

1. バイラテラル・サーボ方式のマニピュレータの自重補償法について ^{*1}

堀 田 宏、^{*2} 大 塚 清、^{*2} 土 屋 利 雄^{*2}

ダイバーに代って精巧な海中作業を行うことを目的としたマニピュレータ（機械の腕）は力を操縦者にフィードバックする機能を持っていることが望ましい。このようなマニピュレータ・システムに適した制御方式としてバイラテラル・サーボ機構が知られている。フィードバックされる力にはマニピュレータに加った負荷のほか、自重や可動部の摩擦抵抗など余計なものまで含まれている。この自重を補償するのが本論文の目的である。その対象となるマニピュレータ・システムは主に洋上で運用することを想定しているため、自重補償の方式、および構成要素は保守・管理が難しく、高価な電子計算機は使用せず、できるだけ簡素で、しかも極く一般的な部品を使用するように心がけた。今回、自重補償を行った関節は肘部曲げのみであったが、その測定結果は極めて良好で、マニピュレータに加った負荷をより敏感に感じることができた。また、操縦者に掛かる負担が大幅に軽減され、操作性、作業能率が格段に良くなった。

On the Self- Weight Compensation Method of Bilateral Servo Controlled Manipulator

Hiroshi HOTTA,^{*3} Kiyoshi OHTSUKA^{*3}, Toshio TSUCHIYA^{*3}

It is desirable that the manipulator (mechanical arm) operated for the purpose of doing elaborate underwater work is able to transfer a force to the operator by feedback. Bilateral servo control system is proposed for the control system which is suitable to such a manipulator system. Bilateral servo control system is the servo system combined with position servo and force servo systems.

The feedback force to the operator includes not only the load gripped by the manipulator but surplus forces such as the weight of the manipulator itself and fricative resistance of movable parts. This paper describes an experimental study to compensate the weight of the manipulator itself (self-weight). We supposed that the manipulator system is mainly applied in the ocean of the continental shelf, so we did not use a computer which is expensive and required difficult maintenance and care. We also used the most general parts composing the self-weight compensation apparatus so as to simplify the method.

We have found from the detailed experiment about several underwater works that a joint of elbow is moved constantly in any underwater work. We have done the self-weight compensation relating to only one joint of elbow, but the result was very satisfactory and the load which was participated in the manipulator was

^{*1} 本研究は昭和48年度より3カ年計画で科学技術庁研究調整局海洋開発課より委託された「バイラテラルサーボ方式のマニピュレータの研究」に関連して行われたものである。

^{*2} 海洋開発技術部

^{*3} Marine Development Technology Department

felt very sensitively. Moreover the burden to be imposed on the operator was reduced greatly, in consequence, handling and operation performance was improved widely. The method introduced in this paper is able to apply to any other joints but the calculation of feedback force about the joints of shoulder will be more difficult.

1. ま え が き

放射性物質の取り扱いや海中作業など、直接人間が立入ることのできない特に悪い環境下での作業や危険な作業を行うことを目的とするマニピュレータ（機械の腕）は、位置の制御と同時にマニピュレータが受けた拘束力を操縦者に感覚としてフィードバックすることが望ましい。このような位置サーボ系と力サーボ系の双方が組合わされたサーボ機構は特にバイラテラル・サーボ機構と呼ばれており、通常のサーボ機構と比べて、その特性は極めて複雑である。

バイラテラル・サーボ機構には次の3つの基本型が提唱されている。

- (i) 対称型バイラテラル・サーボ機構
- (ii) 力逆送型バイラテラル・サーボ機構
- (iii) 力帰還型バイラテラル・サーボ機構

それぞれの方式には一長一短があり、(i)の対称型は一番簡単な機構であるが、無負荷時の操作力が重いという欠点があり、(ii)の力逆送型は従動側（ここではマニピュレータに相当する）で発生したトルクを検出し、それをある関数関係で拡大、あるいは縮小して主動側（ここでは操縦装置に相当する）に逆送しているため、特に重負荷を取り扱うマニピュレータに適した方式である。(iii)の力帰還型は一口にいうと従動側の位置サーボと主動側の力サーボの組み合わせであり、無負荷時の操作力が軽く、感覚伝達という点から上記3方式のうち最も性能が優れているものと目されている。しかし、実際の装置ではマニピュレータには自重があり、拘束力を受けていない時でも絶えず下向きに自重モーメントによるトルクが発生し、操縦装置（マン・ハンド）にフィードバックされる。この傾向は肩部に近い関節程顕著である。従って、マニピュレータの操縦者（オペレータ）はマニピュレータが無負荷のときでも絶えずこの下向きに働く力を腕に受けながら操縦しなければならず、非常に負担が大きい。

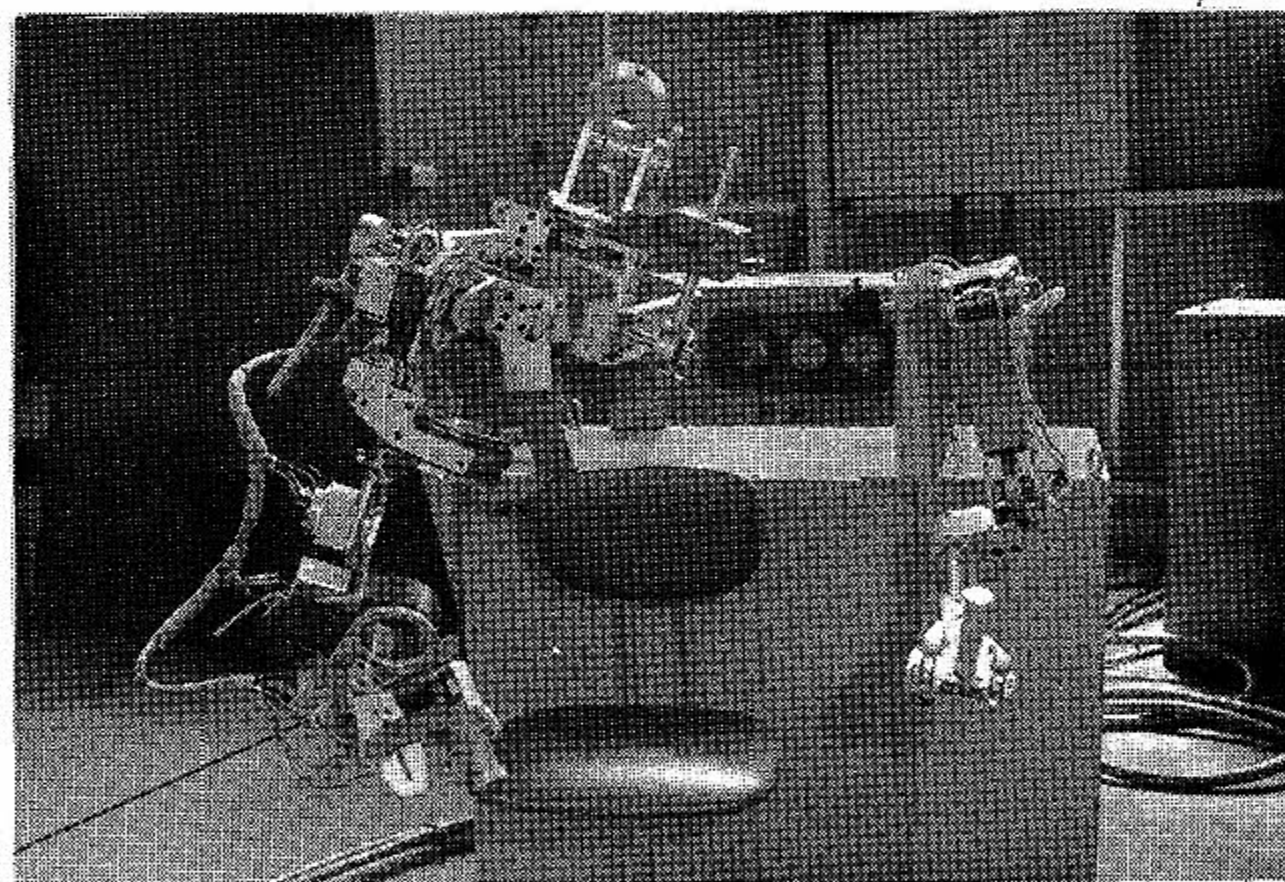
本論文ではオペレータにとって非常に負担となり、また、バイラテラル・サーボ機構にとっても有害な

る要素であるマニピュレータの自重補償法、回路の試作、およびその実験結果について報告する。

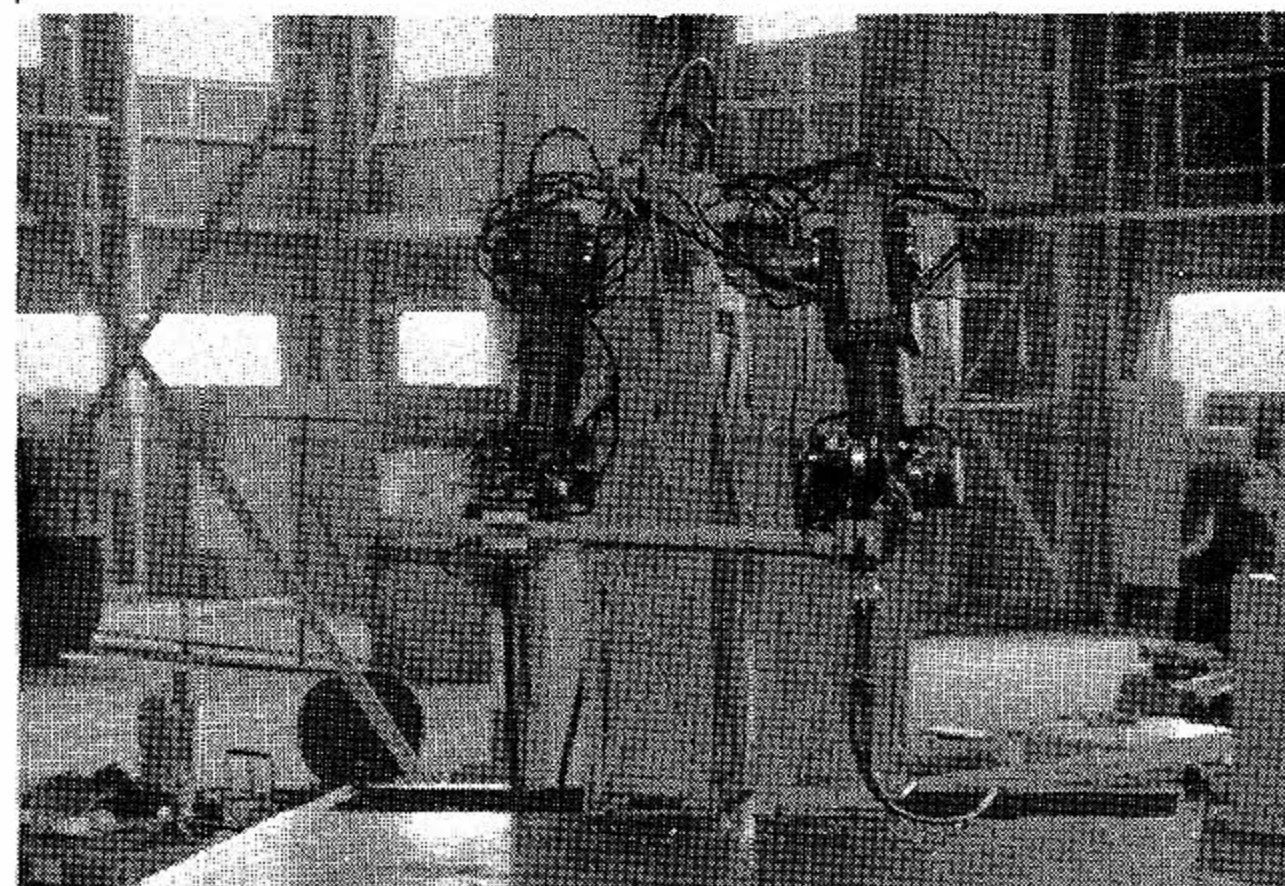
なお、本研究を行うにあたり、東京工業大学森政弘教授を座長とする研究検討会の方々には適切な助言と熱心な議論を戴いたことを感謝する。

2. 力帰還型バイラテラル・サーボ機構の特性

今回自重補償を行ったマニピュレータは制御関係が電気式で駆動関係が油圧式の「電気-油圧式力帰還型バイラテラル・サーボ方式の多関係型マニピュレータ」で、その外観を図1に示す。力帰還型バイラテラル・サーボ機構の基本型は図2に示すように、従動側は通常の位置サーボと全く同様であるが、主



Man Hand



Underwater Manipulator

図1 バイラテラルサーボ方式のマニピュレータ・システムの外観図

Outside View of Bilateral servo manipulator system

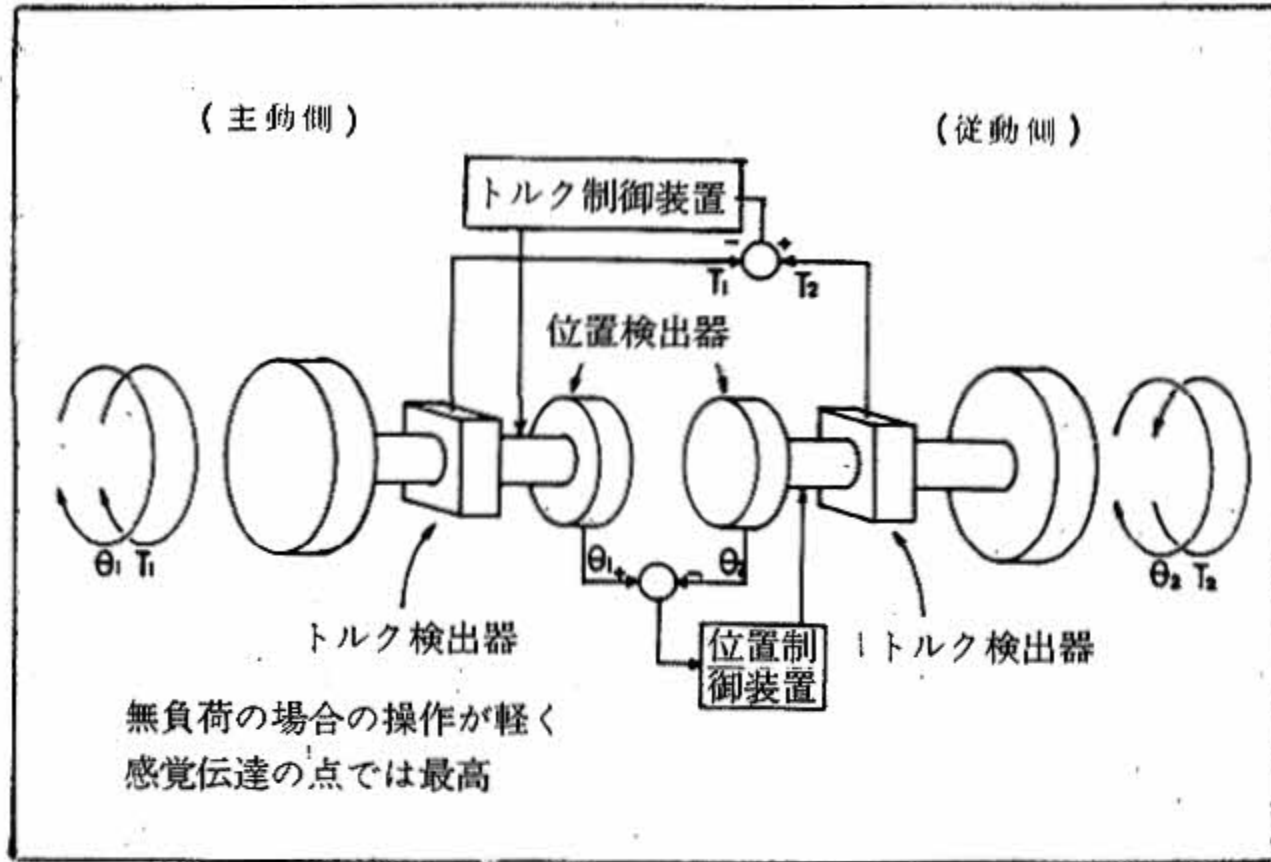


図2 力帰還型

Force feedback type bilateral servo system

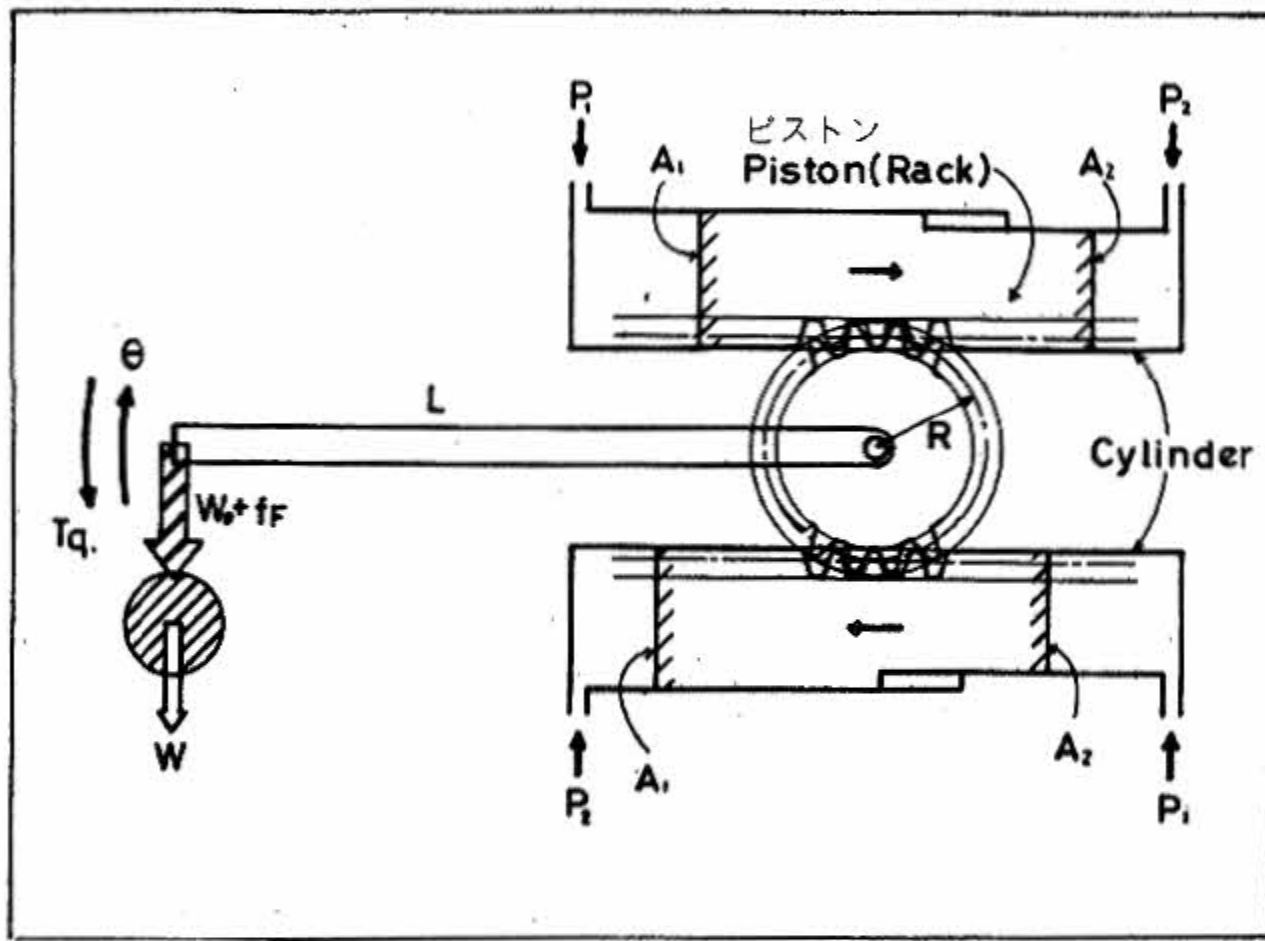


図3 ラック・ピニオン型油圧アクチュエータ

Rack-Pinion type hydraulic actuator

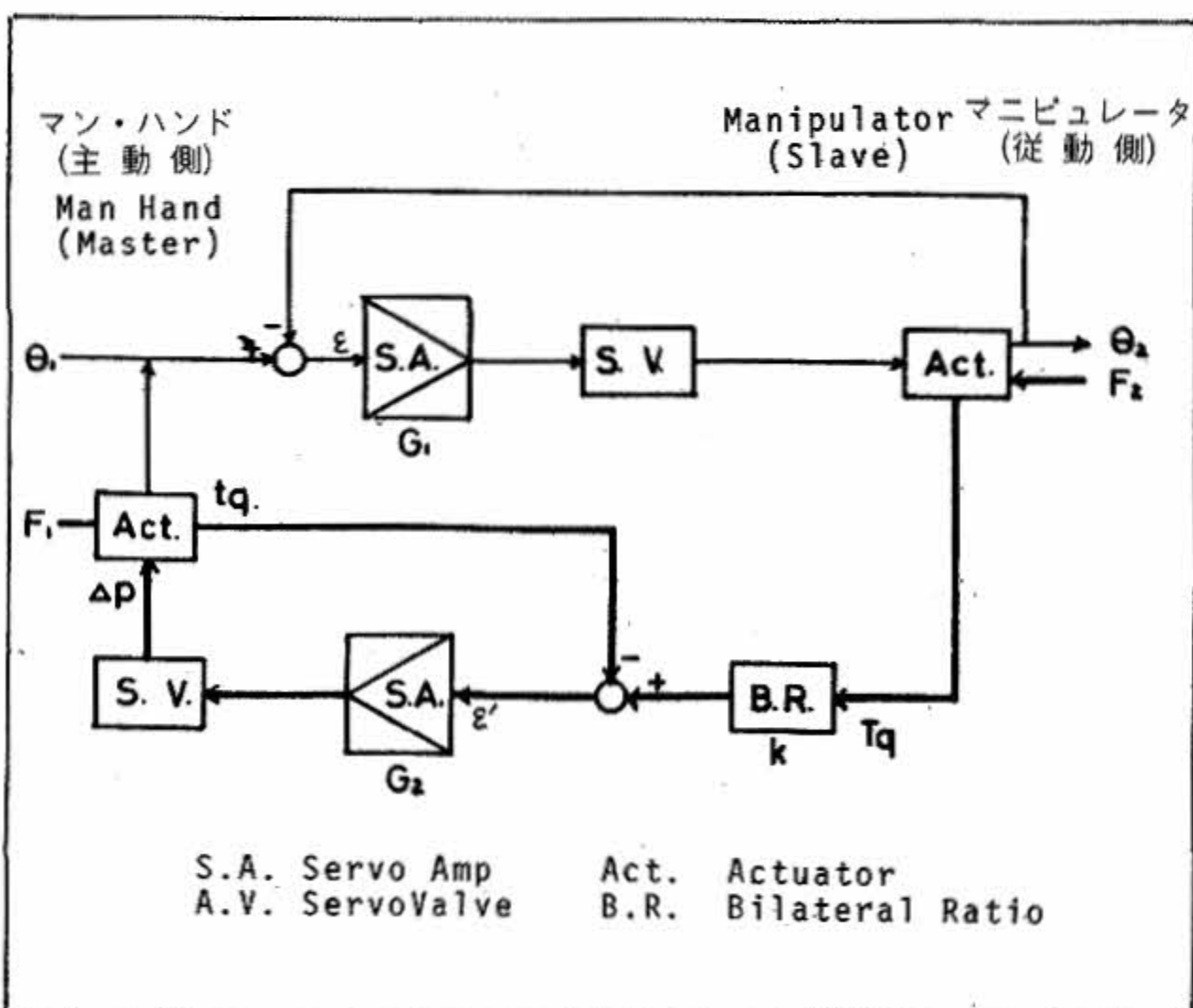


図4 力帰還型バイラテラル・サーボシステムのブロックダイアグラム

Blockdiagram of force feedback type bilateral servo system

動側へは両側のトルクの偏差を小さくする向きに力を伝えている。

マニピュレータ、およびマン・ハンドの各関節には図3に示すようなラック・ピニオン型油圧アクチュエータが設けられており、ピストンの直線運動を歯車で回転運動に変換して関節の動きを再現している。各関節で発生するトルクはピストン両端に掛かる圧力 P_1 、 P_2 を圧力検出器で検出し、その出力差電位から算出している。この方法について、図3を用いて説明する。図中で用いられている記号の意味は

W : 指部に握ませる荷重 [kg]

W_0 : 回転中心から先端までの自重の先端換算自重 [kg]

F_F : 摩擦抵抗の先端換算抵抗力 [kg]、これは腕を上にしたときを正值とする。

L : 回転中心から先端までの長さ [cm]

R : ピニオン歯車のピッチ径 [cm]

A_1 、 A_2 : ピストン両端の受圧面積 [cm²]

である。このとき、回転軸回りのトルクの釣合いは

$$(W + W_0 + F_F) L = \{ (A_1 + A_2) P_1 - (A_1 + A_2) P_2 \} R$$

$$= (A_1 + A_2) (P_1 - P_2) R \quad (1)$$

となるので、腕を静止した状態のときの油圧アクチュエータの発生トルク T_q は、 $\Delta P = P_1 - P_2$ とみると

$$T_q = (W + W_0 + F_F) L = (A_1 + A_2) \Delta P R \quad (2)$$

と表わせるので、 P_1 および P_2 を測定し、その差に定数 $C = (A_1 + A_2) R$ を電子回路的に掛ければ求めることができる。ただし、この場合、マニピュレータの自重、および摩擦抵抗による発生トルクをも合せて検出してしまうことに注意しなければならない。

力帰還型バイラテラル・サーボ機構のブロック・ダイアグラムを図4に示す。細い線で描いたブロックは位置サーボ系で、太い線で描いたブロックが力サーボ系である。力サーボ系ではマニピュレータのアクチュエータで発生したトルク T_q にバイラテラル比 (マン・ハンドに帰還するトルクの比率) k を乗じ、その値からマン・ハンドのアクチュエータで発生したトルク t_q を差引き、サーボアンプで増幅してサーボバルブを制御する。その結果、マン・ハンドの位置、およびトルクが制御され、新しい状態に移る。このマン・ハンドの新しい状態がマニピュレータの状態に影響を与える、という具合に位置

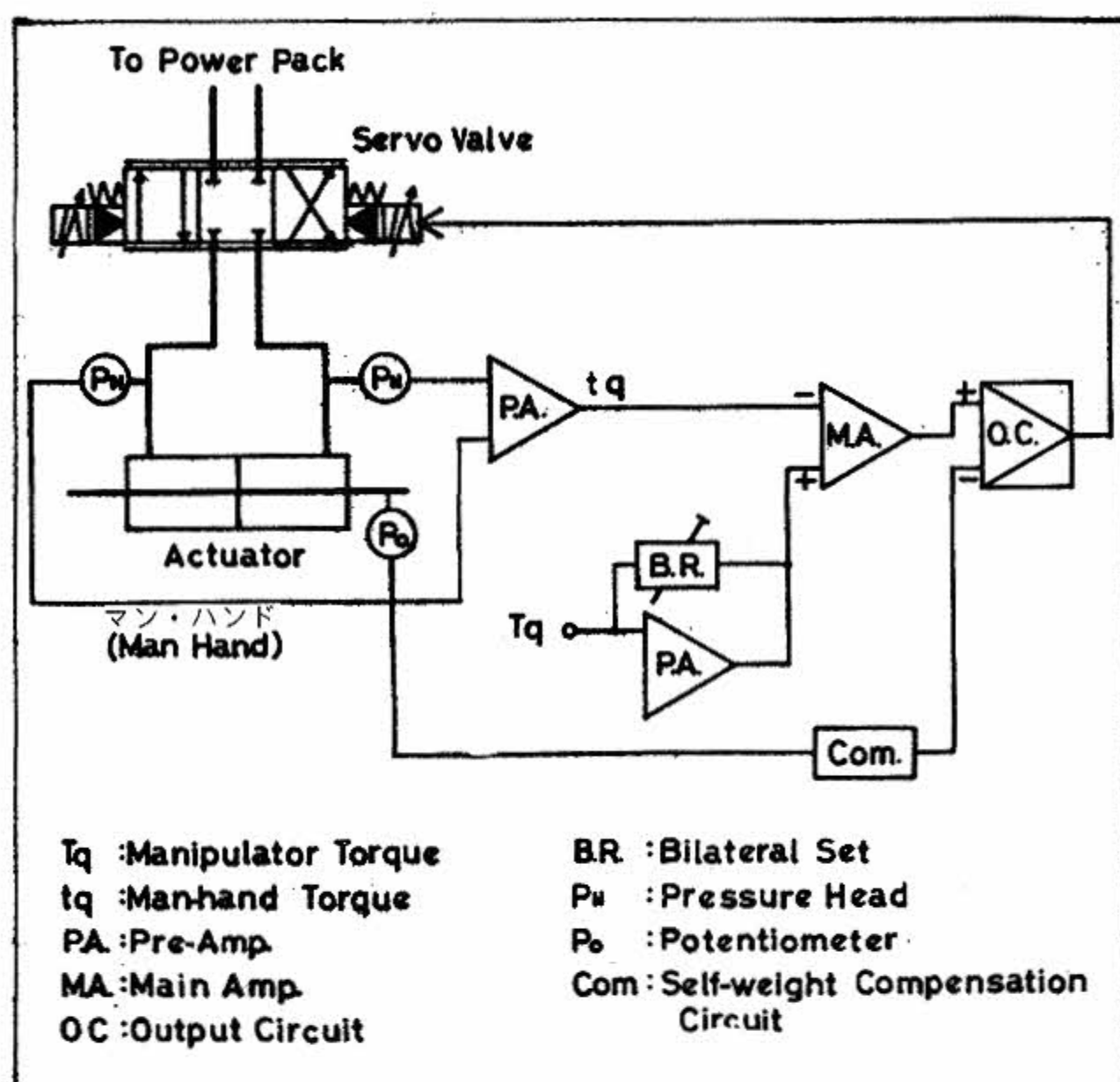


図5 カサーボ系に関する電気-油圧回路図
Electric-hydraulic circuit drawing relating to the force servo system

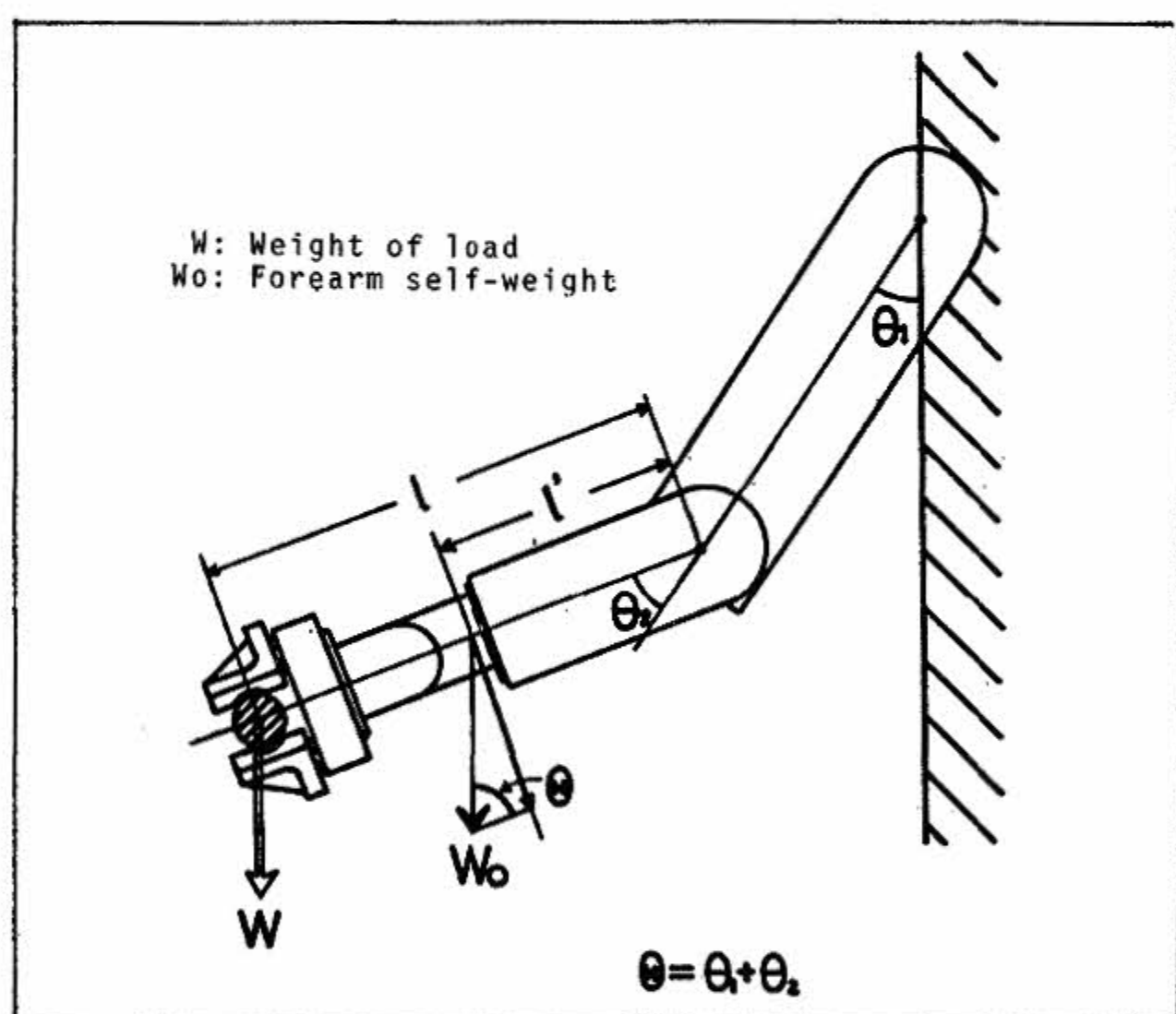


図6 肘部曲げ関節の自重補償原理図
Self-weight compensation principle relating to the joint of elbow

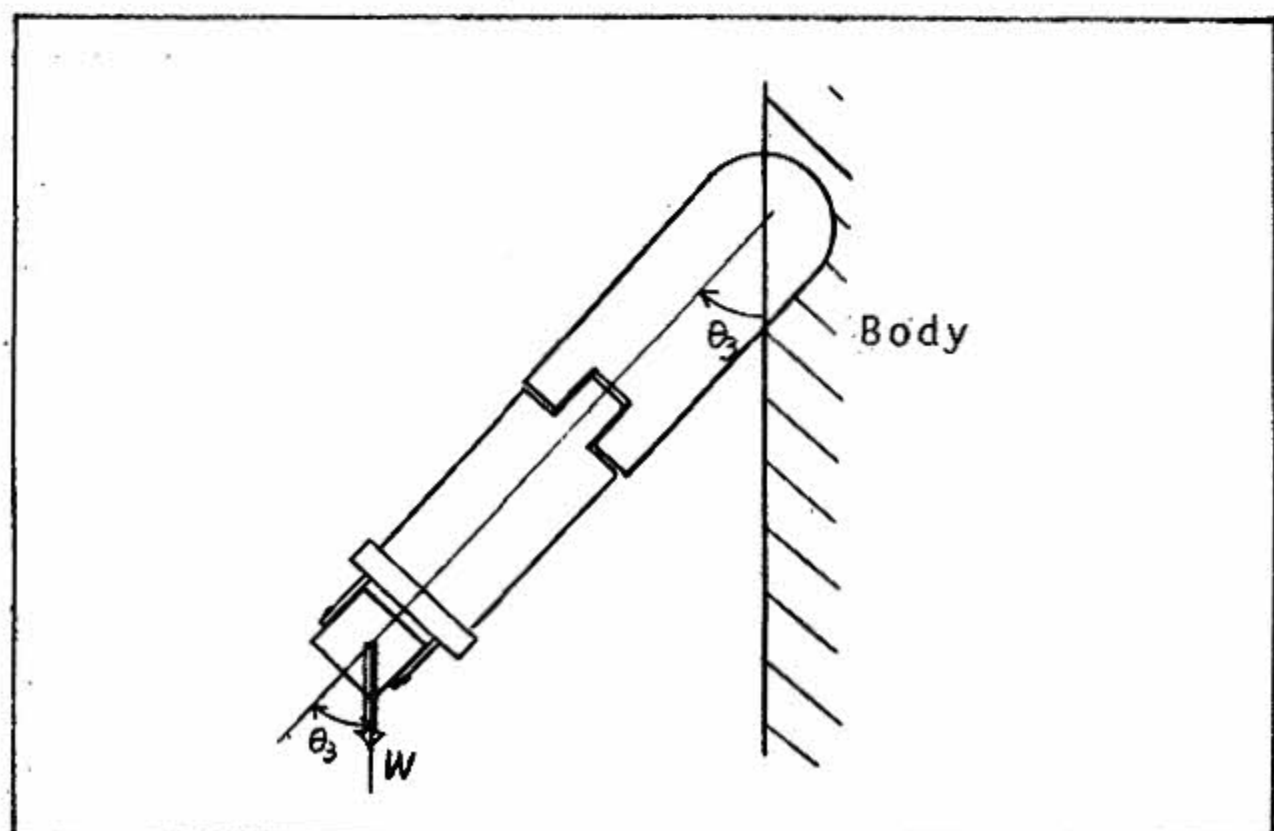


図7 肩部左右振り関節
Joint of shoulder (Front of view)

サーボ系とカサーボ系でフィードバックループを使っているのがバイラテラルサーボ機構の大きな特徴であり、バイラテラル（双動型）と呼ばれている所以でもある。

3. 自重補償法の原理

マニピュレータの自重によりアクチュエータに発生するトルクは腕の状態（関節の回転角度）によって異なるので、ポテンショメータから角度の情報をもらい、自重補償量演算回路で補償すべき関節の補償量を演算した結果をマン・ハンドに帰還するトルクから差引いてマニピュレータの自重を補償している。図5はこの説明のために、図3からカサーボ系を抜出した電気-油圧回路図である。Com.と書いたブロックが自重補償回路で、実際の場合は、この入力は複数個であるのが普通である。以下に、自重補償法の原理について、肘曲げ関節を例にとって簡単に説明する。

いま、マニピュレータの指部にW[kg]の荷重を持たせ、図6に示すように肩部前後振り角度が θ_1 、肘部曲げ角度が θ_2 の状態のときの肘曲げ関節に発生する荷重、および自重によるモーメントmは

$$m = (Wl + W_0l') \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3)$$

となる。ただし、lは肘曲げ関節から指部の中心までの距離であり、またl'は前腕と指部の自重の和 W_0 の重心と肘曲げ関節間の距離である。

一方、肩部左右振り角度 θ_3 を図7のようにとると、肘の曲げ方向に対する θ_3 の影響は余弦的になるので、結局、肘曲げ関節に発生するモーメントMは

$$M = (Wl + W_0l') \sin(\theta_1 + \theta_2) \cos \theta_3 \quad (4)$$

となる。従って、自重によるモーメントの分だけマニピュレータの肘部曲げ関節の発生トルク T_q から差引いておけば、自重によるバイラテラルサーボに与える影響が除去できることになる。しかしながら、実際の装置では、(2)式中に現われているアクチュエータや可動部のシール部分等で発生する摩擦によるモーメント($f_f \times l$)が働いている。この要素は挙動が不確かなため、電子回路的に補償することは不可能である。従って、マニピュレータに持たせた荷重とマン・ハンドで発生する力との比がバイラテラル比とはならない。

4. 自重補償回路の構成

以上述べてきた自重補償法の原理に従って補償回

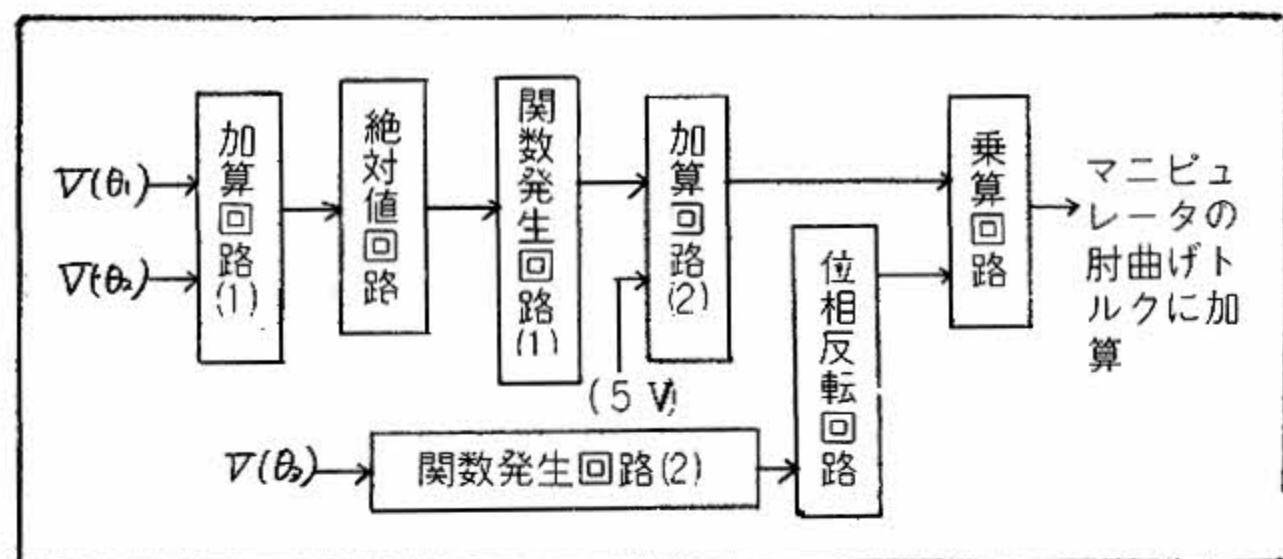


図8 肘部曲げ関節に関する自重補償回路のブロックダイアグラム

Blockdiagram of self-weight compensation circuit relating to the joint of elbow

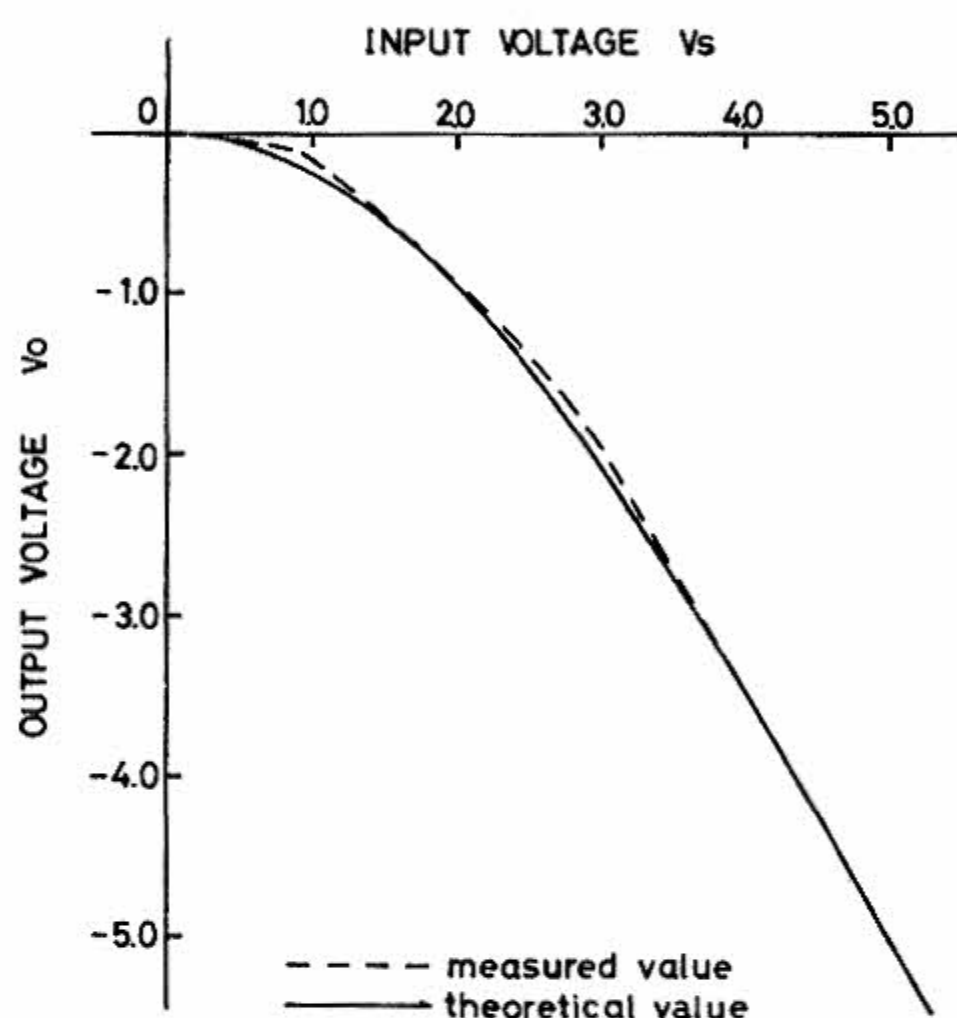


図9 関数発生回路の入出力特性
Input-Output characteristic of function generator

路の構成について説明する。図8にこの回路のブロック・ダイアグラムを示すが、この中の関数発生回路は正弦波を作るブロックで、今回の装置では $0^\circ \sim 90^\circ$ の正弦波形を3本の直線で近似した。この回路の入出力特性を実測したところ、3本の近似直線の接続部分は半導体素子の特性から、図9に示すように少しなまり、結果的には好都合であった。理論値との誤差は最大で約2%程度であった。近似直線の数をもっと増せば、誤差は少なくなるはずであるが、今回の装置ではあまり厳密な値は必要としないので、3本の直線で近似した。

また、図8の $V(\theta_1)$ 、 $V(\theta_2)$ 、および $V(\theta_3)$ はそれぞれ肩部前後振り、肘部曲げ、および肩部左右振りの各関節の回転軸に付いているポテンシオメータ出力電圧で、図10に示すような特性になっている。肩部両関節は腕を垂直に下した状態が 0° で、肘曲げ関節は肘を直角に曲げている状態が 0° で、肘を伸した状態が -90° である。従って、加算回路の出力電圧は約 $-5V \sim +5V$ の範囲内にある。この信

号を直接関数発生回路に入力すると、入力電圧が負値の場合があり不都合なので、その間に絶対値回路を設けて負値は符号変換を行った。

以上のように加算回路を経てきた信号は約5V程全体的にレベルが低くなっているため、腕を垂直に下したとき（肩部前後、左右振り角度が 0° 、肘部曲げ角度が -90° のとき）自重補償量が0となるように、バイアスとして約5Vの電圧を加算した。

以上までで肩部前後振りと肘部曲げの両関節に関する肘部曲げ関節の自重補償は完了する。次に肩部左右振り角度の肘部曲げ関節への影響についてであるが、これは前述と同様の関数発生回路で正弦波を作り、その出力の極性を逆に変換して先の補償量に乗じることにより行うことができる。

5. 自重補償回路の試作

今回試作した自重補償機構は、ダイバーに代っていろいろな海中作業を行うことのできる水中マニピュレータに組み込み、主に洋上で操作することを目的としているため、保守管理に特別な配慮を必要とする内部機構の複雑な電子計算機は使用せず、極くありふれた部品で構成し、できるだけ簡素化した。自重補償機構の試作で用いた能動素子は広く一般的に使用されているオペレーション・アンプ用リニアI.C.と低電圧直流安定化電源用のトランジスタである。

図8のブロック・ダイアグラムの加算回路(1)から関数発生回路までの回路図を図11に示すが、この回路の基本は、入力抵抗 R_{in} とフィードバック抵抗 R_{fb}/R_{in} が増幅率になるというリニアI.C.の特性を利用している。絶対値回路に肩部前後振り、および肘部曲げの両関節のポテンシオメータの電圧を入力すると図12に示すような入出力特性が得られるので、その出力を関数発生回路に入力すると図13に示

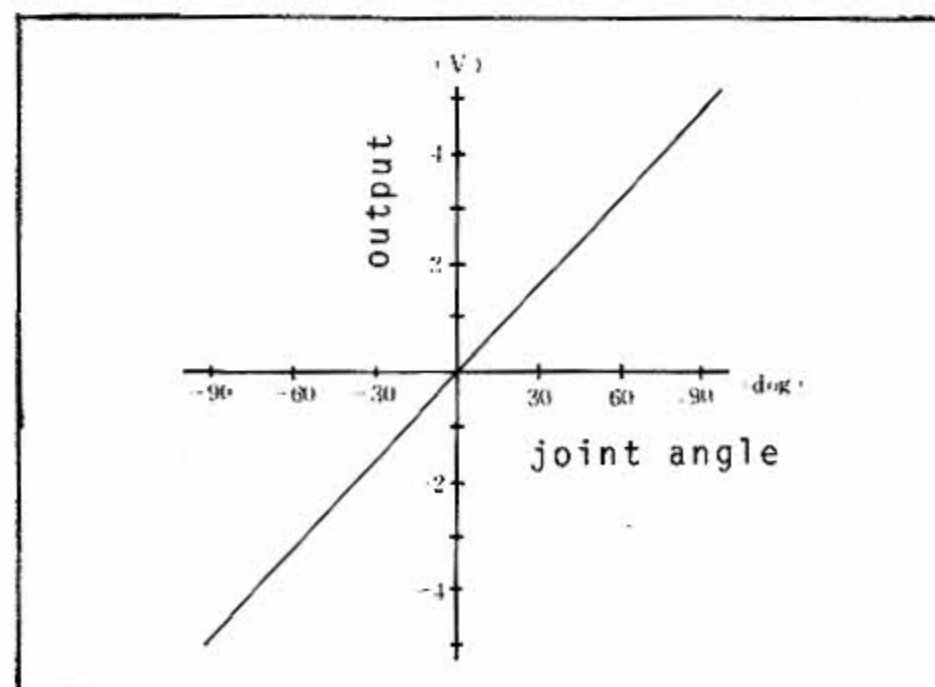


図10 ポテンシオメータの角度と出力電圧との関係

Characteristic of Potentiometer

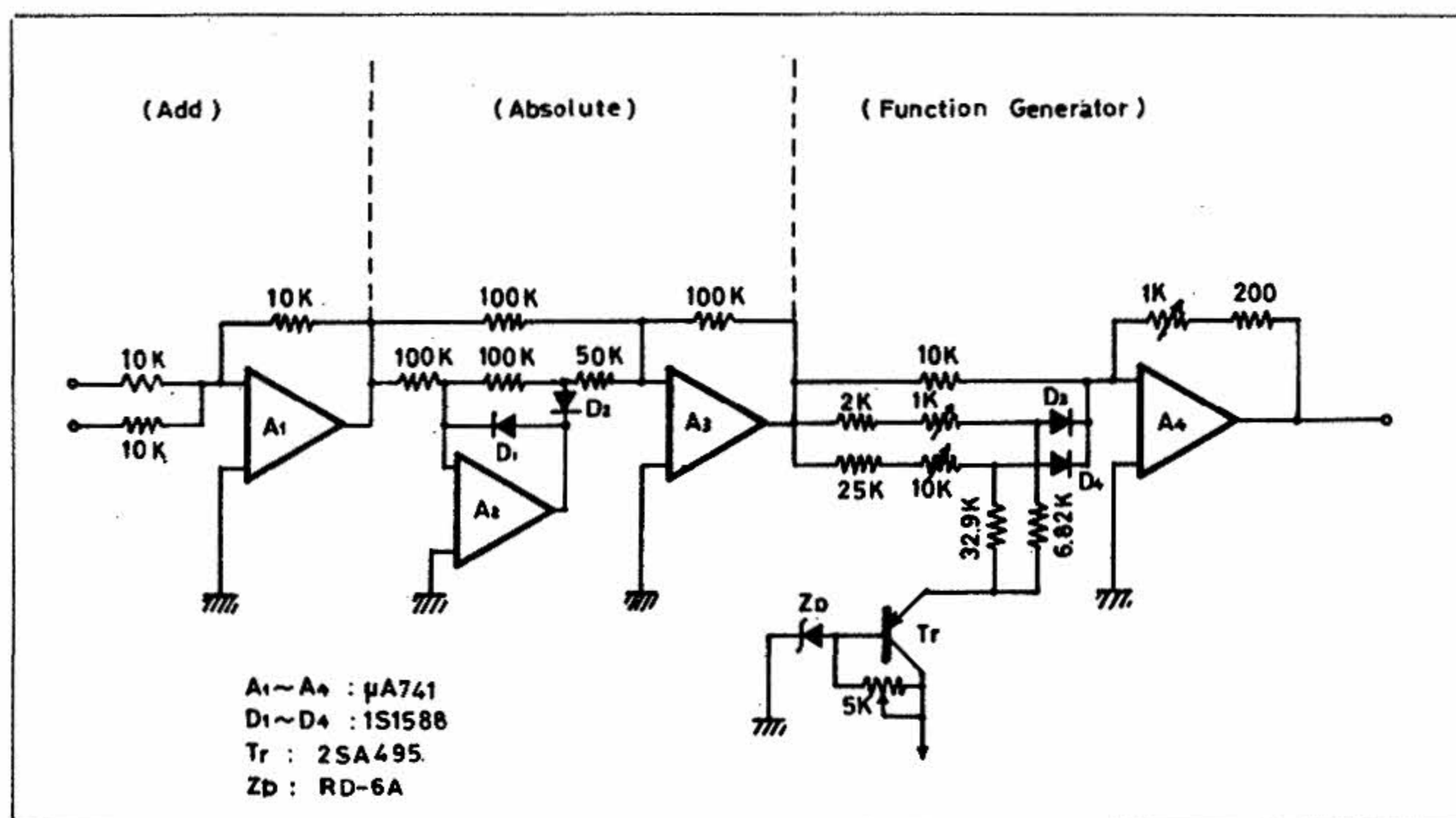


図11 自重補償回路図

Self-weight compensation electric circuit

すような出力電圧が得られる。この出力を図5に示したようにサーボアンプの出力回路に入力し、前腕を上げたときにマン・ハンドの肘部曲げ関節が軽く動くように調整する。

実際の調整段階では、無負荷の状態の上腕を垂直に下し（肩部前後、左右振り角度が 0° ）、肘を -90° （前腕を垂直に下した状態）、および 0° （上腕を水平に上げた状態）にしたときのマン・ハンドおよびマニピュレータの肘部曲げ関節の角度と発生トルクをレコーダで記録しながら、自重補償量の最小値と最大値を調整した。また、肘部曲げ角度の中間値として -30° および -60° を選び、図11に示した補償回路図の中の関数発生回路部にある3つの可変抵抗器を調整して、最適な自重補償量を設定した。この回路全体の消費電力は約 200mW で、5cm×10cm のプリント基盤上に全て配置することができた。

肩部左右振り関節の影響をも含めた肘部曲げ関節の自重補償回路は、今まで述べてきた手順と同様の方法で容易に試作可能である。ただし、アナログ信号の乗算回路についてはいくつかの方法があるが、構成が多少複雑で、調整も容易ではなく、また、限られた紙面でこれらの説明を行うことは不可能なので、本論文では詳細な説明を省略する。

正弦波を発生させる方法としては他に、軸の回転角に応じて正弦波信号を出力として取り出すことのできる特殊なポテンシオメータがある。しかし、これは通常のポテンシオメータと比較して形が大きく、これをマニピュレータの各関節の回転軸に取り付けることはマニピュレータの形状、機構、その他に影響を与え、あまり好ましいとはいえないであろう。

6. 自重補償特性の測定および結果

次に、バイラテラル・サーボ方式のマニピュレータに今回試作した自重補償機構を組み込んで、その効果について測定した結果を述べる。測定方法はマニピュレータに荷重 0、16kg、30kg、50kg の各おもりを持たせ、バイラテラル比を 0～1.0 に変化させたときのマン・ハンドの肘部曲げ関節に発生するトルク、およびマン・ハンドの先端保持力を測定した。バイラテラル比が 0 ということは力サーボ系がない

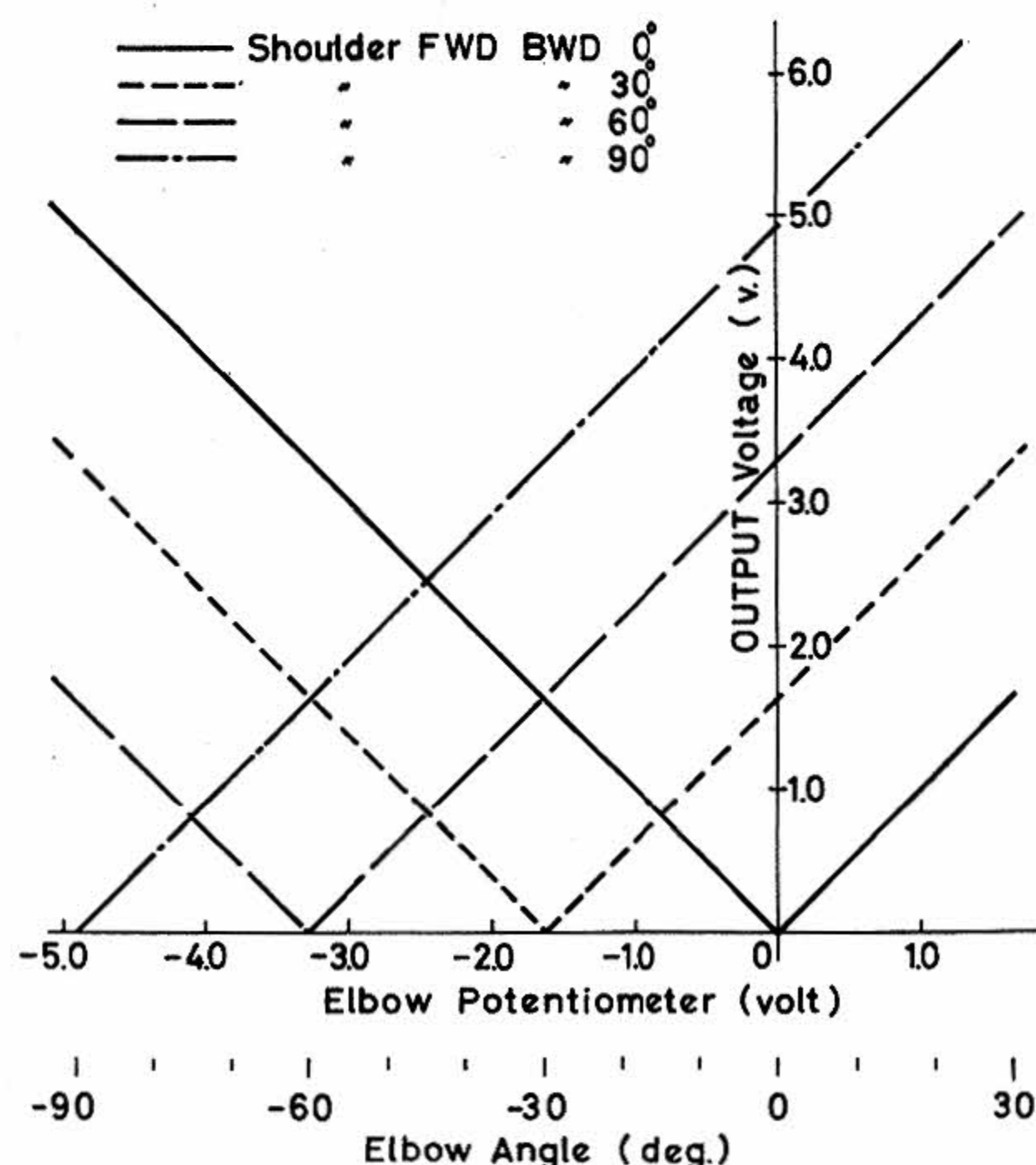


図12 絶対値回路の入出力特性

Input-output characteristic of the absolute value circuit

ユニラテラルサーボ機構と同じで、マン・ハンドにはマニピュレータから力がフィードバックされない状態である。また、バイラテラル比が1ということは、マニピュレータで発生したトルクをそのまま（1対1で）マン・ハンドにフィードバックされる状態である。従って、マニピュレータで発生したトルクの中に自重によるモーメント成分が含まれていると、マニピュレータが無負荷の場合でも、バイラテラル比を上げて行くに従いマン・ハンドの操作力が増大することになる。

図14、(a) および (b) がその測定結果で、前者が自重補償を行う前、後者が自重補償を行ったときのデータである。マン・ハンドの先端保持力は指部中心をバネ秤でつるして測定した。マン・ハンドのアクチュエータの発生トルクが0のときでもバネ秤の目盛が約2 kgを指しているのは、マン・ハンドの自重と摩擦抵抗力が働いているからである。

測定データからも分るように、自重補償の効果は絶大で、マニピュレータが無負荷のときの操作力はバイラテラル比を上げていってもあまり変わらず、各種作業に合わせて最適なバイラテラル比を選ぶ場合でもその選択範囲が格段に広くなり、また、オペレータにかかる負担が大幅に軽減された。

7. む す び

マニピュレータを用いて各種作業を行う場合、それが人間によって操作されるものである以上、オペレータの腕と全く同様な機能、性能を有し、オペレータにマニピュレータを操作しているという意識を持たせずに、あたかも自分の腕が遥か遠く隔れた所で作業を行っているような感じを起こさせることが望ましく、それこそ優れたマニピュレータであるといえよう。

このような観点から、我々はマニピュレータとマン・ハンドが電線だけでつながれ、それらの相対位置関係が任意に選べ、なおかつマニピュレータからの力のフィードバック機能を有する電気-油圧式バイラテラル・サーボ方式のマニピュレータを試作し、いくつかの作業実験を行った。その結果、人間の腕がいかに優れたものであるかを新めて知らされた。本論文に報告したマニピュレータの自重補償法が、人間の作った機械の腕を少しでも人間の腕に近付けるための1つ5手段であると考えることができれば幸いである。

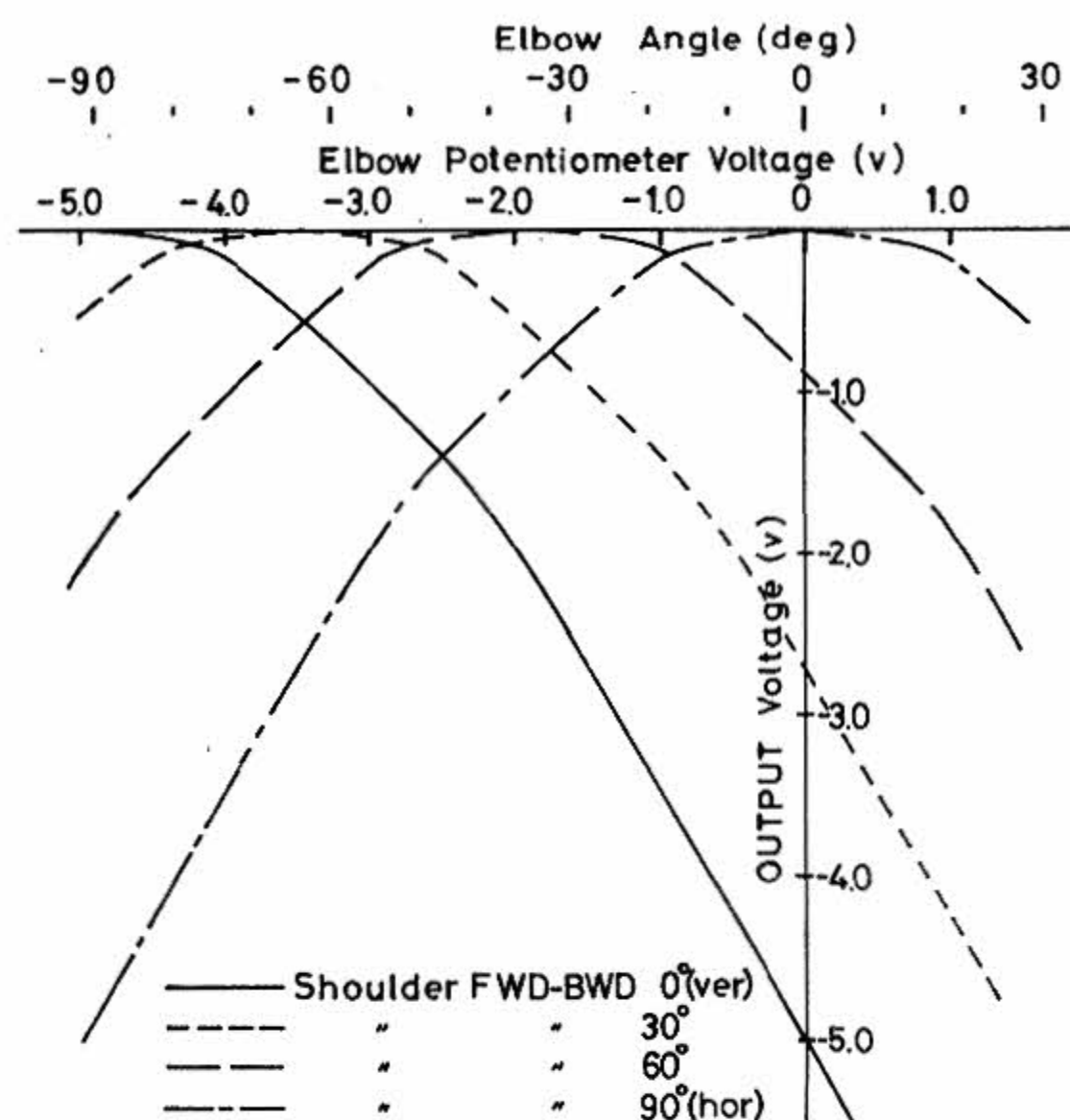


図13 肘部曲げ関節に関する
自重補償回路の入出力特性
Input-output characteristic of
self-weight compensation circuit
relating to the joint of elbow

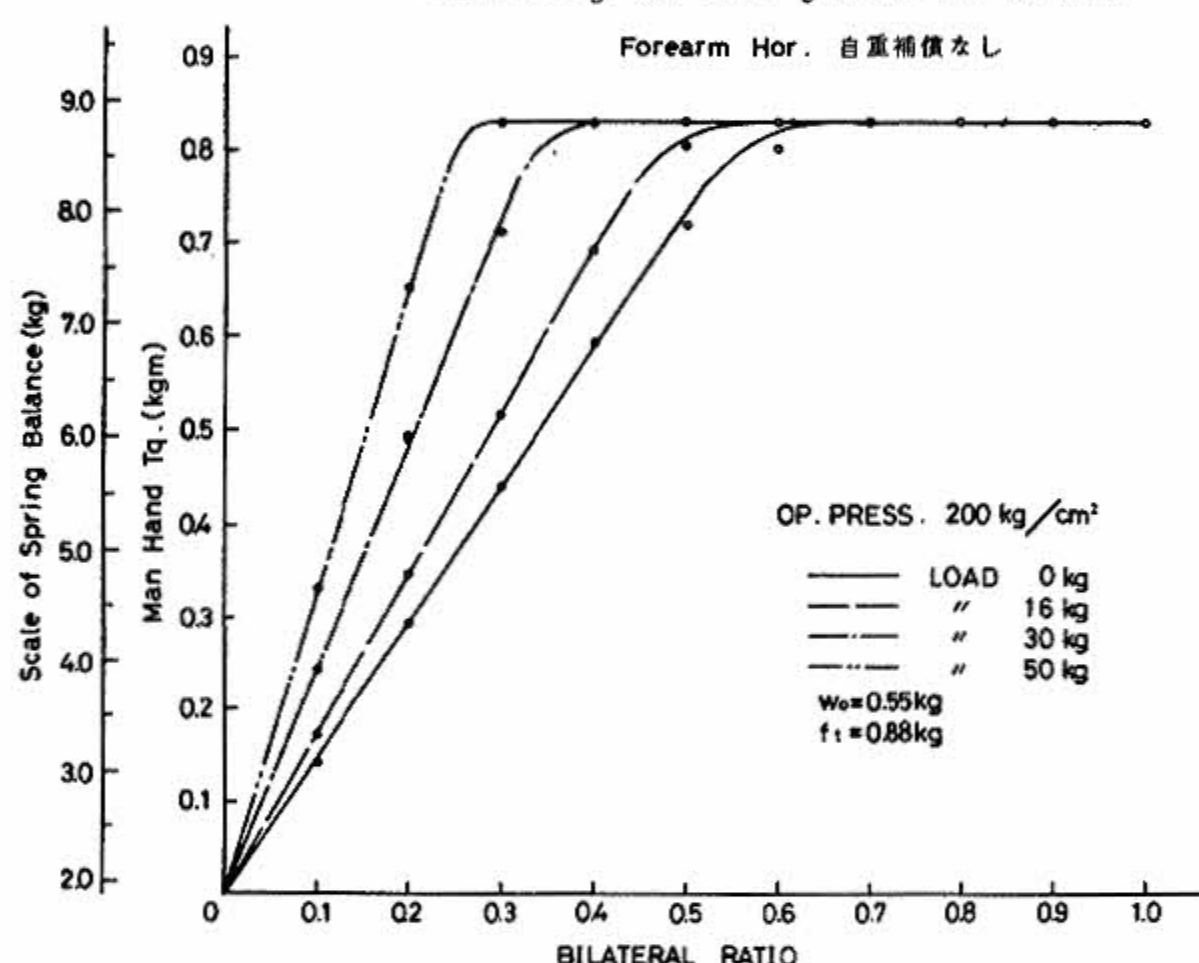


図14(a) 肘部曲げ関節の自重補償特性比較図
Characteristic of self-weight compensation
relating to the joint of elbow (non compensation)

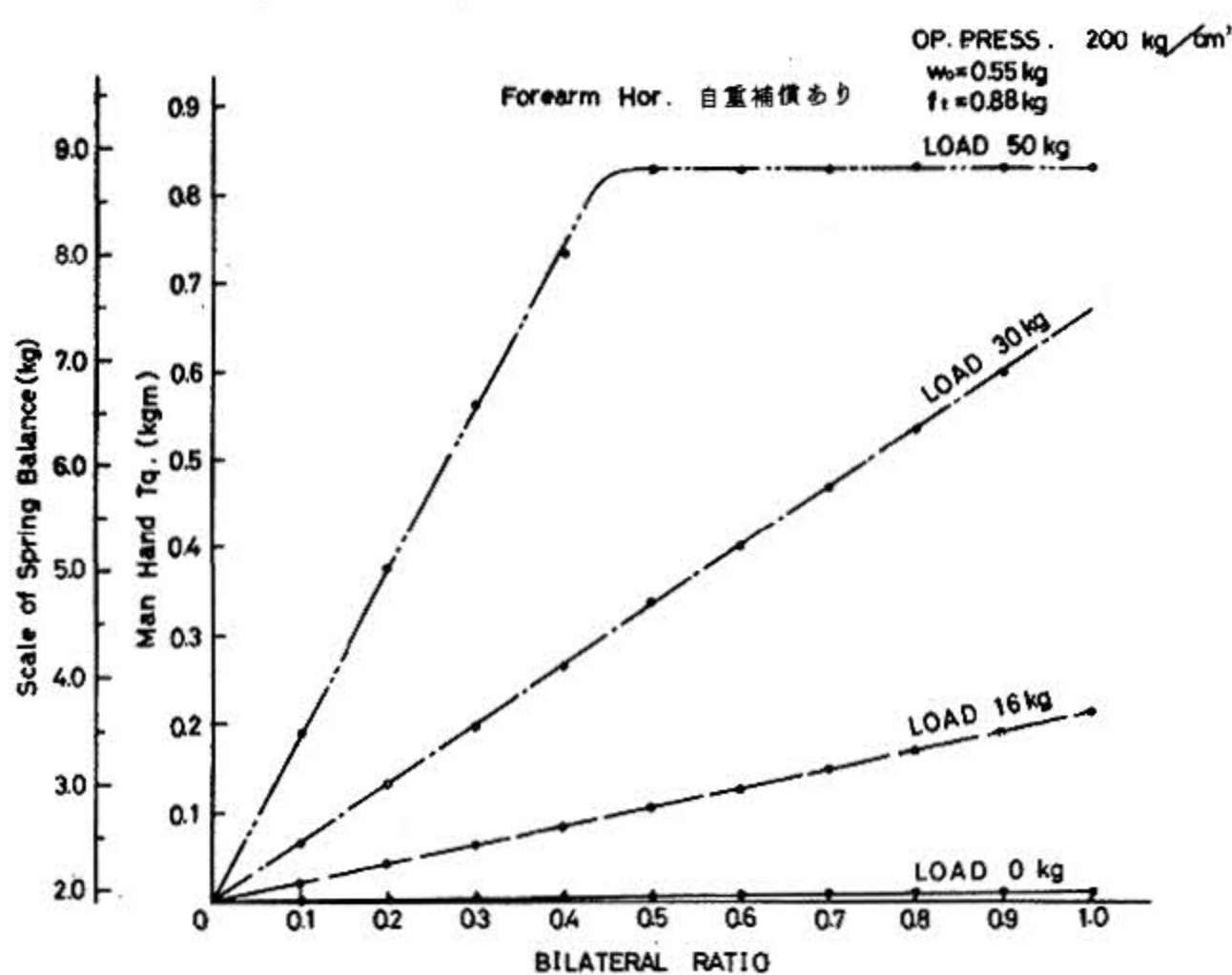


図14(b) 肘部曲げ関節の自重補償特性
Characteristic of Self-weight compensation
relate to the joint of elbow (compensated)

参 照 文 献

- 上野大平 “リニアIC活用ハンドブック” CQ出版社,
1973, 287P, P.103～ 107
- 江尻正員、鴨井 章 “サーボマニピュレータ” 計測
と制御, 1963, P.483～490
- 岡村迪夫 “OP アンプ回路の設計” CQ出版社, 1973
246P, P.173～179