内に配置するに際しては、

(1) 厳密な施工管理が必要となる。

- ① 当施設で発生した受光レベルの低下(減衰)は、据え付け工事において作業者が光コネクタに触れた事から、付着した油分が進行したものであり、作業時に適切な管理が行われていれば防止できた。(製作メーカーの見解)
- ② TVFでは、建屋工事とBSM据え付け作業を同時に行っていた事から、建屋内の高湿度により光コネクタ部に曇りが発生した。

(2) 異常箇所の同定が困難となる。

- ① 電氣的異常が発生した場合に伝送媒体が電線ケーブルであれば、その原因は断線もしくは短絡である事から、テスタ等を用いての事象判断を容易に行う事ができる。しかし、光ケーブルの場合は光コネクタ部の曇りによる受光レベルの低下が要因に加わるため、判断が困難となる。
- ② 電氣的異常が発生した場合に伝送媒体が電線ケーブル、もしくは光ケーブル単体であればケーブルテスタを用いて精度よく異常箇所の同定を行う事ができる。しかし、BSMシステムの場合はスレーブアーム等から制御盤までの制御・計測信号用を光ケーブル、それ以外は電線ケーブルとしている。

このため、異常が発生した場合は、出力側の電線ケーブルから電気ケーブルテスタによる診断を行い、異常がなければ受信機側から光ケーブルテスタによる診断を行う。もし、両方とも異常がなければ変換器の故障と判断する等、異常箇所の同定が複雑化する。

(3) 光信号伝送装置の寿命劣化に伴うメンテナンスコストの評価

(4) 屈曲に弱い光ファイバーケーブルの遠隔交換性

(5) 使用環境(温度条件: $-5^\circ\text{C} \sim +45^\circ\text{C}$)

その他を考慮しなければならない。

これらの事から、ホットセル内に配置する機器については、

- (1) 高信頼性 : 例え高性能化に繋がるものであったとしても、故障の原因となる要素の多い機器構成部品はセル外へ撤去する。

(2) 遠隔保守性：保守を容易化するための構造及び配置等が、施設の安定運転上重要であると判断し、RETF用BSMについては、

- ① 使用ケーブルの合理化（カメラ系信号の多重化）
- ② 使用ケーブルサイズの見直し
- ③ 給電方式の変更に伴うケーブルリールのコンパクト化

その他の改良を行う事で電線ケーブルでも可能である事を提案し、現在の機器設計に反映された。

3. 機械設計

3.1 マニプレータ形状

(1) エルボダウソ型マニプレータ

両腕型マニプレータ図を図3-1に示す。マニプレータで作業を行わせる場合、マニプレータのとる姿勢によってその作業性が大きく影響される。セルが小型で床面に機器が多く配置され、上方からマニプレータの腕をアクセスしていく場合は、図3-2に示すような肘部が上方にあるエルボアップ型マニプレータの作業性が良いとされている。

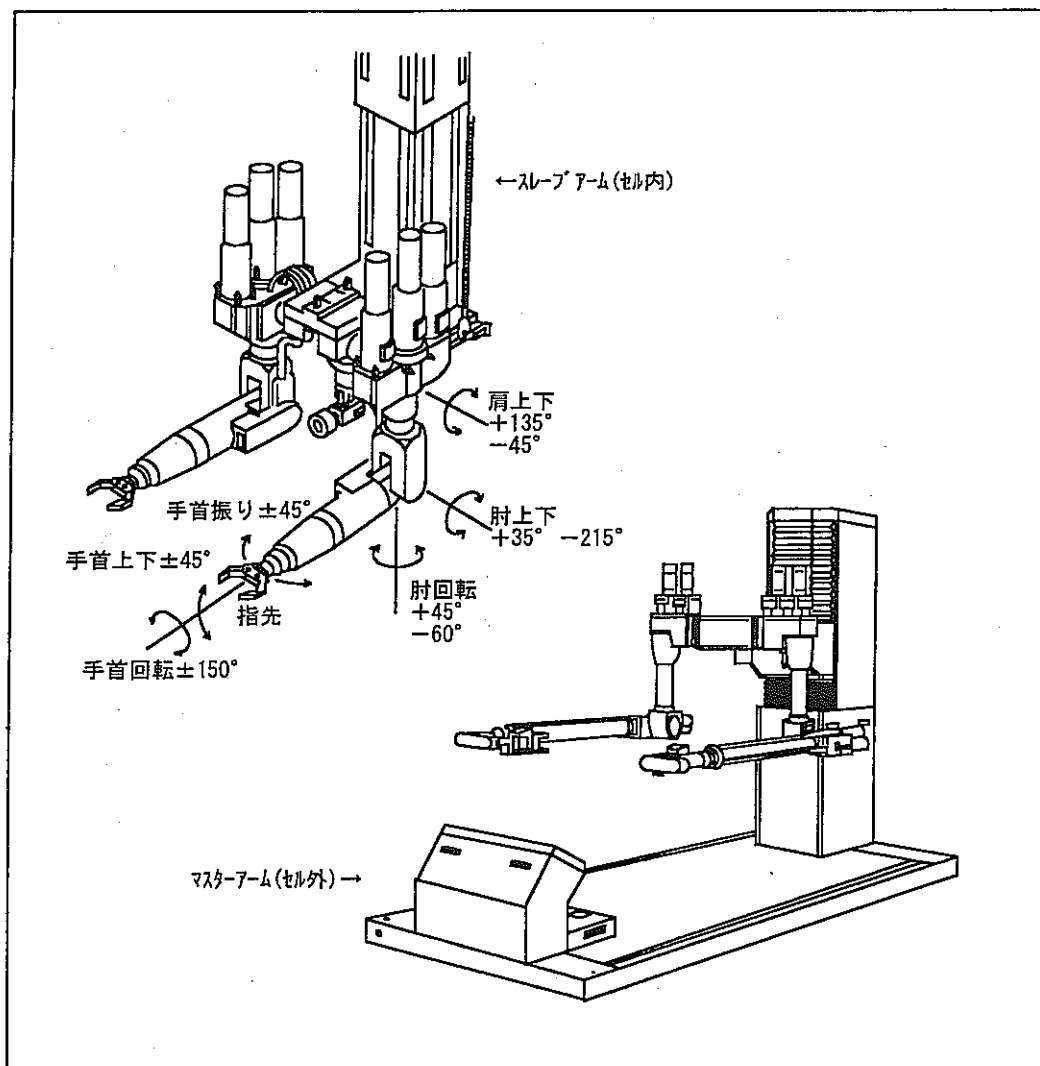


図3-1 両腕型マニプレータ

エルボアップ型の自由度配置

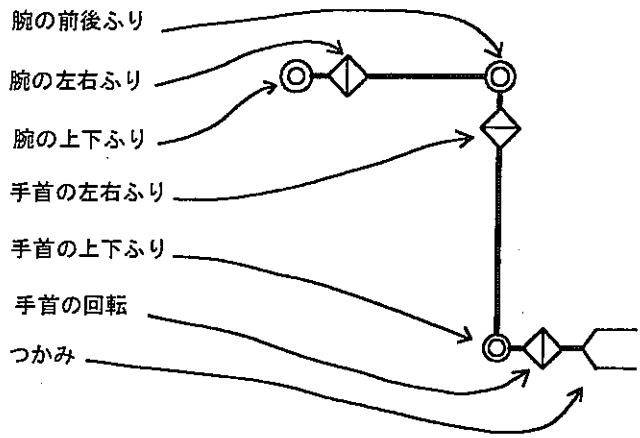


図 3-2 エルボアップ型マニプレータ

セルが大型化し、保守対象物がラックに収納され、ラック側面からマニプレータをアクセスさせる場合、図 3-3 に示すようなエルボダウン型のマニプレータが適していると考えられる。

エルボダウン型の自由度配置

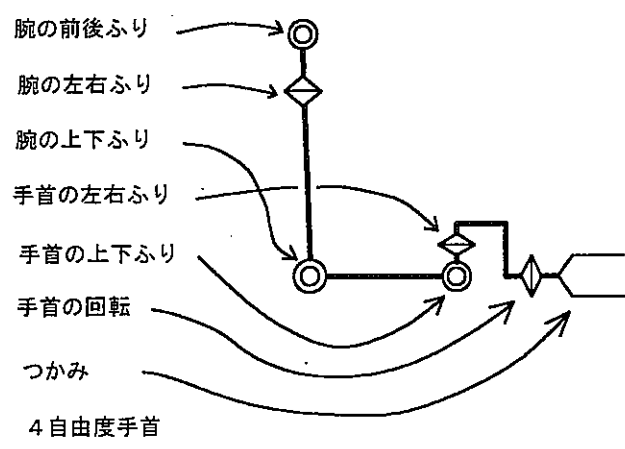
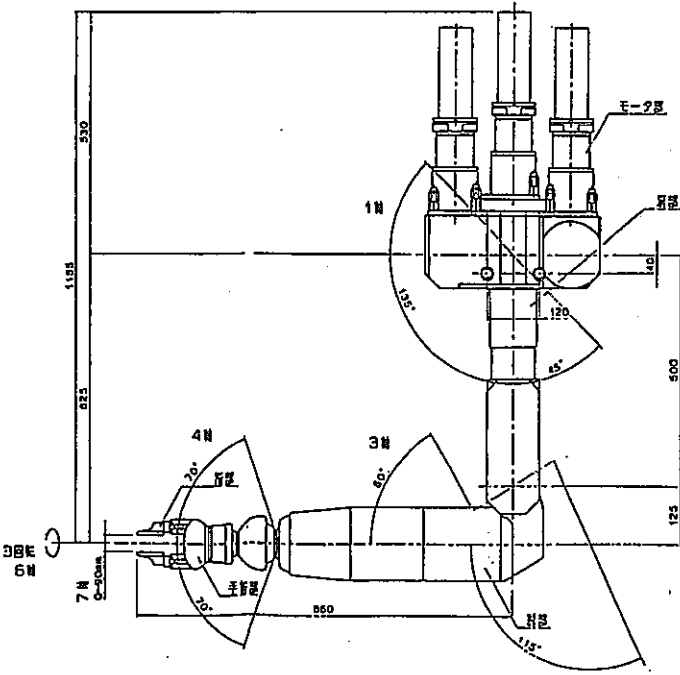
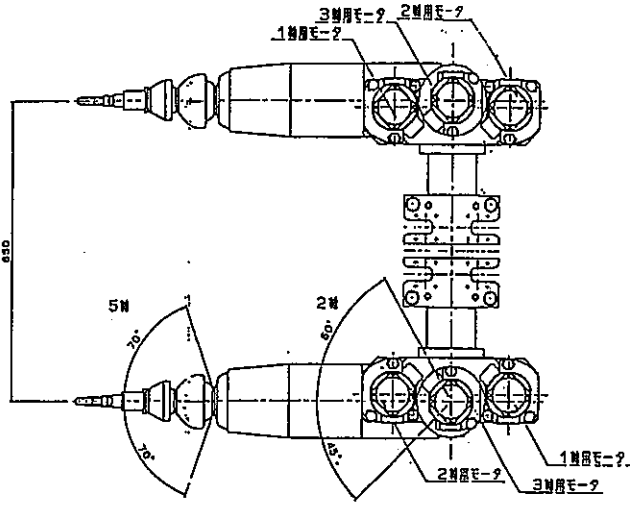


図 3-3 エルボダウン型マニプレータ

従って本マニピレータはエルボードウン型形状を採用し、人間が操作する事を考慮し、できるだけ人間の腕の形状および大きさに近づける設計を行った。図3-4にスレーブアームの外形および自由度の配置を示す。

使用モーター一覧表							
	1軸	2軸	3軸	4軸	5軸	6軸	7軸
型式	A730BT	←	←	A40BT	←	←	SV3D
メーカー	山洋	←	←	山洋	←	←	松下
出力(W)	300	←	←	60	←	←	30
電圧(V)	80	←	←	24	←	←	12
電流(A)	4.8	←	←	4.1	←	←	3.6
回転数(rpm)	2500	←	←	3000	←	←	4000
質量(kg-cm)	12.0	←	←	1.3	←	←	0.74

使用减速机一覧表							
	1軸	2軸	3軸	4軸	5軸	6軸	7軸
型式	←	←	←	←	←	←	←
メーカー	←	←	←	←	←	←	←
種類	行星形减速机	←	←	←	←	←	←



基本仕様			基本構成
軸番号	動作範囲	動作速度	
1 軸	+135°~-45°	40°/s	
2 軸	+45°~-60°	60°/s	
3 軸	+60°~-115°	60°/s	
4 軸	±70°	35°/s	
5 軸	±70°	35°/s	
6 軸	3回転	80°/s	
7 軸	0~90mm	15mm/s	

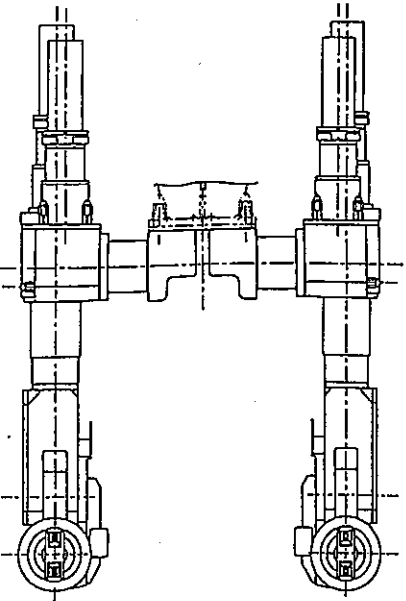


図3-4 スレーブアームの外形および自由度の配置

(2) 4自由度手首

器用な操作を行わせるのに重要な手首曲げ・手首部回転および握り、計4つの自由度の一点を中心とした偏心のない軸上で操作できる4自由度手首を開発し、採用した。

図3-5に示すとおり、4自由度手首は、二重椎造のユニバーサルジョイントを2段に連結させた構造をしている。外側のユニバーサルジョイントで手首の動作を行わせ、内側の機構で手先の握りの動力を伝えている。これにより、人間の手首の動作範囲に近い $\pm 70^\circ$ の動きを実現させた。

この方式は人間の手首の動きに非常に近い動作が得られるため、オペレータは違和感がなく、自由にスレーブアームを操作する事ができる。

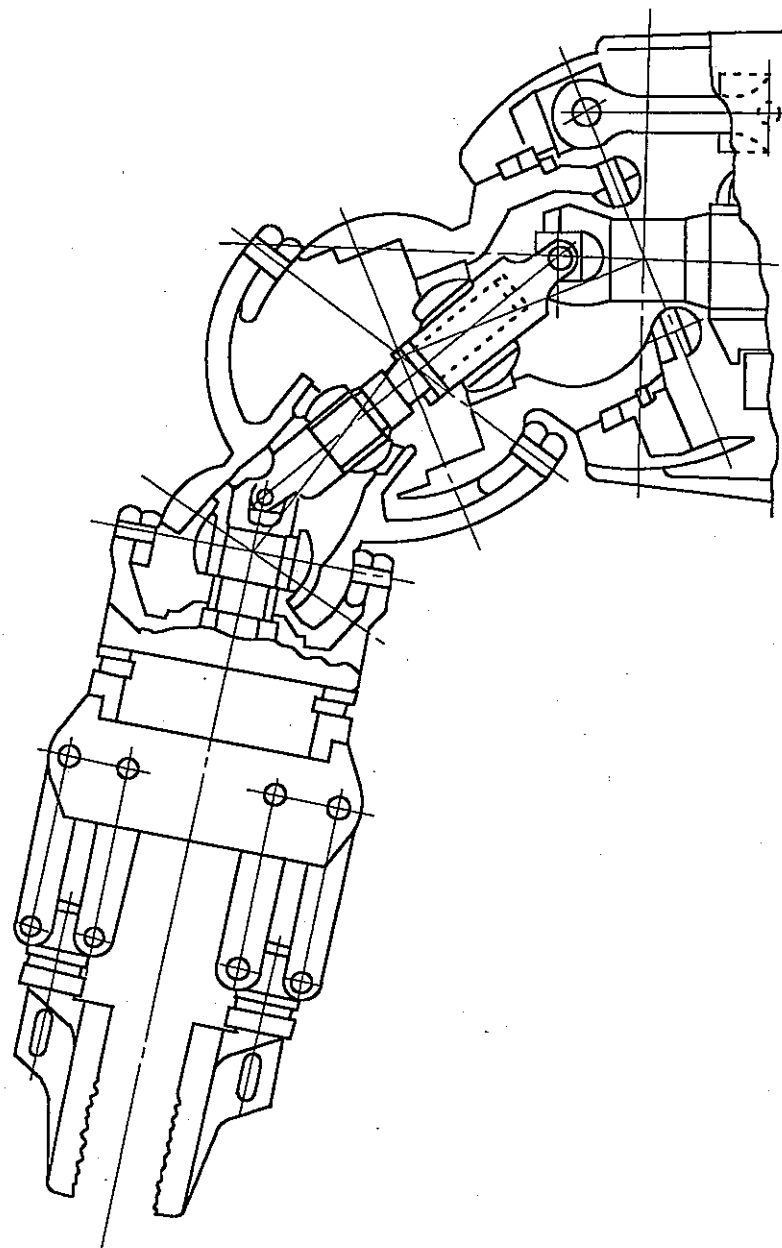


図3-5 4自由度手首構造

3.2 スレーブアームの駆動系

スレーブアームは上腕部（肩回転（1軸）・肘部回転（2軸）・肘部回転（3軸））3自由度と下腕部（手首曲げ（4軸）・手首曲げ（5軸）・手首回転（6軸）・指部開閉（7軸））4自由度に分けられる。

上腕部の1～3軸を駆動するモータは肩部に集中的に配置され、ハーモニック減速機・平歯車およびかさ歯車で減速され、各軸にトルクが伝達される。各軸は機械的干渉をなくするため、腕全体を回転させる1軸駆動系上に2軸が設置され、上腕の回転胴（2軸肘部回転）を回転させている。

さらに2軸駆動系上に3軸が設置され、3軸モータのトルクはトルクチューブによって肘関節まで伝達され、1軸および2軸との機械的干渉なしに3軸を独立に駆動できる構造をとっている（図3-6参照）。

それぞれのモータは保守を容易に行わせるため、モータの出力軸に遠隔着脱可能なカップリング部を有し、また、同一出力のモータを採用する事によって、予備品の共用化に対する配慮もされている。下腕部の4～7軸のモータは腕内部に4個配置され、それぞれ独立に制御されている。4軸モータおよび5軸モータは互いに直交して配置され、それぞれの出力軸には回転運動を直線運動に変換するボールネジが接続されている。これによる直線運動で、外部ユニバーサルジョイント（6軸・7軸を含む手首部）を直交して押し引きする事により、手首の上下・左右の曲げ運動を実現している。6軸は手首の回転運動を行わせる軸で、外側ユニバーサルジョイント（6軸・7軸を含む手首）部をモータで平歯車を介して直接回転させる事で実現している。7軸は指開閉の動作であり、7軸モータのトルクは内側にある2段のユニバーサルジョイントで手首最先端まで回転運動により伝達され、ウォームギヤを介して、指部の開閉運動を実施している。開閉動作は内側を駆動する2組の平行リンクで行われている。

また、電源を喪失した場合でも、機械的に握ったものを落とさないようウォームギヤを採用している。

6軸と7軸は同一軸系における回転運動が重複しているため、機械的干渉が生じる。このため6軸駆動系を駆動する事によって、アイドルギヤで7軸駆動系全休を連結する事により、機械的干渉を解決している（図3-7参照）。本スレーブアームは全ての軸で機械的に生じる干渉を抑えている。この事により、干渉によって生じる各軸モータの干渉補償回転をゼロとする事ができ、セル内に入るスレーブアームの信頼性向上を図る事が可能となった。センサーは各軸（1～6軸）の位置情報を検出するためのポテンシオメータおよび各軸（1～6軸）のモータから出力情報を検出するためのカセンサーを備えている。ポテンシオメータおよびカセンサーは、位置情報およびモータの出力情報値の検出が容易なハーモニック減速機後の駆動軸に接続している。

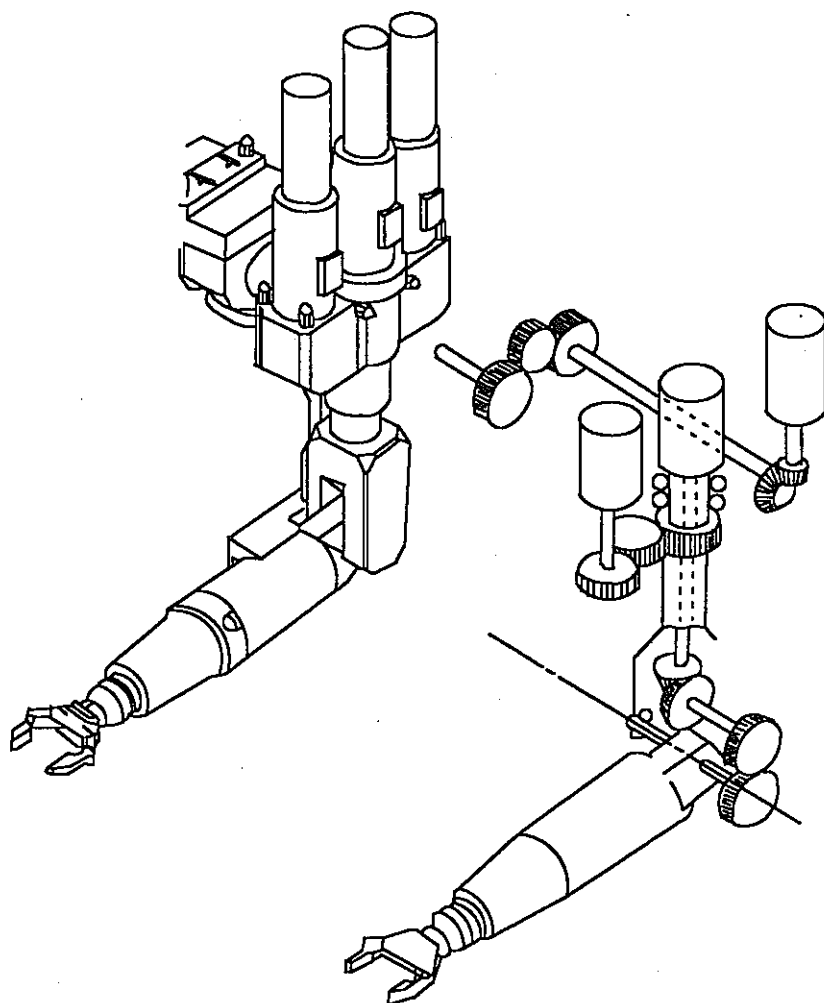


図3-6 肩部（1～3軸）の駆動系

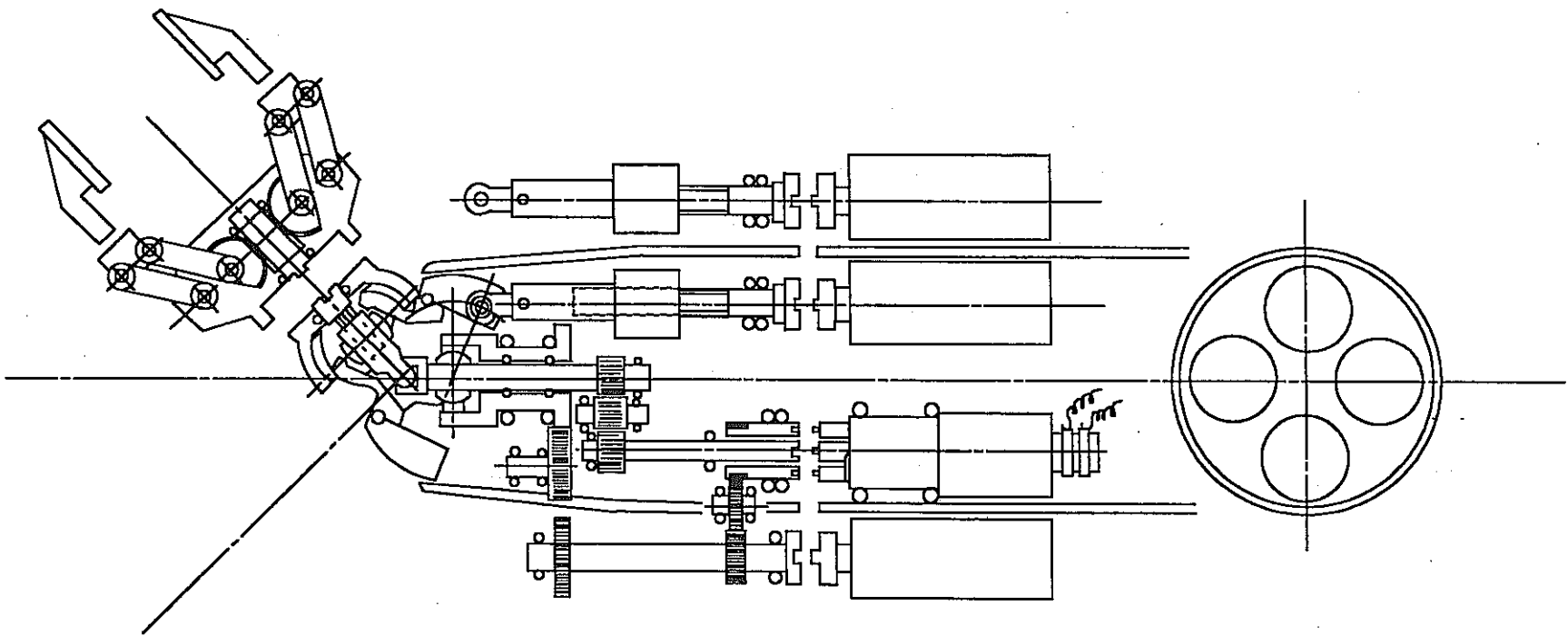


图 3-7 4、5、6、7 轴驱动系

3.3 スレーブアームの分割

厳しい環境下で使われるスレーブアームは、故障に対しても十分な対策が施されていないと
 ならない。本マニプレータはスレーブアームの一部が万が一故障した場合、健全なマニ
 プレータを使用して遠隔作業による簡単な作業で故障部分を切り放し交換する事ができるよ
 う11個の分割モジュールより構成している。分割モジュールは、他部品に比べて消耗頻度の
 高い駆動部(センサー含む)、ケーブル・コネクタ部および放射化されたと想定される物品を
 取り扱うハンド、指チップ部を基本として分割している。

各々の分割モジュールは遠隔ボルトと呼ばれる遠隔操作の容易な形状をした、ボルトで連
 結されており、インパクトレンチを使用して簡単に分割・組立ができる。図3-8に分割モ
 ジュールを示す。

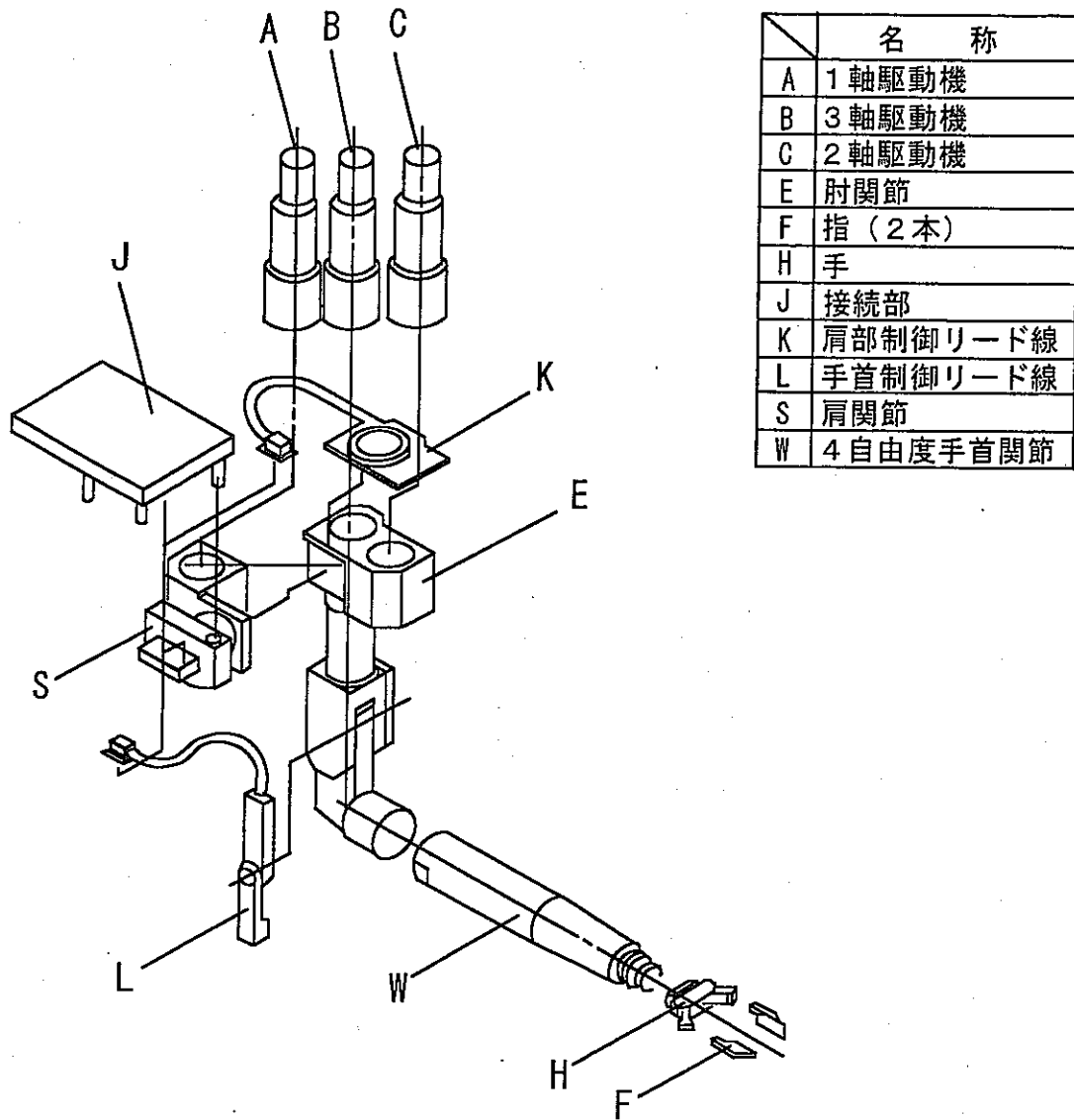


図3-8 スレーブアームの分割モジュール

3.4 スレーブアームの耐放射線性

スレーブが使用される環境は、通常人間が立ち入れない環境である。本マニプレータでは耐放射線下における作業を考慮し、スレーブアームに使用するサーボモータ・ポテンショメータ・力センサー、ケーブル、コネクタおよびセンサー（ポテンショメータ・力センサー）回路等など、部品の全てに、 γ 線による照射試験を実施し、集積線量が $2.58 \times 10^4 \text{C/kg}$ ($1 \times 10^8 \text{R}$)まで耐えられる耐放射線性部品を選定して使用している。

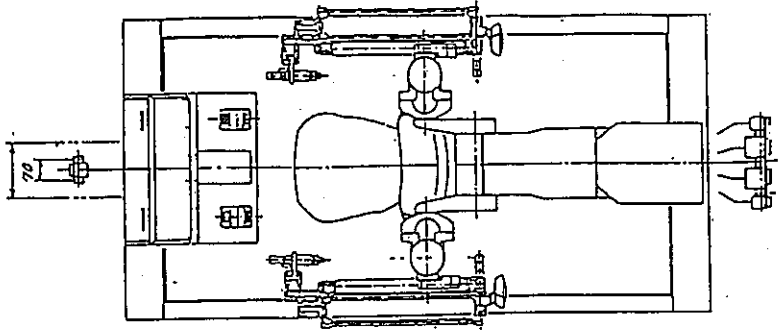
3.5 マスターアームの駆動系

マスターアームはスレーブアーム同様、上腕部（肩回転（1軸）・肘部回転（2軸）・肘部回転（3軸））・3自由度と下腕部（手首曲げ（4軸）・手首幽げ（5軸）・手首回転（6軸）・指部開閉（7軸））4自由度に分けられる。上腕部の1～3軸を駆動するモータは肩部に集中的に配置され、平歯車およびかさ歯車で減速され、各軸にトルクが伝達される。各軸は機械的干渉をなくすため、腕全体を回転させる1軸駆動系上に2軸が設置され、上腕の回転胴（2軸肘部回転）を回転させている。さらに2軸駆動系上に3軸が設置され、3軸モータのトルクはトルクチューブによって肘関節まで伝達され、1軸および2軸との機械的干渉なしに3軸を独立に駆動できる構造をとっている。図3-9にマスターアームの外形および基本仕様を示す。

マスターアームは人間が操作するため、軽く動かす事が重要であり、本マスターは1～3軸の各軸に機械式のバランサー（重り）を設けている。4軸のモータおよび5軸のモータは、肘部の後方に直交して配置されている。肘部を構成するメイン（先端6、7軸を支持）パイプと4軸または5軸のトルクを伝達するサブパイプ（各1本ずつ）を長辺として構成される平行リンクの片短辺（肘後方）の中心に駆動モータが設置されている。この4軸、5軸の駆動モータからサブパイプ、手先側の複合リンクを介してオペレータが握るグリップに手首の上下・左右の曲げトルクを伝達している。4、5軸は共通の機械式のバランサー（重り）を設計する事で、マスターアームの小型化を実現している。6軸の手首回転は、6軸モータの出力軸とグリップが直結されている。スレーブアームの6軸の手首回転・7軸の指開閉操作を行うため、マスターアームにオペレータが握るグリップを設けており、グリップ上にある2種類（6軸用、7軸用）の押しボタンスイッチを押す事により、6軸の手首回転・7軸の指開閉操作を行う。

また、グリップの側面には光電スイッチが設けられており、オペレータがグリップを握り光電スイッチへの光を遮断する事により、マスターアームが起動する構造としている。これは不意にオペレータがマスターアームを離れた場合、制御が直ちに停止し、スレーブアームの暴走を防ぐ役割になっている。センサーとしては、各軸（1～6軸）に位置情報を検出するためのポテンショメータを備えている。ポテンショメータは各軸モータの出力軸に直結ま

たは平歯車を介して接続されている。
 オペレータがマスターアームを軽く動かす（出力側からモータを逆駆動）ための一つとして、1～6軸（7軸はスイッチのみ）それぞれの減速比を1/50以下程度としている。



基本仕様		
軸番号	動作範囲	基本構成
1 軸	+90°～-45°	
2 軸	±40°	
3 軸	+60°～-40°	
4 軸	±45°	
5 軸	±45°	
6 軸	±90°（逆駆動）	
7 軸	押し印式	

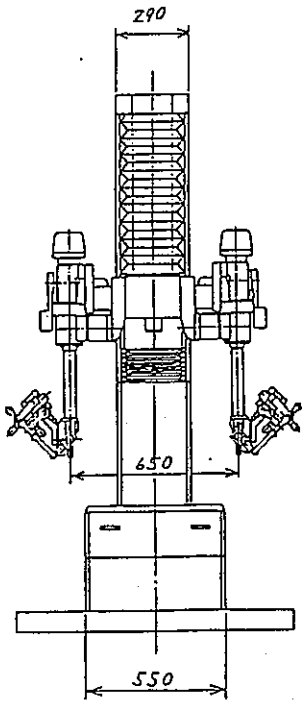
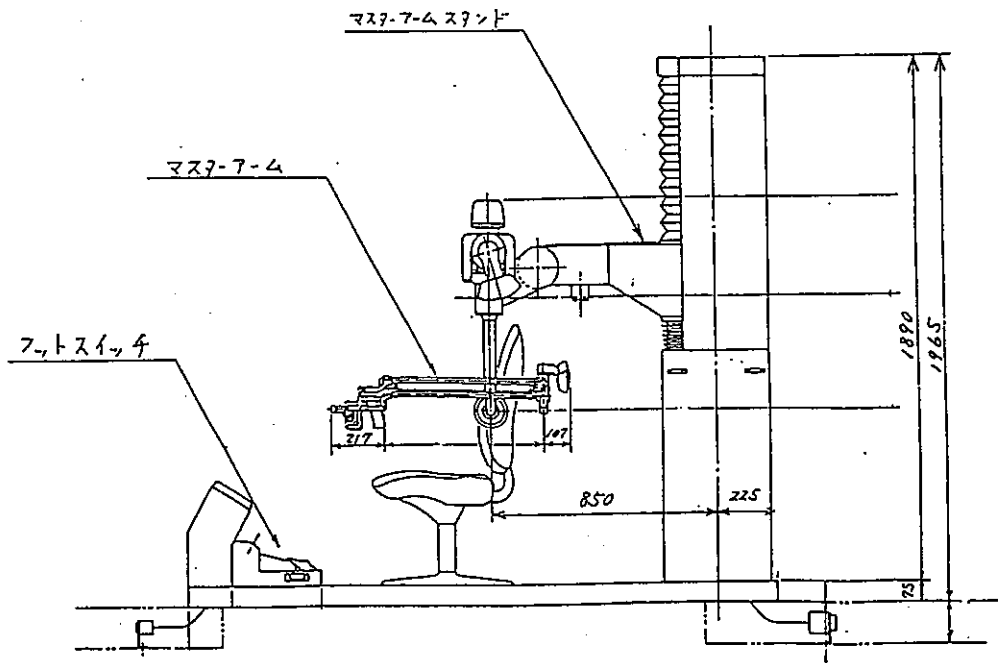


図3-9 マスターアームの外形および基本仕様

4. 制御設計

4. 1 バイラテラルサーボの基礎解析

4. 1. 1 解析手順

解析を次の手順で行なった。

- (1) バイラテラルサーボマニプレータに基本的に要求される事項をまとめ、基本要項を満足するか否かを判断する基準式を作る。
- (2) 次にバイラテラルサーボの基本回路を作り、それに判別基準を適用して特性を解析する。
- (3) 基本回路に、各種補償回路を加えて特性を向上させる。

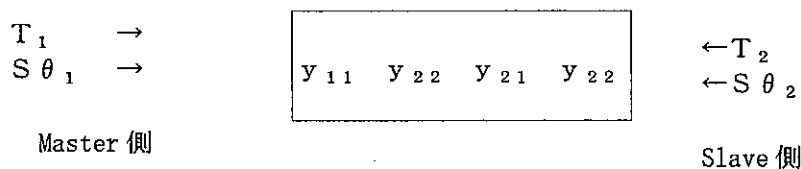
4. 1. 2 バイラテラルサーボの基本要件

バイラテラルサーボマニプレータの基本要件として次の3件を挙げた。

- (1) 操作性をよくするには、マニプレータに負荷が加わってない時、軽い力で操作できる事。
- (2) オペレータが取り扱う物体の大きさ、重さ、固さ等を正確に伝えるためには、負荷量を正確にフィードバックしてやる事。
 - 静的状態でシステムの剛性が高い事。
 - 定常的なトルクが入力トルクに釣り合うように発生する事。
- (3) 通常の運転状態でも制御上の安定を確保する事。

4. 1. 3 制御の判定基準

2端子回路での解析では、



なるモデルにおいて、

$$\begin{aligned}
 T_1(S) &= f_1(S) \theta_1(S) + f_2(S) \theta_2(S) \\
 T_2(S) &= g_1(S) \theta_1(S) + g_2(S) \theta_2(S) \\
 y_{11} &= f_1/S, \quad y_{22} = f_2/S, \quad y_{21} = g_1/S, \quad y_{12} = g_2/S
 \end{aligned}$$

なる関係式が成り立つ。

このとき、無負荷時の軽い操作性は、

$$(y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}) / y_{22} = Y_1 \text{の値を小さく抑える系}$$

である事で得られる。

正確な力フィードバックは、

$$\lim_{S \rightarrow 0} y_{11} / y_{21} = -1$$

である事で得られる。

安定性は

$$\begin{aligned} & (y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}) \text{の極} \\ & y_{22} = 0 \text{の時の値} \\ & y_{11} = 0 \text{の時の値} \\ & (y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}) = 0 \text{の時の値} \end{aligned}$$

をとる事で得られる。

4.1.4 バイラテラルサーボの解析

4.1.4.1 基本型の解析

力制御の2つの基本形ブロック図を図4-1に示す。

(1) 基本P-P型 (Position-Position型)

① 無負荷時の軽い操作性

J_m : モータロータ慣性力、 K_a : アンブゲイン
 K_m : 1V当たりのモータ抵抗トルク、 K_b : トルク-回転数カーブ傾き

のとき、

$$Y_1 = 2 [J_m(j\omega) + K_b]$$

より、非常に低周波挙動つまり静かなマニプレータ操作時には操作員は入力側に存在する摩擦力と慣性力の2倍の反力を感じる事を示している。

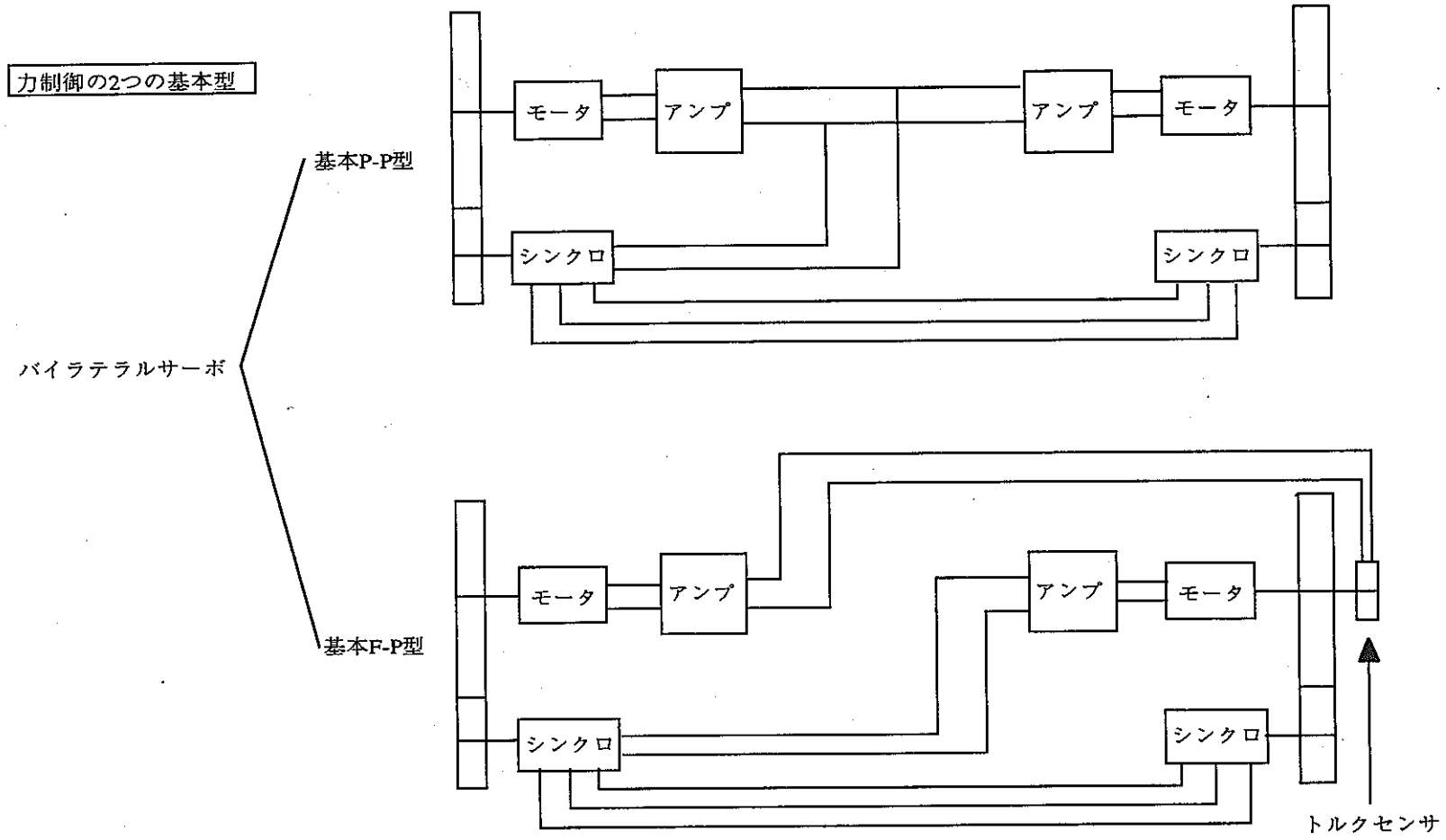


図4-1 力制御の2つの基本型ブロック図

② 正確な力フィードバック

$$\lim_{S \rightarrow 0} y_{11} / y_{21} = -1$$

$$\lim_{S \rightarrow 0} S y_{11} = K_a K_m \text{ (剛性)}$$

本システムでは上記2式が成立する。従って静止状態の力伝達は、自動的に満足する事を示している。また、アンプのゲインを大きくする事によって大きな剛性が得られる事を示している。

③ 安定性

y_{11} 及び y_{12} の0値を与える S_1 、 S_2 は

$$S_1, S_2 \text{ は } -K_b / 2 J_a \pm [K_b^2 / 4 J_m^2 - K_a K_m / J_m]$$

ダンピング係数 ξ は

$$\xi = K_b / [2 (K_a K_m J_m)^{1/2}]$$

Δ の0値を与えるのは

$$(J_m S + K_b) (J_m S + K_b + 2 K_a K_m) = 0 \text{ の根}$$

$$\xi = K_b / [2 (J_m K_a K_b)^{1/2}]$$

従って、 J_m を小さくしていくと安定性が増し、逆に K_b を小さくしていくと安定度が落ちてくる。

(2) 基本F-P型 (Forth-Position型)

① 無負荷時の軽い操作性

$$Y_1 = J_m s + K_b$$

無負荷時にオペレータがマスター側の慣性力と摩擦力を感じる事を示している。従って、操作感を向上させるためには、マスターアームの摩擦力と慣性力を減少させる必要がある。

② 正確な力フィードバック

$$\lim_{S \rightarrow 0} S y_{11} = K_t K_a^2 K_m^2 \quad (K_t = 1 / K_a K_m)$$

$$\lim_{S \rightarrow 0} y_{11} / y_{12} = -K_t K_a K_m = -1$$

K_t = トルク変換器のゲイン

本システムの剛性は基本P-P型の剛性と同じであり、かつ力のはねかえりも正しい事がわかる。

③ 安定性

$$\Delta = [J_m S + K_b + (K_m K_a / S)] (J_m S + K_b)$$

$$y_{22} = J_m S + K_b + K_m K_a / S$$

$$y_{11} = J_m S + K_b + K_t K_a^2 K_m^2 / S$$

$K_t = J / K_a K_m$ のとき、 y_{11} 、 y_{22} 、 Δ は上記システムの y_{11} 、 y_{22} の0値と同じ0値をとる事がわかる。従って、摩擦を減らせば剛性が上がり、良い操作感覚が得られる代わりに安定性が損なわれてくる事を示している。

(3) 基本P-P型、F-P型解析結果

この2つのシステムは共に操作感覚を良くするために摩擦力を減少させるか、剛性を上げるかすると制御安定性が悪くなる方向へ移動する事がわかる。

従って、

①基本P-P型に速度フィードバックを付加

②基本F-P型に速度フィードバックを付加

する事によって操作感覚を損なわずに系を安定させる。以上の結果を表4-1に示す。

表 4-1 2つの基本形の解析

	無負荷時の軽さ	正確な力フィードバック	安定性
基本 P-P 型	$Y_1(j\omega) = 2[Jm(j\omega) + Kb]$ <p>この式より、非常に低周波挙動、つまり静かなマニプレータ操作時には操作員は入力側に存在する摩擦力と慣性力の 2 倍の反力を感じる事を示している。 本システムで良好な低周波操作性を得るには、マニプレータの構造体の慣性力と摩擦力をできるだけ小さくするように設計しなければならない事を示している。</p>	$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{y_{11}}{y_{12}} = -1, \lim_{s \rightarrow 0} S y_{11} = KaKm \text{ (剛性)}$ <p>本システムでは上記 2 式が成立する。従って静止状態の力伝達は、自動的に満足される事を示している。また、アンプのゲインを大きくする事によって大きな剛性が得られる事を示している。</p>	<ul style="list-style-type: none"> • y_{11} 及び y_{12} の 0 値を与える S_1, S_2 は $S_1, S_2 = -\frac{Kb}{2Ja} \pm \left[\frac{Kb^2}{4Jm^2} - \frac{KaKm}{Jm} \right]$ • ダンピング係数は $\xi = \frac{Kb}{2(KaKmJm)^{1/2}}$ • Δ の 0 値を与えるのは $(JmS + Kb)(JmS + Kb + 2KaKm) = 0 \text{ の根}$ $\xi = \frac{Kb}{2(2JmKaKb)^{1/2}}$ <p>従って Jm を小さくしていくと安定度が増し、逆に Kb を小さくしていくと安定度が落ちてくる。</p>
基本 F-P 型	$Y_1 = JmS + Kb$ <p>無負荷時にマスタ-側の慣性力と摩擦力を操作員は感じる事を示している。従って操作感を向上させるには、マスターアームの摩擦力と慣性力を減少させる必要がある。</p>	$\lim_{s \rightarrow 0} S y_{11} = KtKa^2Km^2 \left(Kt = \frac{1}{KaKm} \right)$ $\lim_{s \rightarrow 0} \frac{y_{11}}{y_{12}} = -KtKaKm = -1$ <p>本システムの剛性は上記のシステム (P-P) の剛性と同じであり、かつ力のはねかえりも正しい事がわかる。 Kt : トルク変換器のゲイン</p>	$\Delta = [JmS + Kb + (KmKa/S)](JmS + Kb)$ $y_{22} = JmS + Kb + KmKa/S$ $y_{11} = JmS + Kb + \frac{KtKa^2Km^2}{S}$ <p>$Kt = \frac{J}{KaKm}$ の時、y_{11}, y_{12}, Δ は上記システムの y_{11}, y_{12} の 0 値と同じ 0 値をとることがわかる。従って摩擦を減らせば剛性が上がり良い操作感覚が得られるかわりに安定性が損なわれてくる事を示している。</p>

4.1.4.2 基本型+速度フィードバック解析

(1) 基本P-P型+速度フィードバック

① 無付加時の軽さ

$$Y_1 = 2 (J_m S + K_b)$$

速度フィードバックを加えても、無付加状態のアドミタンスは変化しない事がわかる。従って、本システムでは、マスター、スレーブ方向の慣性力と摩擦力を小さく設計しなければならない。

② 正確な力フィードバック

$$\lim_{S \rightarrow 0} y_{11} / y_{21} = -1$$

$$\lim_{S \rightarrow 0} S y_{11} = K_a K_m \text{ (刚性)}$$

速度フィードバックを加えても、基本P-P型と同様に正確な力フィードバックが得られる事がわかる。

③ 安定性

$$\Delta = (J_m S + K_b) [J_m S + K_b + 2 K_a K_m K_v + 2 K_a K_m / S]$$

$$y_{22} = J_m S + K_b + K_m K_a K_v + K_a K_m / S$$

$$y_{11} = J_m S + K_b + 2 K_a K_m K_v + K_a K_m / S$$

$$y_{11}, y_{22} = 0, \xi = [K_b + 2 (K_a K_m K_v)] / 2 (J_m K_a K_b)^{1/2}$$

$$\Delta = 0, \xi = [K_b + 2 (K_a K_m K_v)] / 2 (J_m K_a K_b)^{1/2}$$

つまり、 K_v を大きくする事で安定性を直接的に改善できる事がわかる。

(2) 基本P-P型+速度フィードバック

① 無付加時の軽さ

$$Y_1 = J_m S + K_b + (J_m S + K_b) (K_a K_m K_v) / [J_m S + K_b + K_a K_m K_v + (K_a K_m / S)]$$

$$K_a K_m K_v \text{が小さいとき、} Y_1 = J_m S + K_b$$

しかし、 $K_a K_m K_v$ は一般的に大きく、そのときは $Y_1 = 2 (J_m S + K_b)$ となる。

この事から、オペレータはマスターアームの慣性と摩擦力のみならず、スレーブアームの慣性と摩擦力をも感じる結果になる。

② 正確な力フィードバック

$$\lim_{S \rightarrow 0} S y_{11} = K_a^2 K_m^2 K_t$$

$$\lim_{S \rightarrow 0} y_{11} / y_{12} = -K_t K_a K_m$$

ところで、 $K_t = 1 / K_a K_m$ とすると

$$\text{剛性} \quad \lim_{S \rightarrow 0} S y_{11} = K_a K_m$$

また、 $\lim_{S \rightarrow 0} y_{11} / y_{12} = -1$ となり、

静的な力の跳ね返りには、速度フィードバックを加えても悪影響はでない事がわかる。

③ 安定性

$$\Delta = (J_m S + K_b) [J_m S + K_b + 2 K_a K_m K_v + 2 K_a K_m / S]$$

$$y_{22} = J_m S + K_b + K_m K_a K_v + K_a K_m / S$$

$$y_{11} = J_m S + K_b + 2 K_a K_m K_v + K_a K_m / S$$

y_{22} が0値をとる時のダンピング係数 ξ は、

$$\xi = [K_b + 2 (K_a K_m K_v)] / 2 (J_m K_a K_b)^{1/2}$$

である。

また、 $y_{11}=0$ の時と $\Delta=0$ の時の ξ も $y_{22}=0$ と同じ値になる。従って、 K_v を大きくする事によって、ダンピングは直接的に改善されていく事を示している。

(3) 基本P-P型、F-P型+速度フィードバック解析結果

速度フィードバックを加える事で、基本P-P型、及びF-P型 共に操作感の悪化を招く事なく安定性を向上させる事が出来る。

操作感を支配するのは、十分な剛性をもつ事、軽く操作できる事の2つである。これまでの検討で剛性に関しては、アンプゲイン K_a を大きくとる事で改善でき、しかも安定性に与える悪影響は速度フィードバックをかける事で改善できる事がわかった。

以下では摩擦力と慣性力を減少させる事で、軽く操作するための検討に触れる。その方法としては、

①速度・加速度の正帰還を加える事で改善する方法

②トルクフィードバックを加える事で改善する方法

を取り上げるが、これらは個々に適用すると2つの方法とも安定性を損なう限界までまず摩擦力、慣性力を減らしてから次に安定性を再調整し直すという方法をとる必要がある。以上の結果を表4-2に示す。

表 4-2 速度フィードバックを加えて安定性を増す

	無負荷時の軽さ	正確な力フィードバック	安定性
基本 P-P 型 + 速度フィードバック	$Y_1 = 2(JmS + Kb)$ <p>速度フィードバックを加えても、無負荷状態のアドミタンスは変化しない事がわかる。 従って本システムでは、マスター、スレーブ方向の慣性力と摩擦力を小さく設計しなければならない。</p>	$\lim_{s \rightarrow 0} Sy_{11} = KaKm \lim_{s \rightarrow 0} y_{11}/y_{12} = -1$ <p>速度フィードバックを加えても、基本 P-P と同様に正確な力フィードバックが得られる事がわかる。</p>	$\Delta = (JmS + Kb) \left[JmS + Kb + 2KaKmKv + \frac{2KaKm}{S} \right]$ $y_{22} = JmS + Kb + KaKmKv + \frac{KaKm}{S}$ $y_{11} = JmS + Kb + 2KaKmKv + \frac{KaKm}{S}$ $y_{22}, y_{11} = 0, \xi = \frac{Kb + 2KaKmKv}{2(JmKaKm)^{1/2}}$ $\Delta = 0, \xi = \frac{Kb + 2KaKmKv}{2(JmKaKm)^{1/2}}$ <p>つまり Kv を大きくする事で安定性を直接的に改善できることがわかる。</p>
基本 F-P 型 + 速度フィードバック	$Y_1 = \frac{JmS + Kb + (JmS + Kb)(KaKmKv)}{JmS + Kb + KaKmKv + (KaKm/S)}$ <p>$KaKmKv$ が小さいとき $Y_1 = JmS + Kb$</p> <p>しかし $KaKmKv$ は一般には大きくその時は $Y_1 = 2(JmS + Kb)$ となる。 この事から、操作者はマスターアームの慣性と摩擦力のみならず、スレーブアームの慣性と摩擦力をも感じる結果になる。</p>	<p>剛性 $\lim_{s \rightarrow 0} Sy_{11} = Ka^2 Km^2 Kt$</p> $\lim_{s \rightarrow 0} \frac{y_{11}}{y_{12}} = -KaKmKt$ <p>ところで $Kt = \frac{1}{KaKm}$ とすると</p> <p>剛性 $\lim_{s \rightarrow 0} Sy_{11} = KaKm$ また</p> $\lim_{s \rightarrow 0} \frac{y_{11}}{y_{21}} = -1$ <p>静的な力の跳ね返りには、速度フィードバックを加えても悪影響は出ない事がわかる。</p>	$\Delta = (JmS + Kb) \left[JmS + Kb + 2KaKmKv + \frac{2KaKm}{S} \right]$ $y_{22} = JmS + Kb + KaKmKv + \frac{KaKm}{S}$ $y_{11} = JmS + Kb + 2KaKmKv + \frac{KaKm}{S}$ <p>y_{22} が 0 値をとる時のダンピング係数 ξ は</p> $\xi = \frac{Kb + KaKmKv}{2(JmKaKm)^{1/2}}$ <p>また、$y_{11} = 0$ の時と $\Delta = 0$ の時の ξ も $y_{22} = 0$ と同じ値になる。従って Kv を大きくする事によって、ダンピングは直線的に改善されていく事を示している。</p>

4.1.4.3 基本型+速度・加速度の正帰還解析

(1) 基本P-P型+速度・加速度の正帰還

① 無付加時の軽さ

$$Y_1 = 2 (J_m + K_a K_m K_\alpha) + 2 (K_b - K_a K_m K_v) = 2 (J_m' S + K_b')$$

この値は、非常に小さくなるように調整する事が可能である。これは、軽く操作できる様に調整できる事を示している。

② 正確な力フィードバック

$$\lim_{S \rightarrow 0} y_{11} / y_{21} = -1$$

$$\lim_{S \rightarrow 0} S y_{11} = K_a K_m \text{ (剛性)}$$

この式より、速度・加速度の正帰還を加えても静的な力フィードバックの正しさには影響を及ぼさない事がわかる。

③ 安定性

$$\Delta = (J_s' + K_b') [J_s' + K_b' + 2 K_a K_m / S]$$

$$y_{11} = J_s' + K_b' + K_a K_m / S$$

$$y_{22} = J_s' + K_b' + K_a K_m / S$$

$$J' = J_m' - K_a K_m K_\alpha$$

$$K_b' = K_b - K_a K_m K_v$$

0値を与えるダンピング係数 ξ は

$$\Delta = 0, \xi = K_b' / 2 (2 J' K_a K_m)^{1/2}$$

$$y_{11}, y_{22} = 0, \xi = K_b' / 2 (2J' K_a K_m)^{1/2}$$

速度と加速度の正帰還は、みかけの慣性力と摩擦力を減らす事ができ、無負荷時の操作感を向上させる事ができるが、安定性に関しては良い結果が得られない。

慣性力の減少は望ましい結果を与えるが、摩擦力の減少にかんしては良い結果が得られない。

(2) 基本F-P型+速度・加速度の正帰還

① 無付加時の軽さ

$$Y_1 = J_m' S + K_b'$$

基本P-P型+速度・加速度の正帰還と同様にみかけの慣性力 J_m' 、摩擦力 K_b' は、本来の J_m 、 K_b より小さくなり無負荷時の操作力が軽くなる事がわかる。

② 正確な力フィードバック

$$\lim_{S \rightarrow 0} y_{11} / y_{21} = -1$$

$$\lim_{S \rightarrow 0} S y_{11} = K_a K_m \text{ (剛性)}$$

この式より、速度・加速度の正帰還を加えても静的な力フィードバックの正しさには影響を及ぼさない事がわかる。

③ 安定性

$$\Delta = (J_s' + K_b' + K_a K_m / S) (J_s' + K_b')$$

$$y_{11} = y_{22} = J_s' + K_b' + K_a K_m / S$$

基本P-P型+速度・加速度の正帰還と同様に安定性が悪くなる。

以上の結果を表4-3に示す。

表 4-3 速度・加速度の正帰還による操作時軽さを改善した回路

	無負荷時の軽さ	正確な力フィードバック	安定性
基本 P-P + 速度・加速度の 正帰還	$Y_1 = 2(Jm - KaKmK\alpha)$ $+ 2(Kb - KaKmKv) = 2(Jm'S + Kb')$ <p>この値は、非常に小さくなるように調整する事が可能である。 言い換えると、軽く操作する事ができるように調整する事ができる事を示している。</p> $J'm = Jm - KaKmK\alpha$ $Kb' = Kb - KaKmKv$	$\lim_{s \rightarrow 0} S y_{11} = KaKm$ $\lim_{s \rightarrow 0} y_{11}/y_{12} = -1$ <p>この式より速度・加速度の正帰還を加えても静的な力フィードバックの正しさには影響を及ぼさない事がわかる。</p>	$\Delta = (J'S + K'b) \left[J'S + K'b + \frac{2KaKm}{S} \right]$ $y_{11} = J'S + K'b + \frac{KaKm}{S}$ $y_{22} = J'S + K'b + \frac{KaKm}{S}$ $J' = Jm - KaKmK\alpha$ $Kb' = Kb - KaKmKv$ $\Delta = 0 \quad \xi = \frac{Kb'}{2(J'KaKm)^{1/2}}$ $y_{11} y_{22} = 0 \quad \xi = \frac{Kb'}{2(J'KaKm)^{1/2}}$ <p>速度と加速度の正帰還は、みかけの慣性力と摩擦力を減らす事ができ、無負荷時の操作感を向上させる事ができるが、安定性に関しては、良い結果を与えない。 慣性力の減少は、望ましい結果を与えるが、摩擦力の減少は良い結果を与えない。</p>
基本 F-P + 速度・加速度の 正帰還	$Y_1 = J'mS + K'b$ <p>上と同様にみかけの慣性力 $J'm$、摩擦力 $K'b$ は本来の Jm、Kb より小さくなり、無負荷時の操作力が軽くなる事がわかる。</p>	$\lim_{s \rightarrow 0} S y_{11} = KaKm$ $\lim_{s \rightarrow 0} \frac{y_{11}}{y_{21}} = -1$ <p>この式より速度・加速度の正帰還を加えても静的な力フィードバックの正しさには影響を及ぼさない事がわかる。</p>	$\Delta = \left[J'S + Kb' + \frac{KaKm}{S} \right] (J'S + K'b)$ $y_{22} = y_{11} = J'S + K'b + \frac{KaKm}{S}$ <p>上と同じ式より安定性がなくなる。</p>

4.1.4.4 基本型+トルクフィードバックの解析

(1) 基本P-P型+トルクフィードバック

① 無付加時の軽さ

$$Y_1 = 2 (J_m S + K_b) / (1 + K_t K_a K_m)$$

この式から、 Y_1 の値は、トルクフィードバックがない時の値、 $2 (J_m S + K_b)$ に対して、 $1 / (1 + K_t K_a K_m)$ 倍に小さくなっている事がわかる。

従って、トルクフィードバックを加える事によって、ほとんど抵抗なく軽く動くようになる事がわかる。

② 正確な力フィードバック

$$\lim_{S \rightarrow 0} s y_{11} = K_a K_m / (1 + K_t K_a K_m)$$

$$\lim_{S \rightarrow 0} y_{11} / y_{21} = -1$$

この式から、力のフィードバックについては正確である事がわかるが、剛性に関しては基本P-P型の回路に対して、 $1 / (1 + K_t K_a K_m)$ 倍に小さくなっている事がわかる。

従って、アンプのゲイン K_a とトルク変換器のゲイン K_t は、入力アドミタンスを下げるための

$$1 / (1 + K_t K_a K_m)$$

の決定と、剛性の調整のための

$$K_a K_m / (1 + K_t K_a K_m)$$

の決定を共に調整する必要がある。

③ 安定性

剛性を固定した場合、トルクフィードバックをする事によってダンピング ξ は基本P-P型の回路に対して $(1 + K_t K_a K_m)^{1/2}$ の係数倍に下げてしまう。

従って、このシステムを再び安定化するためには、速度フィードバックを加える必要がある。

(2) 基本F-P型+トルクフィードバック

① 無付加時の軽さ

$$Y_1 = (J_m S + K_b) / (1 + K_t K_a K_m)$$

この式から、 Y_1 の値は、基本P-P型+トルクフィードバックの場合と同様に、トルクフィードバックがない時の値に対して、 $1 / (1 + K_t K_a K_m)$ 倍に小さくなっている事がわかる。従って、トルクフィードバックを加える事によって、ほとんど抵抗なく軽く動くようになる事がわかる。

② 正確な力フィードバック

$$\lim_{S \rightarrow 0} s y_{11} = K_a K_m / (1 + K_t K_a K_m)$$

$$\lim_{S \rightarrow 0} y_{11} / y_{21} = -K_t K_a K_m / (1 + K_t K_a K_m)$$

この式から、力の正しい跳ね返りを得るには、 $K_t K_a K_m$ は1に対して非常に大きな値をとらなければならない事を示している。

$K_t K_a K_m \gg 1$ の時

$$\lim_{S \rightarrow 0} s y_{11} = K_a K_m$$

$$\lim_{S \rightarrow 0} y_{11} / y_{21} = -1$$

となり、このシステムの剛性はトルクフィードバックのない系に対して変化せず、力の跳ね返りも正しい値をとる事がわかる。

③ 安定性

$$\Delta = (J_m S + K_b + K_a K_m / S) (J_m S + K_b) / (1 + K_t K_a K_m)$$

$$y_{22} = J_m S + K_b + K_a K_m / S$$

$$y_{11} = J_m S + K_b + K_t K_a^2 K_m^2 / (1 + K_t K_a K_m)$$

ダンピング係数 ξ は

$$\Delta = 0 \quad \xi = K_b / 2 (J_m K_a K_t)^{1/2}$$

$$y_{22} = 0 \quad \xi = K_b / 2 (J_m K_a K_m)^{1/2}$$

$$y_{11} = 0 \quad \xi = K_b / 2 (J_m K_t)^{1/2}$$

剛性を保持するために $K_t K_a K_m \gg 1$ とし、安定性を確保するためには、速度フィードバックを加える必要がある。以上の結果を表4-4に示す。

また、本項の解析結果を表4-5に示す。

表 4-4 トルクフィードバックを加えて操作時軽さを改善した回路

	無負荷時の軽さ	正確な力フィードバック	安定性
<p>基本 P-P + トルクフィードバック</p>	$Y_1 = \frac{2(JmS + Kb)}{1 + KtKaKm}$ <p>この式から、Y_1の値は、トルクフィードバックがない時の値 $2(JmS + Kb)$ に比べて $\frac{1}{1 + KtKaKm}$ だけ小さくなっている事がわかる。従ってトルクフィードバックを加える事によって、軽く動くようになる事がわかる。</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>ほとんど抵抗なく動かせるようになる。</p>	$\lim_{s \rightarrow 0} sy_{11} = \frac{KaKm}{1 + KtKaKm} \quad \lim_{s \rightarrow 0} \frac{y_{11}}{y_{21}} = -1$ <p>この式から、力のフィードバックについては正確である事がわかるが、剛性に関しては、基本 P-P の回路の時に比べて $\frac{1}{1 + KtKaKm}$ だけ減少する事がわかる。</p> <p>従ってアンプのゲイン Ka とトルク変換器のゲイン Kt は入力アドミタンスを下げる為の $(1 + KtKaKm)$ の決定と剛性の調整のための $KaKm/(1 + KyKaKm)$ の決定を共に調整するように調整しなければならない。</p>	<p>ダンピングは剛性を固定した場合トルクフィードバックをする事によって下げられてしまう。(基本 P-P の時に比べて ξ の値を $(1 + KtKaKm)^{1/2}$ の係数倍だけ下げってしまう。)</p> <p>従って、このシステムを再び安定化するためには、速度フィードバックを加える必要がある。</p>
<p>基本 F-P + トルクフィードバック</p>	$Y_1 = \frac{JmS + Kb}{1 + KtKaKm}$ <p>この式から、Y_1の値は上と同様に、トルクフィードバックがない時に基本 F-P の時に比べて $\frac{1}{1 + KtKaKm}$ だけ小さくなっている。</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>ほとんど抵抗なく動かせるようになる。</p>	$\lim_{s \rightarrow 0} sy_{11} = \frac{KaKm}{1 + KtKaKm} \quad \lim_{s \rightarrow 0} \frac{y_{11}}{y_{21}} = -\frac{KtKaKm}{1 + KtKaKm}$ <p>従って力の正しい跳ね返りを得るには、$KtKaKm$ は 1 に対して非常に大きな値をとらなければならないことを示している。</p> <p>$\lim_{s \rightarrow 0} sy_{11} = KaKm$</p> <p>$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{y_{11}}{y_{21}} = -1$ となり、このシステムの剛性はトルクフィードバックのない系に対して変化せず、力はねかえりも正しい値をとる事がわかる。</p>	$\Delta = \frac{JmS + Kb + \frac{KaKm}{S}}{1 + KtKaKm} (JmS + Kb)$ $y_{22} = JmS + Kb + \frac{KaKm}{S}$ $y_{11} = \frac{JmS + Kb + KtKa^2 Km^2}{1 + KtKaKm}$ <p>ダンピング係数 ξ は</p> $\Delta = 0 \quad \xi = \frac{Kb}{2(JmKaKt)^{1/2}}$ $y_{22} = 0 \quad \xi = \frac{Kb}{2(JmKaKm)^{1/2}}$ $y_{11} = 0 \quad \xi = \frac{Kb}{2(JmKt)^{1/2}}$ <p>剛性を保持するために $KtKaKm \gg 1$ とし、安定性を確保するために速度フィードバックを加える必要がある。</p>

表4-5 バイラテラルサーボの解析まとめ

	無負荷時の軽さ	正確な力フィードバック	安 定 性
基本P-P	マスターとスレーブの慣性力と摩擦力を 感じる	剛性・・・OK 正確さ・・・OK	・慣性力を小さくすると安定, 摩擦力を小さくすると不安定にゆく
+ 速度フィードバック	基本P-Pに同じ	剛性・・・OK 正確さ・・・OK	・速度フィードバックゲインを大きくする事で安定性を直接的に改善できる
+ 速度・加速度正帰還	基本P-Pに同じ比べて見かけ上の慣性力, 軽く操作できる	剛性・・・OK 正確さ・・・OK	・見かけ上の慣性力と摩擦力が減少し, 慣性力の減少は安定性を増すが, 摩擦力の減少で不安定になる
+ トルクフィードバック	同上 ほとんど抵抗なく動かせるようになる。	剛性・ゲイン要調整 正確さ・・・OK	・不安定になる 速度フィードバックを行って再調整要
基本F-P	マスターの慣性力と摩擦力を 感じる	剛性・・・OK 正確さ・・・OK	・摩擦を小さくすると剛性が上がるが, 不安定になっていく
+ 速度フィードバック	マスターとスレーブの慣性力と 摩擦力を 感じる	剛性・・・OK 正確さ・・・OK	・速度フィードバックゲインを大きくする事で安定性を直線的に改善できる
+ 速度・加速度正帰還	基本F-Pに比べて軽く操作できる	剛性・・・OK 正確さ・・・OK	・見かけ上の慣性力と摩擦力が減少し, 慣性力の減少は安定性を増すが, 摩擦力の減少で不安定になる
+ トルクフィードバック	同上 ほとんど抵抗なく動かせるようになる。	剛性・・・要調整 正確さ・・・OK	・不安定になる 速度フィードバックを行って再調整要

4.2 マニプレータ制御系のシステム構成

図4-2に本マニプレータ制御系のシステム構成を示す。制御盤内にはドライバーユニット、制御ユニット、変換器ユニットが搭載されている。

制御ユニットは管理CPU、制御CPU、RAMメモリ、A/I、D/I、A/O、D/O、SIOから構成される。管理CPUは全体の状態監視、アナログ入出力および制御CPUとのデータの受け渡しを行う。これらのデータの受け渡しは全てツープポートメモリを介して行う。

制御CPUは管理CPUからのデータを受け所定の駆動トルク演算処理を実行する。

制御ユニット構成図を図4-3に示す。

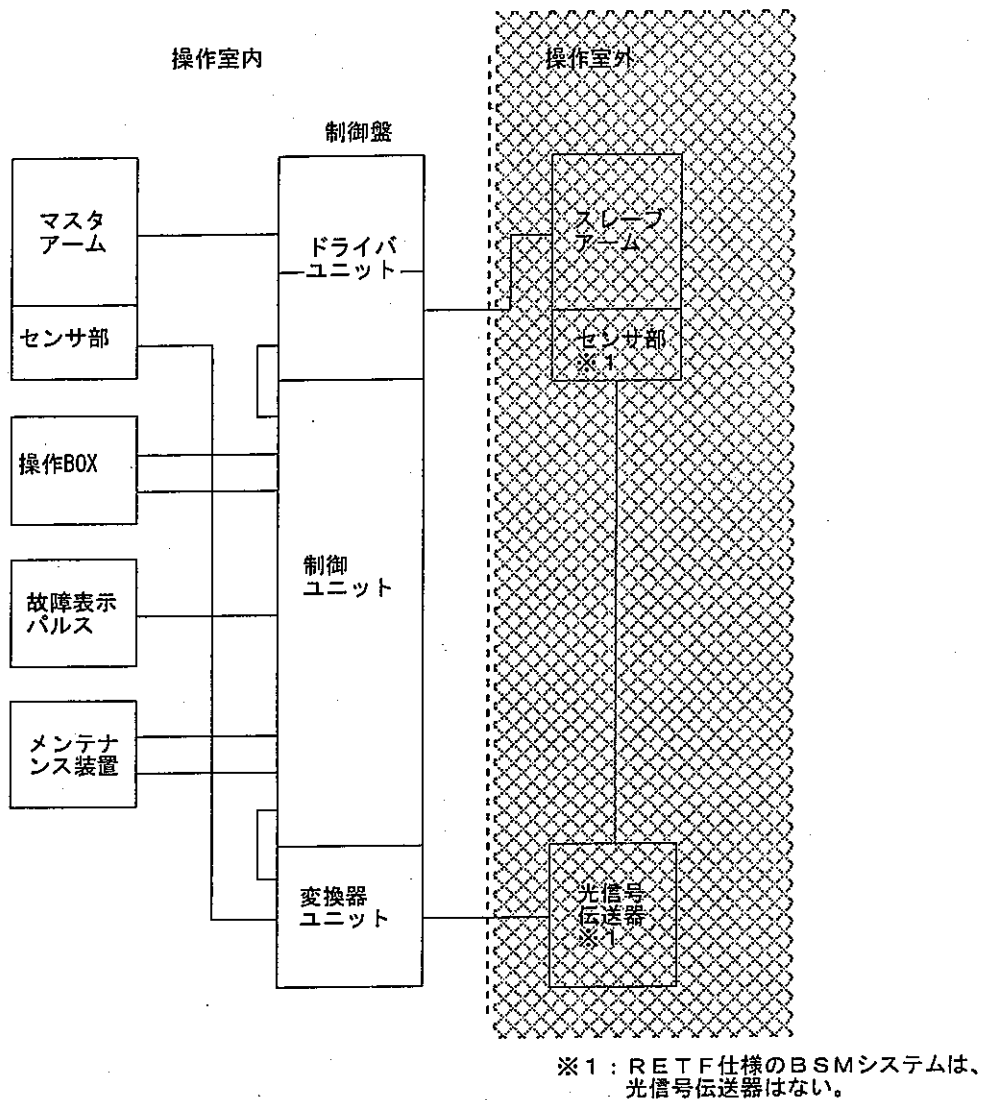


図4-2 システム構成図

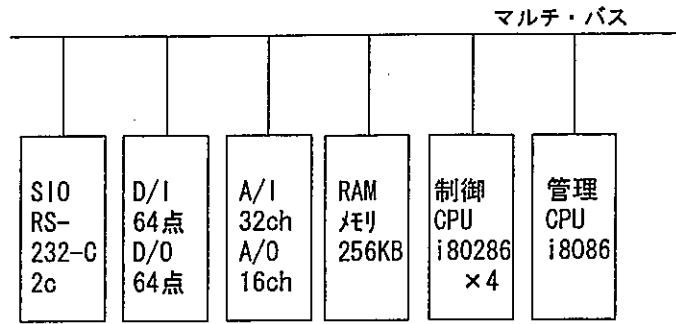


図 4-3 制御ユニット構成図

4.3 制御方法

本システムではマスター・スレーブのサーボ制御を各関節毎に独立して行っている。図 4-4 は 1 軸分の制御ブロック図を示したものである。制御ループには外部よりスレーブアームにかかるトルクフィードバックのほかに、インデックス補償、自重補償、トルクゼロ補償が表現されているが、これらはいずれもオペレータの操作のしやすさを補助する機能である。F-P バイラテラル制御ブロック図を図 4-5 に示す。

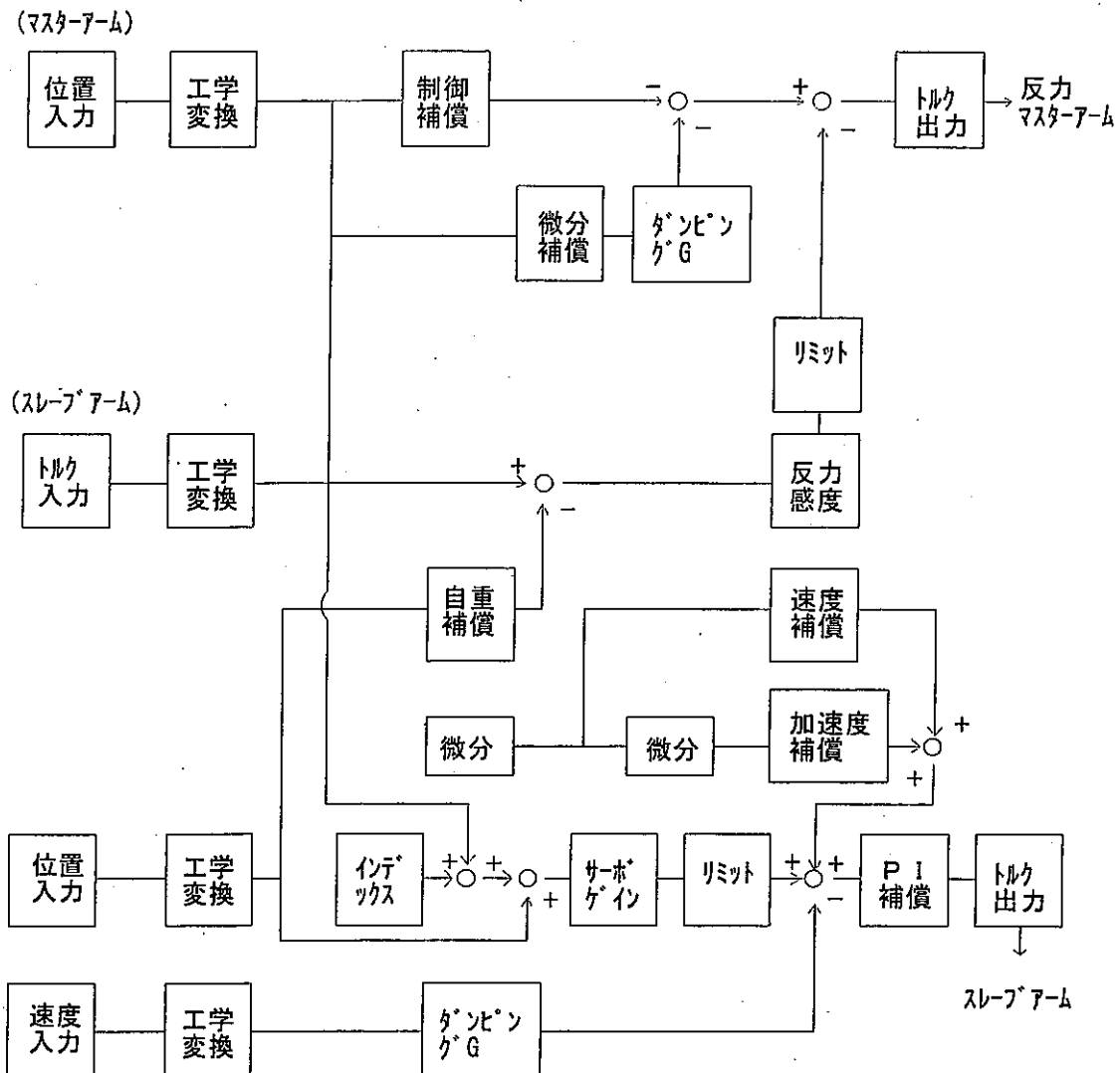


図 4-4 制御ブロック図

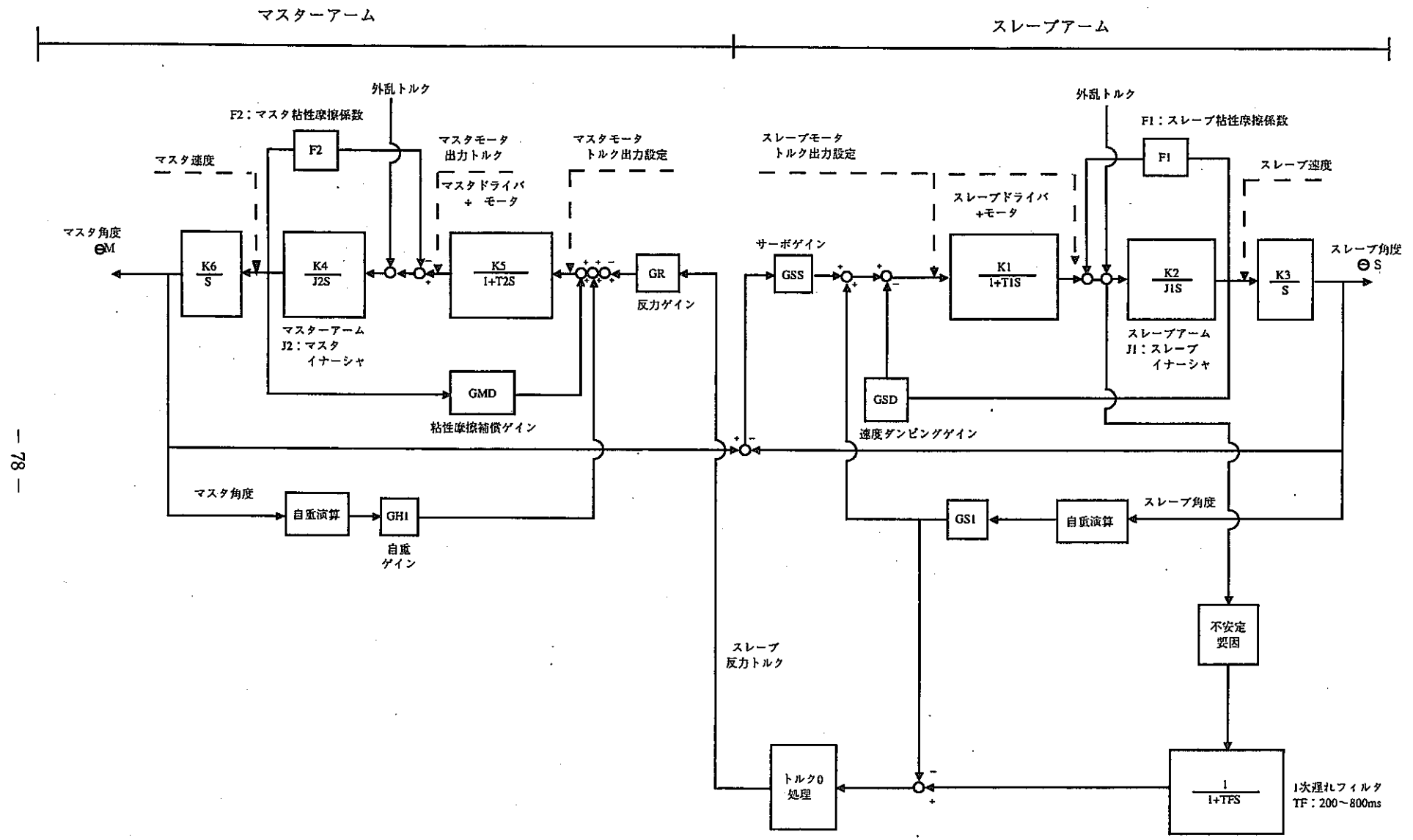


図 4-5 F-Pバイラテラル制御ブロック図 (BSM/EDF-III PET F型)

4.3.1 インデックス補償

スレーブアームの動作範囲はマスターアームの動作範囲より広くとっている軸が多い。マスターアーム操作以外の操作（コントロールボックスでのスイッチ操作）時は、位置保持制御を行う。この時スレーブアームの位置とマスターアームの位置の偏差を位置インデックス値として内部記憶している。その後、マスターアームの操作を行うと、スレーブアームはマスターアームに相対位置偏差を保って位置追従制御を行う。

オペレータがマスターアームを操作前に、マスターアームの位置をオペレータの楽な姿勢になるように、マスターアームを移動してから作業を始める事ができる。

4.3.2 カフィードバックの安定性

本システムではスレーブアームに加わる力をマスターアームに返すカフィードバックの機能が組み込まれているが、一般にカフィードバックにより制御系は位置と力の干渉系となり、制御安定性を低下させる事が知られている。一方マスター・スレーブ制御系では、人間の特性が制御の安定性に大きく関与する。

カフィードバックはスレーブアームにかかる外力を反力としてマスターアームに戻すものであるが、このときのオペレータへの力の伝わり方は人間が直接物を持った時とは異なる。すなわち、スレーブ側で検出した外力がマスター側に返り、マスターアームの質量に作用してアームを動かし、このアームの動きからオペレータは反力を感じるものであるため、マスターアームの質量の影響が途中に介在する。

従って、スレーブ側からのカフィードバック信号は全体として大きな位相遅れをもってオペレータに伝わる事になる。本システムのマスターアームは非常に軽く、粘性摩擦も小さく設計したので、スレーブアーム側にかかる外力がオペレータにフィードバックされるまでの位相の遅れは 180° に近い。

人間機械系において、人間の特性はPID調節系に等価と言われているので、オペレータは人間の微分機能を用いてカフィードバック量を進み補償しながら操作を行っていると考えられる。しかし、人間の周波数特性は両腕型マニプレータ機械系の周波数特性に比べて著しく低い事とカフィードバック信号を二階微分して真の反力とする補償は人間には困難である事から、オペレータは大きな位相遅れが残った状態で真の反力を検出できないままに操作を行う事になる。これがマスターアームの誤操作となりカフィードバック等の安定性を低下させている。これを改善するために、マスターアームの粘性摩擦を増大させてマスターアームでのカフィードバック信号の位相遅れを小さくする補償（安定化補償）を追加した。

マスターアーム動作の安定化のため、関節角速度に比例した補償量をオペレータがマスターアームに加える操作力から引く補償を付加した。これは等価的にマスターアームの粘性摩擦が増加したのと同じ効果を持つので、反力のゲインは低下するが位相遅れは改善される。

これによりオペレータの負担は一階の微分補償ですむ事となり、操作の安定性を向上させる事ができる。

また、この事は反力が通常の位相に近づく事から、実際に物を持った時の感覚に近い反力として感じる事が期待できる。

ところで、スレーブアームにかかる外力を検出するセンサ信号には外力とスレーブアームの自重分によるトルクが含まれる。この自重分を補償するために、姿勢によって各関節にかかる自重トルクを常時計算し、これをセンサ信号から引いて外力のみをフィードバックしている。

反力感度はマスターアームに戻す反力の大きさを調整するゲインである。

また、ゲインの出力にはリミッタを設け、この値以上の反力がフィードバックされないようにしている。これは一種の安定性向上の効果があり、リミッタに達した時点で位置と力の干渉がなくなる。

4.3.3 マスタースレーブ動作の追従性

オペレータがマスターアームを操作して、位置決めするために重要なのは操作感である。これはマスターアームを動かす速度、加速度に対するスレーブアームの追従性が大きく影響している。すなわちオペレータがマスターアームを動かしたときに素早くスレーブアームが追従するときに良い操作感を感じる。

操作感の良否は操作遅れ時間でも表現できる。一般に人間が明確に知覚できる無駄時間は300ms程度と言われており、これを越えた遅れ時間で動作がおこると応答の遅れを感じ操作感の低下につながる。

本システムでは追従性を向上させるため、以下に示す補償を加える。

(1) スレーブアームの速度補償

スレーブアームの速度はスレーブアームの粘性摩擦と速度フィードバックに基づく減衰項の影響を受ける。本来は粘性摩擦と速度フィードバックに基づく減衰項は区別して補償すべきであるが、実際のマニプレータではこれらの分離が困難である事から一括して補償するものとし、補償ゲインは各関節毎に固定とする。

速度補償はマスターアームの位置入力を1階微分して求める。

(2) スレーブアームの加速度補償

スレーブアームの加速度はスレーブアームの慣性モーメントの影響を受ける。厳密には多リンクによるスレーブアームの有効関節慣性は各関節のモーメント変化の影響を受け、スレーブアームの姿勢によって変化するが、実験の結果それらの変動は各関節毎の動作の慣性モーメントに比べて小さい事から、加速度に比例する量のみを補償する事とした。

加速度補償はマスターアームの位置入力を2階微分して求める。

(3) 関節角度信号の微分

速度補償および加速度補償にはマスターアームの速度と加速度が必要であるが、各種センサをマスターアームの各関節に設置するのは現実に難しい。そこでマスターアーム各関節の角度信号のデータを一階および二階微分して求めた。微分演算には差分演算による量子化誤差の影響を排除できる4点差アルゴリズムを用いた。

図4-6はマスターアームの一つの関節を交差的に振ったときの角度信号データとこれをもとに4点差アルゴリズムで計算した速度と加速度のデータである。角度と速度、速度と加速度の位相差がそれぞれ90°でノイズの重畳もなく速度と加速度のデータが生成されている。

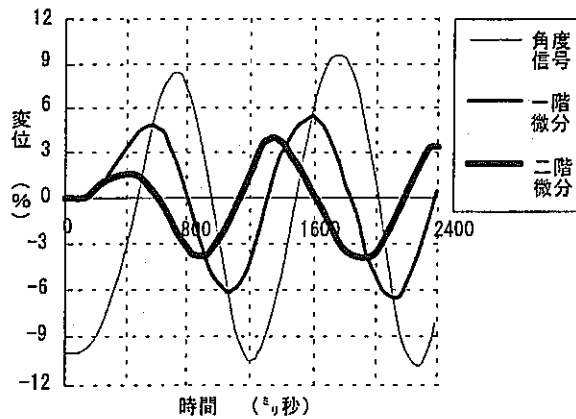


図4-6 信号データの微分処理の効果

4.3.4 4・5軸の協調制御

4軸と5軸の位置を別々に制御する場合、干渉部分を避けた領域（正方形）しか動作できず、手首だけの作業では限定されたものとなるため、4軸と5軸の位置が常時同一円内に入っているように制御する事で、手首が円弧的な滑らかな動きとなり、手首の作業および他の一軸との協調作業を向上させている。

4.3.5 7軸開閉制御

手先は開閉操作で対象物の把持および開放を行う。開スイッチONまたは閉スイッチONの時はそれぞれ一定の高トルクの指令値を出力し、7軸の開閉を行う。また、閉スイッチONを行った後、オペレータが閉スイッチを離した場合でも、微小の閉トルク指令を出力する。開スイッチONを行った後、オペレータが開スイッチを離した場合はゼロトルク指令を出力する。

これによって閉スイッチをONにして対象物を把持し、その後閉スイッチをオペレータが離して他の操作を行って場合でも、微小のトルク指令が出力され続け、スレーブアームのがたを補償するように動き、確実に対象物を把持し続ける事ができる。

4.3.6 制御演算周期の短縮

システム管理とマスターアームおよびスレーブアームの制御を別々のCPUで行い、高速化を図っている。その内訳は以下の通りである。

- (1) 制御CPU1 (管理用)
- (2) 制御CPU2 (アーム制御用)

各制御CPUにはインテル社製を使用し、特にアーム制御用は制御演算周期5ミリ秒を達成している。

4.4 遠隔操作性評価

遠隔操作性の評価としては、マスターアーム、スレーブアームを含めた全制御系の中での制御性の評価と、実際の操作者が操作するマスターアームの取扱い性の評価が必要である。

制御性を評価する方法としては、両腕型マニプレータがバイラテラル制御型のマニプレータである事から以下の項目が用いられる。

4.4.1 単体操作力スレッシュホールド (マスターアームスレッシュホールド) 値

マスターアームに徐々に力を加えてマスターアームが動き始めた時の値。これは、マスターアームの軽さを表す。

4.4.2 バイラテラル反力スレッシュヨルド値

スレーブアームに徐々に力を加えてマスターアームが動き始めた時の値。これは、バイラテラル感度の良さを表す。

本システムにおける上記値を表4-6に示す。

マスターアームの取扱い性は、マスターアームが軽く動く事とマスターアームの動作の止め易さで評価される。すなわち、低摩擦、低慣性である事が要求される。

基礎実験の結果、マスターアームの操作力（操作員がマスターアームを動かすためにアームに加える力）が約500gを越えると操作員は抵抗感を感じる事がわかった。このため本マスターアームは各関節がすべて450g以下で動くよう各軸受け部の摩擦及びモータ部の出力軸トルクを抑えている。また、マスターアームの慣性力は、マスターアームを動かしにくく、止めにくいといった悪影響を与える原因になる。そのため本マスターアームは各軸まわりの慣性力を $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ 以下に抑えるように駆動用モータの選定及び減速機の設計を行った。この結果、操作員は軽い操作力（バイラテラル運転時で全関節500g以下）で全ての関節を自由に操作する事ができる。またスレーブアームに加わった力がマスターアームの機械特性によって損失を生ずる事なく伝達されるため高精度のバイラテラル制御を実現している。

また、前述のインデックス補償、安定化補償、トルクゼロ補償等の制御によりオペレータの操作のしやすさを補助している。スレーブアームについても速度補償、加速度補償を行う事により追従性を向上させ、オペレータに良い操作感を与えるようにしている。

B SMに係わる1998年3月までの開発・試験の運用実績・操作訓練の状況を図4-7に示す。

表4-6 マスターアームスレッシュヨルド値およびバイラテラルスレッシュヨルド値

マスターアームスレッシュヨルド値			
1軸	0.05-0.24 kg	2軸	0.02-0.07 kg
3軸	0.03-0.06 kg	4軸	0.04-0.33 kg
5軸	0.06-0.48 kg	6軸	0.02-0.14 kg
バイラテラルスレッシュヨルド値			
1軸	1.0-2.0 kg	2軸	1.0-1.7 kg
3軸	0.6-1.2 kg	4軸	1.1-1.8 kg
5軸	0.5-1.5 kg	6軸	1.0-2.0 kg

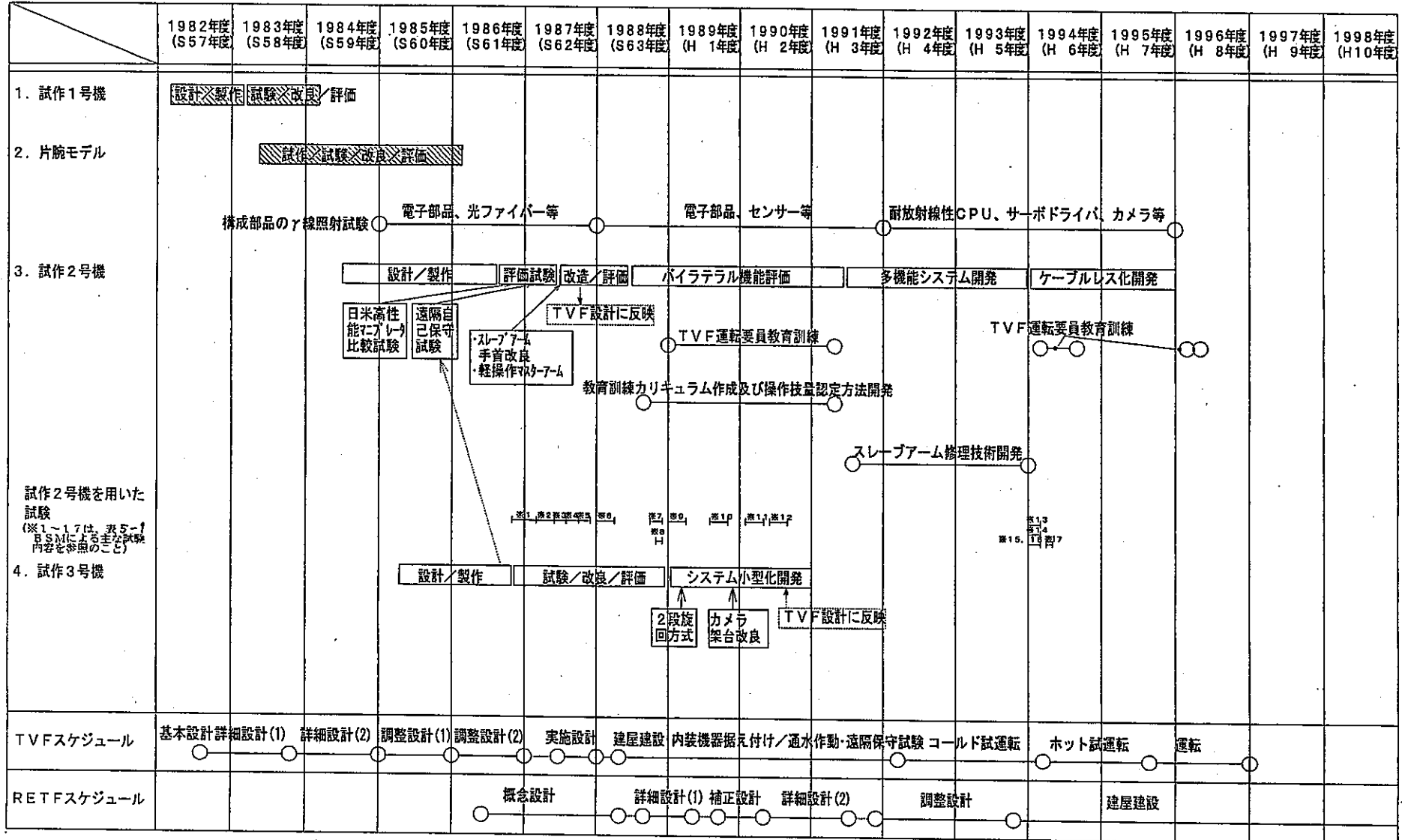


図4-7 BSM開発の状況

5. おわりに

完成したBSMに対するシステム上の評価は開発を担当してきた我々自身が行えるものの、実用性に対しては今後実施において運転・保守を実際に担当する人達が、機能、操作感、故障実績等を加味して行ものである。そして、その評価はBSMがTVFや今後のRETFにおいて施設稼働率上や、作業員の放射線被ばく低減に貢献する事を目的に開発された遠隔保守機器である事を考慮した場合、BSM本体の故障等に対する信頼性が重視されるものと考ええる。

既存のBSMシステム開発は一応終了したが、BSMを操作するには操作訓練を通じてかなりの技量を習得する必要がある、この技量の習得に数ヶ月の期間の訓練を要するのが現状である。今後は、誰でも短期間でその技量を習得でき、容易に操作できるBSMの実現に向けて改良を図る予定である。また、TVFとは違う管理区域外の試験施設として、BSMを健全に運転するための保守管理を適切に行う必要がある、この管理手法の整備も行って行く予定である。

6. 謝辞

本報告書作成に際し、前田正文氏（株式会社明電舎）を始めとしてご協力を頂いた関係各位に感謝申し上げます。

本BSMの開発は、1982年より約7年間にわたって実施されたプロジェクトであり、開発の成果として1988年度には、開発功労賞として事業団理事表彰を授与されました。これはこの期間中開発に携わった多くの事業団関係者、メーカ、オークリッジ国立研究所、大学関係者、その他約100名の成果の代表であり、ご協力をいただいた多くの関係者に深く感謝申し上げます。

また、開発要素検討につきましては実機運転で得られるノウハウに基づいた議論・協議が必要である事は必至です。関係者の皆様方からのご協力を頂きますよう、今後共宜しくお願い致します。

7. 参考文献

- 1) 檜原 英千世 、 “核燃料サイクル施設用遠隔保守技術の開発” 動燃技報 No.49 1984.3
- 2) 堀井 信一ら、 “両腕型サーボマニプレータ評価試験 (II)” 日本原子力学会 「 S61分科会 C61」 1986.10
- 3) 川妻 伸二 ら、 “サーボマニプレータの操作性に関する考察 - マスターアーム - ” 計測自動制御学会 1993.8
- 4) 大森 栄一 ら、 “両腕型サーボマニプレータ評価試験 (III)” 日本原子力学会 「 S63秋の大会 B11」 1988.10
- 5) Fitts,P.M、 “The Inforation Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement ” .Journal of Experimetal Psycholgy.1954, v.47,pp.381-391
- 6) Draper .J.V. ,et. al. 、 “ Effects of Force Reflection on Servomanipulator of Performance” ,Proc.Int Topial Meeting on Remote Handling and Robotics in Hostle Environments,American Nuclear Society,Pasco,Washington March 29-April3,1987
- 7) Draper.J.V. ,et. al. 、 Final Report : Manipulator Comparative Testing Program, ORNL/TM-10109 , Oak Ridge National Laboratory , Oak Ridge , February 1987
- 8) 藤田 雄二 ら、 “両腕型サーボマニプレータの操作性改良” 動燃技報No.68 1988.12
- 9) 前田 正文 ら、 “両腕型マニプレータBILARM MODEL W” 明電時報 通算208号
- 10) 森本 昭 ら、 “両腕型マニプレータの制御” 明電時報 通算 208号
- 11) 川妻 伸二 ら、 “両腕型バイラテラルサーボマニプレータの操作性改良” 日本原子力学会 「1989 秋の大会 E3」 1989.10