

Research Report of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-87, 1987.
UDC 331.82 : 614.82

遠隔操縦ロボットにおけるマン・マシン インターロックシステムの構成*

杉本 旭**, 池田博康***

Construction of Man-machine Interlocking System for Remote Control Robots*

by Noboru SUGIMOTO**, Hiroyasu IKEDA***

Abstract ; Robots remotely controlled by human operators are powerful tools for developing the automation and safety of complicated jobs. A man-machine system to be built for such a remote control robot is required to be designed after careful consideration of conditions of the robot, operator and task.

Of the functions of the man-machine interface of the remote control robot, those functions that are especially related to safety are described in this report. Based on the assumption that a human operator inevitably makes mistakes when issuing commands to the robot, two types of interlockings are proposed for the remote control robot system. The robot system is equipped with a fundamental, main-interlocking for safety monitoring on the robot side and with a supplementary, quasi-interlocking for exceptional tasks that cannot be covered by the main-interlocking.

A manipulator system approach is taken to add to the reliability of the quasi-interlocking. The quasi-interlocking scheme that does not impair the safety of the human operator when he makes mistakes is developed for the pneumatic manipulator that can control the flexibility of operation over a wide range of conditions.

Keywords ; Robot, Man-machine System, Interface, Fail-safe, Compliance, Interlocking

1. 緒言

近年、ロボット技術の急速な進歩に伴い、作業の生産性向上と安全性確保のため作業の機械化、自動化が進展している。一般に、工場における産業用ロボットの導入の経緯は、機械の自動化の延長線上になる。ところが、作業環境や作業条件から各種の制約を受ける場合、自動化は、標準化された産業用ロボットを用いて達成できるものは少なく、従来の自動化機械の延長という方法だけでは対応しきれないものではない。また、

製造業におけるロボット化は、マテリアルハンドリングの分野から、高度な技術を要するアセンブリの分野へと進展してきた。製造業以外では、この進展のペースは遅く、高度で複雑な作業を行なう場合には、人間の能力に依存する場合が多い。従って整備された場所では自律的に動作し、作業内容が不明確な場面では、オペレータが、自身の知識、判断、技能に基づいて直接操作をして作業を行なうための遠隔操縦ロボットが適している。

一方、作業機械が複雑化、高出力化を辿るなかにあ

* 1988年6月 第5回国際建設ロボットシンポジウムにて一部発表

** 機械研究部 Mechanical Safety Research Division

*** 電気研究部 Electrical Safety Research Division

って、新たな危険性が多く生じている。そして、オペレータの操作ミスに起因する災害は大型化、重篤化する傾向にある。いたずらに、マニピレータの操作を複雑にすれば上記の矛盾は、遠隔操作マニピレータにも生じてしまう恐れがある。

オペレータが遠隔操縦ロボットを操作する場合、動作指令を出すオペレータ及びコンピュータの誤りは完全には防ぎきれない。また、指令情報には曖昧さを伴うため、遠隔操縦ロボットのマン・マシンインターフェースには、フルプルーフを目的としたインターロック機能を設けなければならない。ここではセンサや指令装置を含めて、安全な作業を遂行できるインターロックシステムを検討する。さらに順応形ロボットの特質を具備し、曖昧さを含んで指令される空気圧マニピレータを用いて、インターロックシステムの有効性を検証する。

2. 人間と遠隔操縦ロボットとの関係

2.1 オペレータによるロボットの操縦

遠隔操縦ボックスを用いて操作される小型のショベルやクレーンは単純な遠隔操縦ロボットとみなされるが、その機構上、作業は簡単な内容のものに限定される。なぜなら、オペレータは多くのボタンやジョイスティックを操作しなくてはならないため、複雑な作業を行うことができないからである。

オペレータは自身の機能の一部をロボットに代行あるいは拡大させる目的でロボットを用いるのであるから、オペレータの指令のための動作をそのまま真似た動きをする協調動作マスタスレーブの構成が望ましい。このロボットは人間の腕に似た機構を持つマニュアルマニピレータである。この方式はオペレータの技量を発揮しやすく、また操縦装置（マスタアーム）が人

間の動作特性に合致するため操作が自然であり、操縦による疲労の軽減、その操作ミスの減少も期待できる。

オペレータがマニュアルマニピレータ型ロボットを遠隔操縦する場合、ロボットの動作はマスタ側であるオペレータの操作に全て委ねられる。ところが人間の指令はいつも正しいとは限らないため、たとえ指令情報にミスや曖昧さを含んでいるとしても安全性を確保できるマン・マシンインターフェースを構成する必要がある。

2.2 人間とロボットの作業領域

ロボットを屋外作業に用いる場合、ロボットの作業領域は固定されない場合が多いため、人間とロボットが共存する可能性のある領域ではインターロックにより人間の安全性を確保しなければならない。そこで、インターロックの構成条件を明確にするため、人間とロボットの作業領域を定義する。

まず、作業領域は大きく分類して、人間作業領域、ロボット作業領域、共同作業領域からなり、さらにロボットの作業領域をロボット固定領域、正インターロック領域、準インターロック領域に分割する。共同作業領域は人間作業領域と、正インターロック領域、準インターロック領域との共通部分である。これらの領域を Fig. 1 に示すように配置する。以下に各領域を定義する。

- 1) ロボット作業領域 R ；ロボットが動作して作業を行う全領域

[説明] ロボットの作業領域は、以下に示すロボット固定領域 R_s 、正インターロック領域 I_p 、準インターロック領域 I_q からなる。ただし、 R はインターロック領域を全て包含するものではない。すなわち、

$$R_s \cup I_p \cup I_q \supset R \tag{1}$$

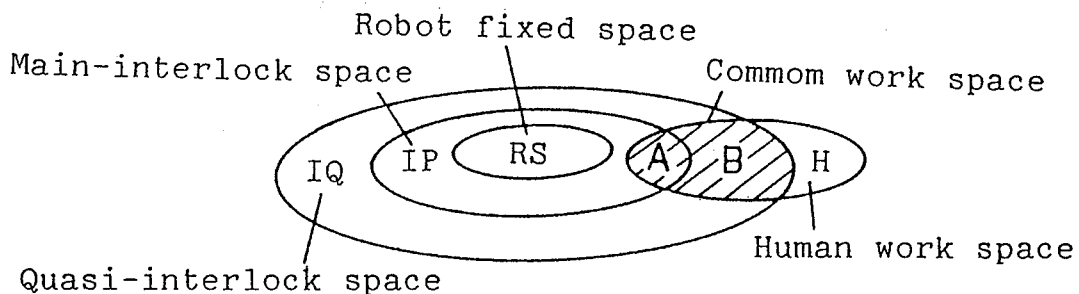


Fig. 1. Definitions of human robot work spaces.
人間とロボットの作業領域の定義

2) ロボット固定領域 R_S ; ロボットが占有し, 人間が存在しないことが明白な領域, または人間の作業が許されない領域

[説明] この領域に含まれる事象は, ロボットの周囲に柵を設けて確実に人間の侵入を防止して, 特に人間がいるか否かを監視する必要のないことである。

3) 人間作業領域 H ; 人間の作業が許される領域

[説明] この領域に含まれる事象はオペレータを含めて作業者がロボットのアームからの危険性の届かないところで作業を行う場合, 作業者が作業プログラムに従って (または誤って) ロボットのアームの危険性を受けける位置に侵入する場合 ($A \cup B$) の両方を含む。すなわち,

$$H \supset (A \cup B) \quad (2)$$

4) インターロック領域 I ; ロボット作業領域の内, インターロックによる「安全監視」を行う領域

[説明] 人間作業領域とロボット作業領域に共通する領域は, ロボットのアームからの危険性を人間が受ける可能性がある。この領域は何らかのインターロックによる「安全監視」が必要である。インターロック領域は, 一般に, 正インターロック領域 I_p と準インターロック領域 I_q からなる。すなわち,

$$I = I_p \cup I_q \quad (3)$$

5) 正インターロック領域 I_p ; ロボット作業領域の内, 正インターロック (後で詳細に論ずる) によって「安全監視」される領域

[説明] この領域に含まれる事象は, 人間がいるか否かの監視を機械の側から行って安全を確保することである。実際には, 対象とする人間作業領域 A より広く「安全監視」を行うので次の関係がある。

$$I_p \supset A \quad (4)$$

6) 準インターロック領域 I_q ; ロボット作業領域のうち, 準インターロック (後で詳細に論ずる) によって「安全監視」される領域

[説明] この領域は正インターロック領域の補助的領域の性質をもつ。すなわち, ロボット側で人間が存在しないことの確認が機構的に不可能な場合, あるいは, その確認の必要性の頻度が非常に小さい場合に, 特に準備する領域である。

この領域に含まれる事象は, 人間によるインターロックを構成することである。すなわち, オペレータは, 他の人間がロボットと接触することがないかを常時監

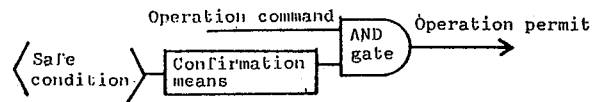


Fig. 2. Basic construction of interlock.
インターロックの基本構成

視しなければならない。実際には広く「安全監視」を行うので次の関係がある。

$$I_q \supset B \quad (5)$$

これらの定義は人間作業領域の内, ロボット・アームの危険性を受けける全ての領域は, 正インターロックまたは準インターロックにより「安全監視」がなされなければならないことを規定している。すなわち,

$$(R \cap H) \subset (I_p \cup I_q) \quad (6)$$

3. マン・マシンインターフェースにおけるインターロックの構成

3.1 インターロックの基本構成

ロボットの運転は, 前述した2つのインターロック領域に人間が存在しないという安全状態を正論理として検出し, 伝達されて初めて許可が与えられることを条件とする。この条件を満たす手段を「安全確認型手段」¹⁾と呼ぶ。この手段を実現するインターロック構成を Fig. 2 に示す。これより安全状態を正論理として伝達されていれば, たとえ運転指令をエラーしても人間に危害を及ぼすことがないことがわかる。ただし, Fig. 2 における確認手段と AND ゲートは, 故障時は出力論理値が 0 (これにより機械を停止させる) となる非対称誤り率²⁾を持つ必要がある。

反対に, 人間の侵入という危険状態を検出して, ロボットを停止させる方法は, 危険状態を正論理として検出するものであり, 「危険検出型手段」と呼ばれる。この手段は Fig. 2 における確認手段と AND ゲートの間に否定 (論理反転) 要素を挿入して, Fig. 2 と等価な機能を持たせようとするものであるが, 確認手段 (ここでは検出手段と言う) に故障論理値 1 を出力する特性を与えなければならない。この特性は故障してもエネルギーを出力し続けることを要求することであり, この特性を持つ検出手段を設計することは現実的ではない。

したがって, 安全性を確保するためのインターロックは, Fig. 2 に示す「安全確認型手段」でなければなら

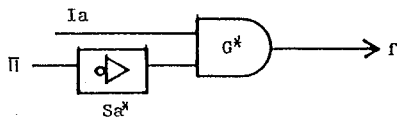


Fig. 3. Construction of main-interlock.
正インターロックの構成

ず、運転指令の許可を与える確認手段の構造が規定される。

3.2 正インターロック領域におけるインターロックの構成

人間がロボットの作業領域に存在しないことをロボット側で確認するため一般にマンセンサを用いるが、このセンサを前節で述べたように、人が存在せずかつ正常に動作している間のみ、論理値 1 を出力して、運転を許可する構造でなければならない。すなわち、人の不在という否定情報を検出、伝達するため、センサ自体が否定構造を持つことになる。このセンサの特性を持つ確認手段を含むインターロックを正インターロックと定義する。いま、運転指令を Ia 、運転出力 f とし、人間が共同作業領域にいないことを \bar{H} で表すと、正インターロックの構成は Fig. 3 で示される。ここで、センサ S 、AND ゲート G の正常動作状態を各々 Sa^* 、 Ga^* (ともに、正常なとき論理値 1、正常でないとき論理値 0) とすると、運転出力 f と次式で表される。

$$f = Ia \wedge (\bar{H} \wedge Sa^*) \wedge Ga^* \quad (7)$$

したがって正インターロックはセンサ Sa^* 、および AND ゲート Ga^* が正常であり、人間がいないこと \bar{H} が確認されれば運転指令 Ia の誤りを許す構成と言える(この構成でないと、運転指令は危険を伴うのでミスが許されない)。また、安全状態をアクティブに検出して合目

的的安全³⁾(安全の確認の元で作業の実行が行われる状態)を創り出しているの、正インターロックは合目的的安全インターロックと言うこともできる。

安全一人の不在一を正論理として検出するフェールセーフなマンセンサの 1 例として、透過式光電スイッチがある。これは、センサ自体に否定構造を持つ。すなわち、受光器が投光器から発射される光線を受光している間は論理値 1 を出力し、人間の不在を証明しており、人間が光線を遮断すると出力は論理値 0 となる。投・受光器いずれの故障に対しても論理値 1 を出力することはない。一般的なマンセンサはフェールセーフ構造となっていないが、フェールセーフ化したセンサとして、既にシールドビームセンサ⁴⁾、フェールセーフ安全マット⁵⁾、フェールセーフパルスレダセンサ⁶⁾を開発した。またフェールセーフ AND ゲート⁷⁾は既に市販されている。

3.3 準インターロック領域におけるインターロックの構成

本来、インターロックに用いる確認手段はフェールセーフな構造でなければならないが、それが用意できない場合は、特別に用意された監視人がその代役となる。このとき、監視人は他の作業者が共同作業空間に存在しないことを常に休みなく監視し、安全の確認を示す信号—例えば、押しボタンを押し続けなければならない。それは監視人が監視場所を離れた時、機械の作動停止を保証するためである。Fig. 2 におけるセンサは人間の目、AND ゲートは脳に相当するが、人間はフェールセーフ特性を有しないため、人間によるインターロックは正インターロックの構成条件を満足せず、疑似的な形態を持つにすぎない。この人間側のインターロックを準インターロックと定義する。

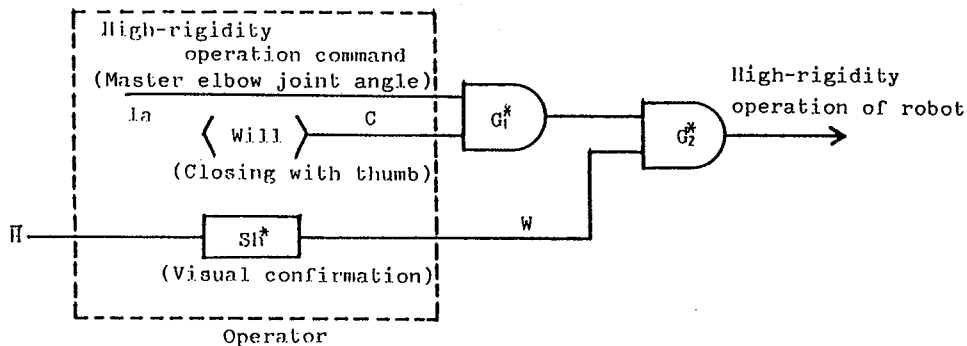


Fig. 4. Construction of duplicated quasi-interlocks.
2重化された準インターロックの構成

人間が絶えず注意を払って「安全」を確認し続けることは大きな精神的、肉体的負担を伴う。これらの負荷は、人間の接近を検出して非常停止操作を行う方式(危険検出型監視)によって多少軽減されるが、この方式は人間のミスによって事故を生じやすい。安全の監視を人間に依存する限り、それによって達成される安全にはおのずと限界があると言わざるを得ない。

そこで、新たにハードウェアによる別の準インターロックを付加し、2重インターロックを構成する。Fig. 4にこのインターロックの構成を示す。この場合、安全監視は、ロボットを操作するオペレータが担う。ここで、 Sh^* はオペレータの目、 G_1^* 、 G_2^* はロボット側のANDゲート(ハードウェア)である。Fig. 4の構成によれば最も危険を伴う高剛性作動の要求 Ia は、意志の表明 C 、及びオペレータによる確認 W によってのみ許可される。ただし、オペレータによる確認 W が十分でない場合は、低剛性作動しか実行できない構成である。Fig. 4の意図するところは、「不慮の出来事の発生に対し、ロボットの柔らかい動作に切り換えることによって、人間、あるいは周辺に重大な危害を及ぼさないようにする」ことにある。つまり、力を発生して作業を行うときのみ、ロボットを硬くし、それ以外では柔らかい状態を維持していれば、ロボットのもつ潜在的な危険性は大幅に抑えられる。Fig. 4のANDゲート G_1^* 、 G_2^* がフェールセーフANDゲートならば、 G_1 への入力 W の誤りだけ許されない。しかし、人間が作業を行うため力を発生するのは明確な作業意志を持つ場合であるから、 W はロボットに力を発生させるためのオペレータの作業意志と見なせる。すなわち、Fig. 4のインターロックは極めて人間の特性に適應していると言え

る。

Fig. 4のインターロックを実現するためには、剛性(コンプライアンス)を変化できるロボットが必要となる。そのロボットには①本質的には硬いロボットでコントロールによって柔らかにするものと、②本質的に柔らかいロボットでコントロールによって硬くするものの2種類がある。前者は、電気モータ式ロボットや油圧式ロボットが相当し、柔らかい状態は(これを仮想コンプライアンスという)正常にコントロールされた時のみ得られるため、Fig. 4のインターロックには適應できない。後者は、本質的に柔らかさを持ち、正常にコントロールされた時のみ硬くできる空気圧式ロボットが相当する。このロボットは、故障した場合空気の持つ高いコンプライアンスに移行するように設計されていれば、たとえ人間に触れても人間に大きな力を及ぼすことはない。

本報告ではコンプライアンスを外部から調節できる空気圧式のマニュアルマニピュレータを用いて、Fig. 4のインターロックのモデルを構成し、その有効性の検証を試みた。

4. 空気圧式マニピュレーティングシステムにおけるマン・マシンインターフェース

4.1 空気圧マニピュレータの構成

今回用いたマニピュレータは、アクチュエータとしてマッキベン型ゴム人工筋を2本、拮抗形として用い、各々の筋に供給する空気圧を調節し、角度センサのフィードバックによる角度制御系を4軸分構成する。空気圧制御系は2つの球形ポペット式直動形流量制御弁⁸⁾

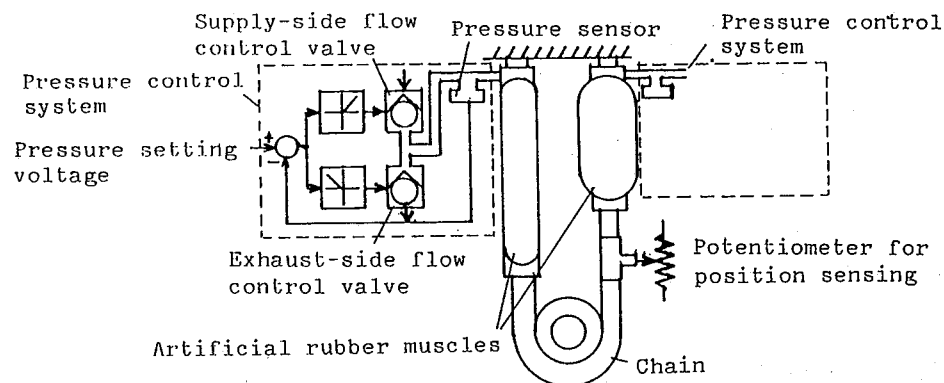


Fig. 5. Construction of drive system (for one axis).
空気圧制御系による駆動システム

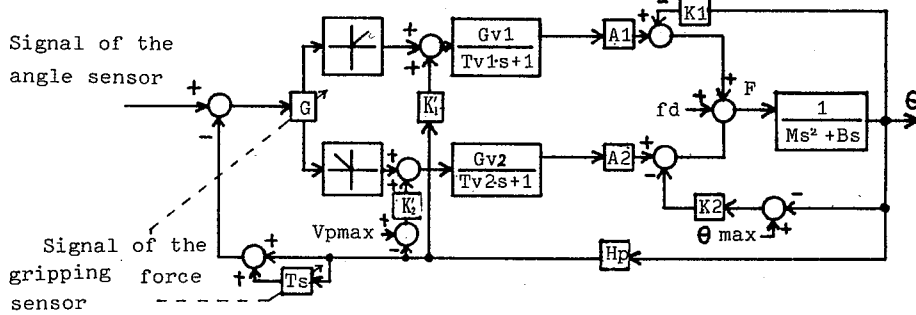


Fig. 6. Simplified control block diagram.
簡略化した制御ブロック線図

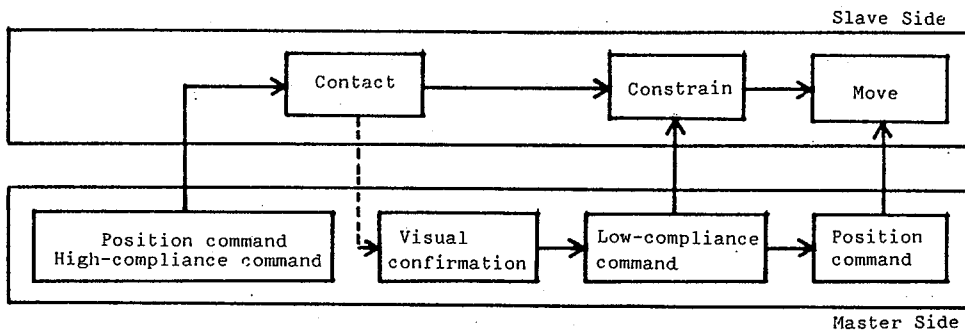


Fig. 7. Work relationship between master and slave.
マスタとスレーブの作業の関連

を連動制御することにより、圧力フィードバック系を構成する。本弁は供給圧力を 0.4 MPa (gage) とし、最大流量 0.4 m³/min の能力を持つ。また、ノーマルクローズ型弁であるため、電源遮断に対してマニピュレータは保持される。空気圧制御系においてはハイゲイン制御を行うことにより、高精度な静特性を有することを確認している。Fig. 5 に駆動システム⁹⁾(1 軸分)の構成を示す。

本マニピュレータシステムの簡略化した制御ブロック線図を Fig. 6 に示す。ここで、関節軸における角変位を θ 、発生力を F 、空気圧制御系の電圧—圧力変換ゲインを Gv_1 、 Gv_2 、人工筋の収縮量 θ における有効断面積を A_1 、 A_2 、アーム系の慣性モーメント、粘性摩擦係数をそれぞれ J 、 B 、電気回路の電圧ゲインを G 、角度センサの角度—電圧変換ゲインを H_p とする。空気圧制御系は一次遅れ系 (時定数 T_{v1} 、 T_{v2}) に近似できる。人工筋はそれ自体が弾性係数 (K_1 、 K_2) をもつが、これを K_1' 、 K_2' で消去し、 $Gv_1 A_1 = Gv_2 A_2 = Gv A'$ とすると、角度コンプライアンス $\Delta\theta/\Delta F$ は次式に近似できる。

$$\Delta\theta/\Delta F = 1/(A \cdot Gv \cdot G \cdot H_p) \quad (8)$$

したがって、ゲイン G を変化させることによりコンプライアンスを変化でき、この点で、本マニピュレータは可変ループゲイン形マニピュレータと言え、仮想的に柔らかさを作り出す高剛性マニピュレータのコンプライアンスとは根本的に異なる。また、ゲイン G の変化に伴い制御系の位相余裕が変化するため、微分補償

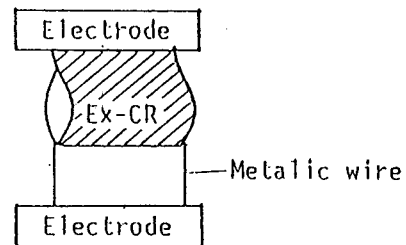


Fig. 8. Elbow angle sensor made of extensible conductive rubber (Ex-CR).
Ex-CR を用いた角度センサの構造

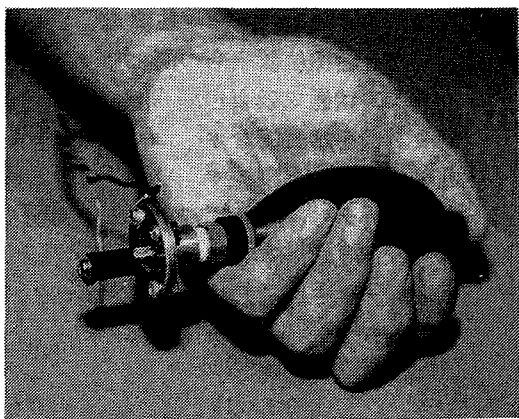


Photo. 1. Gripping force sensor.
握り力センサ

量TをGに連動させて制御系の安定化を図っている。

4.2 マニピュレータへの指令の伝達と制御

本マニピュレータシステムはマスタ・スレーブ方式を構成するが、一般にマスタ・スレーブ方式においては、力を感応情報としてマスタにフィードバックする機構を持つバイラテラル制御方式が採用される。この方式は、マニピュレータが物体に触れたときの力をオペレータに伝えるもので、物体との接触を回避するものではない。したがって、バイラテラル制御方式を採用しても高剛性マニピュレータを用いる限り、危険性は残る。

一方、コンプライアントなマニピュレータでは、それが本質的な柔らかさを持つので他物体と接触しても安全性は確保されており、操作の訓練は、安全とは無

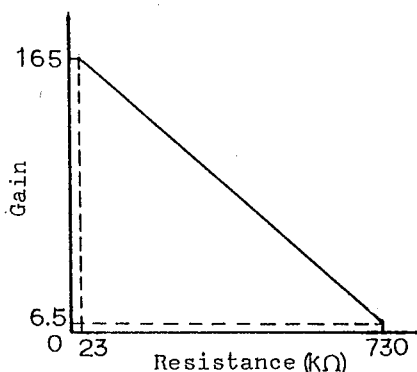


Fig.9. Resistance-gain characteristic of extensible conductive rubber (Ex-CR).
Ex-CR 抵抗—ゲイン特性

関係に操作のテクニックに集中される。また、特に人間の視覚に基づきマニピュレータを操作するため、位置的誤差は大きい。しかし、これはマニピュレータの柔らかさで対処できると考えられる。そこで、特に反力をマスタにフィードバックすることを必要とせず、本マニピュレータシステムはユニラテラル制御系で構成できる。

ユニラテラル系におけるマスタとスレーブマニピュレータの作業の関係を Fig. 7 に示す。

マスタ側の指令装置 (Fig. 4 における Ia) は空気圧マニピュレータを使用する場合、高い精度は要求されないため、オペレータの関節部に貼りつける伸張性導電ゴム (Ex-CR) を用いた簡単な角度センサを開発した。Fig. 8 にその構成を示す。

またコンプライアンス指令方式は人間が確認を伴った意識的行為を、人間にとって負荷の小さい動作として取り出すような握り力検知の方式とした。握り力に応じて、Fig. 4 における Ia は高剛性作動か低剛性作動に設定される。この装置は楕円球状ゴム中空体の一端に Ex-CR による圧力センサを取り付けたものである¹⁰⁾。Photo. 1 にその外観を示す。このゴム中空体の他端は開放されているので、マニピュレータの剛性を上げるためには意識的な動作として親指の遮蔽動作を要する。この動作は、Fig. 4 の C に相当する。ただし、確認 W を特に装置として用意しなかったのは、安全を確認し

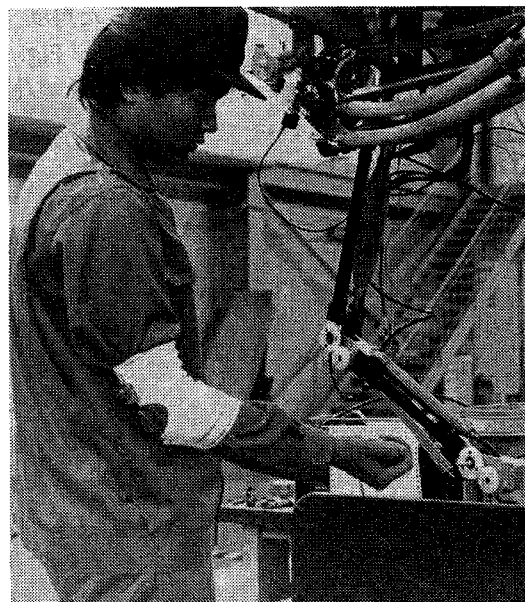


Photo. 2. Experiment being run
実験状況

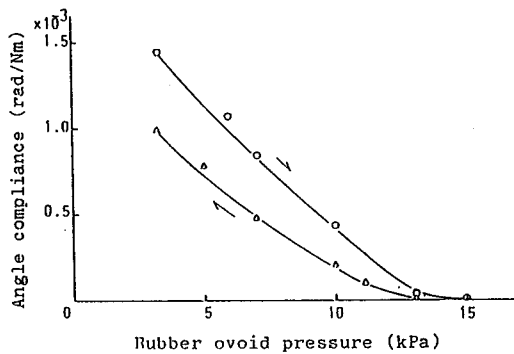


Fig. 10. Rubber ovoid pressure-angle compliance characteristic of grip force sensor
ゴム体内圧力-角度コンプライアンス特性

ないと高剛性動作の要求がなされないとする前提に立ったからである。したがって、装置 Ia は W と兼用される。

マニピュレータのコンプライアンスの調節は、この握り力センサの信号により、角度制御系の電圧ゲイン G を変化することにより達成される。但し、ゲイン G が極めて小さい場合、角度制御特性が劣るため、握り力に対するスレシヨルド（下限）を設けて、そのレベル以上で握らないとゲイン $G = 0$ となり、マニピュレータは弛緩したままとなる。また、操作性を考慮し、握り力の上限スレシヨルドを設け、それ以上のレベルで握ってもゲインは飽和するものとした。このスレシヨルド設定を Fig. 9 に示す。また、Photo. 2 は操作状況である。なお、ゴム体内圧力に換算した角度コンプライアンス特性（肘部）を測定したところ、Fig. 10 に示す結果を得た。ヒステリシスが 4.4×10^{-4} rad/Nm 生じたが、これは人間の曖昧さとマニピュレータ側の位置的誤差から許容される範囲内にあると考えられる。

4.3 インターロックシステムの評価

今回、構成したコンプライアンスに係わるインターロックシステムは、安全確認のためのアクティブな情報をオペレータ自らが出力していることになり、安全確認型インターロックと言える。このインターロックの条件となるスレシヨルドレベルは、親指の遮蔽という意志確認のためのデジタル的レベルと、ゲイン G によるアナログ的レベルを持ち、安全上極めて有効な手段といえる。また本来、Fig. 4 に示す 2 つの指令系統を同時に出力することは人間にとって難しいものであるが、両方とも、ゴム性のセンサを用いているため違和感なくオペレータから検出可能である。

本システムにおいては、オペレータのエラーに対して、作業対象物と目標位置指令の間に生ずる偏差を高コンプライアンス状態で吸収し、高剛性制御を誤って行わせる指令ミスを意識的なオペレータの安全確認によって対処している。高剛性マニピュレータを操縦する場合、オペレータは、絶えず安全状態を確認するため緊張を強いられるが、本システムにおいては、オペレータのミスが許容されるため、安全制御のための精神的、肉体的疲労は軽減し、操作効率の向上が期待できる。

5. 結言

遠隔操縦ロボットの操作は、オペレータにそのまま委ねられるため、人間の操作ミス、指令の曖昧さに対して、事前に十分考慮されたマン・マシンインターフェースシステムを構成しなければならない。人間の安全性の確保のためには、オペレータへの教育、安全管理、安全管理だけでは限界があり、先ず、人間の優位性という設計概念の基に安全設計されねばならない。つまり、人間の優位性に基づき、使用状況に応じた人間とロボット各々の機能配分を行い、マン・マシンインターフェースシステムにおけるインターロックを設けることになる。

基本的には、ロボット側からフェールセーフのアプローチ、人間側からフルプルーフのアプローチにより、マン・マシンインターフェースは構成される。その根底には、機械は必ず故障し、人間は必ずミスを犯すという考えがある。上記の 2 つのアプローチの達成が困難な場合でも、適応的ロボットを用いれば、人間の特性に合致した安全上有効なインターフェースが構成できることを示し、安全作業が遂行できる可能性を示した。

(昭和63年4月4日受付)

参考文献

- 1) 杉本旭, 蓬原弘一, 糸川壮一, 他: 安全対策の基本構造について, 第 19 回安全工学研究発表会講演予稿集, pp. 1~4 (1986)
- 2) 蓬原弘一, 杉本旭, 向殿政男: 安全制御の原理, 電気学会産業応用部門全国大会予稿集, pp. 171 (1987)
- 3) 杉本旭, 他: 安全確認型安全の基本構造, 日本機械学会誌投稿中 (論文 87-0971 A)
- 4) 杉本旭, 芳司俊郎: 産業用ロボットの安全装置に

- 関する研究, 第2回ロボット学会学術講演予稿集, pp. 65~66 (1984)
- 5) 杉本旭, 蓬原弘一, 山合陵一: “安全マットスイッチの開発と安全制御の論理”, 第4回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 357~358 (1986)
 - 6) 杉本旭, 蓬原弘一, 鈴木慎一郎, 他: “パルスレーダセンサの開発と安全制御の論理”, 同上, pp. 493~494 (1986)
 - 7) 蓬原弘一: “ウインドウ・コンパレータ論理積発振器の高信頼化技術への適用”, 電子通信学会研究会資料, R 84-15 (1984)
 - 8) 杉本旭: “空気圧マニピュレータの開発に関する研究 (第1報, 直動型流量制御弁の開発とその特性評価)”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 53, No. 495, pp. 2318~2324 (1987)
 - 9) 杉本旭, 鈴木慎一郎, 橋野賢, 他: “空気圧駆動介助ロボットの開発”, 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 647~649 (1987)
 - 10) 杉本旭, 深谷潔, 池田博康, 他: “空気圧式マニピュレータの開発に関する研究—マスタ情報に基づくコンプライアンス制御について”, 同上, pp. 641~643 (1987)