マン・ロボット協調作業型マニピュレータの基礎的研究*

(第1報, マン・ロボット協調マニピュレータの機構と制御)

福田 敏男^{*1}, 藤澤 佳生^{*2}, 新井 史人^{*1}, 室 英治^{*3}
星野 春夫^{*3}, 宮崎 貫志^{*3}, 大坪 和彦^{*4}, 上原 和雄^{*4}

Study on Man-Robot Cooperation Work-Type of Manipulator

(1st Report, Mechanism and Control of Man-Robot Cooperation Manipulator)

Toshio FUKUDA, Yoshio FUJISAWA, Fumihito ARAI, Eiji MURO,
Haruo HOSHINO, Kenji MIYAZAKI, Kazuhiko OTSUBO and Kazuo UEHARA

This paper deals with the mechanism and the control method of the man-robot cooperation work type of manipulator with four degrees of freedom aiming at the application to the construction field. Because of the coming labor shortage of the aging society in the near future, robots will be used in the construction fields more and more. To support robot operation, this study aims to develop a cooperation work type of robot to be controled easily by the direct teaching. The robot has the following features: (1) It has 4 D.O.F. and a parallel link mechanism. (2) It has a control sensor and a force sensor to cooperate with the operator and to control contact force between the robot and payloads or wall, etc. (3) The end effector of this robot has a vacuum system to carry payloads. (4) To make the operations of position control easy, the first arm is made flexible and also it has the bending vibration control system. With these features, this robot system makes it possible to carry heavy payloads easily and this system can be used for various kinds of work.

Key Words: Man-Robot Cooperation, Direct Teaching, Robotics, Vibration Control

1. はじめに

日本社会の高齢化に伴い, 今後, 建設・建築・土木現場等のさまざまな分野において労働力の不足が深刻な問題となるであろう。この問題を解決するために, ロボットの導入が今後ますます進むと予想される。現在のロボットは遠隔操作やティーチングにより動作するものがほとんどであるが, 人間とロボットの共存を考え, だれでも簡単に扱えるロボットが必要となるであろう。

そこで, 本研究では人間によるロボットのダイレクトティーチングが可能となるように, マニピュレータの先端に力センサである「操作用センサ」および「力制御用センサ」とペイロード運搬用エンドエフェクタ(本論文では吸着盤)を取付けたロボットシステムを提案する。このロボットはバイラテラル型遠隔制御⁽¹⁾におけるマスタとスレーブを一体化したシステムとも考

えられ, 従来, この種のロボットに関する研究報告は少ない。本研究で提案するロボットの動作方法は, マニピュレータ先端に取付けられた操作用レバーに操作者が力を加えることにより, 加えた力の方向および大きさを「操作用センサ」が検出し, 検出された力のベクトルと同じ方向にロボットが動くように各軸モータを回転するというものである。よって, 人間が視覚により現在のロボットの位置と目標位置との差を判断し, ロボットが目標位置に到達するまで操作用センサに力を加え続ければロボットを目標の位置まで運ぶことができる(ダイレクトティーチング)。

本研究で提案するマン・ロボット協調作業とは, 人間とロボットが同じ空間内で, 相互に補完し合いながらある一つの作業を行うことである。よって, 次のような特徴を持っている。人間が小さな力でマニピュレータの運動を操作用センサを用いて指示することにより, マニピュレータ側が重いペイロードを支持・運搬することができる。運転中は, 常にサーボロックが働いており, バランサの役目を果たしてくれるためペイロードを静止させるための力は要しない。

一方, 操作者が過大な入力をロボットに与えた場合は危険であるため, これを検知するためにエンドエフェクタとロボット本体の間に力制御用センサを取付け

* 平成2年11月2日 第8回日本ロボット学会講演会において講演, 原稿受付 平成2年11月15日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市中種区不老町1)。

^{*2} 名古屋大学大学院。

^{*3} (株)竹中工務店 技術研究所 (〒136 東京都江東区南砂2)。

^{*4} (株)小松製作所 技術本部 (〒210 川崎市川崎区中瀬3-20-1)。

る。力制御用センサを用いることで、操作者はペイロードや壁への過度な押さえつけ状態をロボット側からの反力を介して知ることができる。

このように、本研究で提案するロボットは、人間とロボットの協調に重点を置いているため、将来的には、建設作業用ロボット、ホーム用ロボット、医療用ロボット、輸送産業用ロボットなどに適用できると考えられる。

このような、ロボットを試作し、操作性の評価実験を行った。実験における操作性評価方法としては、ロボットに行わせる動作として四つの代表的な動作モードを選定し、各モードにおいて、操作用センサ出力フィードバックゲインを変化させた時の作業時間と人間が加える力の分散により操作性の評価を行うものとする。また、操作者の違いによる影響をみるために、別の被験者でも実験を行う。本論文ではこのようなマン・ロボット協調型マニピュレータシステムを提案し、その操作性について検討したので報告する。

2. ロボットの機構

2.1 ロボットの形態 本研究において試作したロボットは図1(a)に示すパラレルリンク形ロボットである。パラレルリンクの長所としては、モータを台座部に取付けることができるためアーム部の軽量化が

図1 ロボットの形態

可能となり、またそれによりモータの出力が小さくて済む点などがあげられる。台座とエンドエフェクタはベルト駆動とした。自由度は、エンドエフェクタ部に1自由度、アーム部に2自由度、台座部に1自由度の計4自由度である。目標とする作業に対しては、4自由度で満足できると考える。また、ペイロード運搬のために、エンドエフェクタの先端部に吸盤が取り付けられている。図2に実際に試作し実験に使用したロボットの写真を示す。また本研究で用いたロボットのアーム部の動作範囲を図3に示す。台座の回転可能範囲は -125° から 125° である。

2.2 センサシステム センサシステムは操作用センサ、力制御用センサおよび振動制御用センサから成っており、すべてひずみゲージを用いて構成した。操作用センサおよび力制御用センサの形状と座標系を図1(b)および図4に示す。この力センサは6軸用であるが、本システムでは、そのうちの4軸を利用している。力の検出方法はX軸方向に対しR1とR2を

図2 試作ロボット

A: Tip position of Arm 1

図3 動作範囲

使用し Y 軸方向に対し R7 と R10 を使用し Z 軸方向に対し R10, R9, R8, R7 を使用し Z 軸回り方向に対し R3, R4, R5, R6 を使用する。また、フレキシブルアームの曲げ振動制御のためにフレキシブルアームの根元にひずみゲージを 1 セット設置し、フレキシブルアームの振動制御用センサとして利用している。

3. センサのキャリブレーション

実際にセンサに加わった力とセンサ出力との関係を求める必要がある。センサ出力は各方向の力が干渉しあっているため、非干渉化マトリックスを使って力センサ出力を分離する必要がある。力センサに加える力とセンサ出力との関係から非干渉化マトリックスを求める。非干渉化マトリックスを求めるための計算式を以下に示す。

$$T = A \cdot \delta \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$T \cdot \delta^T = A \cdot \delta \cdot \delta^T \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$A = T \cdot \delta^T \cdot (\delta \cdot \delta^T)^{-1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、入出力データ数を n とし、

T : 力マトリックス ($4 \times n$)

δ : 出力マトリックス ($4 \times n$)

A : 非干渉化マトリックス (4×4)

図 4 センサシステム

である。() 内はマトリックスの次元を表す。 $n=20$ として、求めた非干渉マトリックスを以下に示す。

$$\begin{bmatrix} -0.156612 & -0.08457 & 0.358889 & 0.091618 \\ -0.155261 & -0.70635 & 1.141689 & -0.046185 \\ 0.045893 & -0.04268 & 0.964004 & -0.021426 \\ -0.030102 & 0.13972 & 0.110436 & 2.639536 \end{bmatrix}$$

この非干渉マトリックスにより力を各方向に分解できる。使用範囲内においては、加えた力とセンサ出力が比例すると考え荷重を計算できる。ただし、あまりに大きな入力に対してはゲージ部に残留ひずみが残るため、このマトリックスは適用できない。

4. ロボットの制御方法

4.1 操作用センサを用いたロボットの目標値の計算方法

実験ロボットの制御システムを図5に示し、図6に本システム全体のブロック線図を示す。 f_o は操作用力、 f_f は力制御用センサ出力、 f_R はロボットがオペレータに与える力である。操作用センサと力制御用センサからの信号を各モータにフィードバックして制御を行う。すなわち、各センサから出力されたひずみ信号をひずみアンプを通して A/D 変換器へ読み込んで処理し、処理された信号とエンコード出力に基づ

図 5 制御システム

図 6 ブロック線図

き、I/O ボードからモータドライバへパルスを出し、各モータを駆動する。操作用センサの出力 f_{x0} , f_{y0} によりエンドエフェクタの現在の座標に対する移動距離 ΔX , ΔY を計算し、 $\Delta\theta_2$, $\Delta\theta_3$ をヤコビ行列より求めてアームを動かす。また、操作用センサの出力 m_{z0} , f_{z0} を用いて、 $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_4$ を計算しエンドエフェクタと台座を回転させる。

以下 [I] [II] [III] に各軸の目標値の計算式を示す。

[I] アーム1, アーム2の目標値の計算方法:

$$\Delta X = K_{23} \cdot f_{x0} \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta Y = K_{23} \cdot f_{y0} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 K_{23} : ゲイン

f_{x0} : 操作用センサ X 軸方向の力

f_{y0} : 操作用センサの Y 軸方向の力

であり、

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

により、変化分 $\Delta\theta_2$, $\Delta\theta_3$ を算出する。ただし、

ヤコビ行列:

$$J = \begin{bmatrix} -a_1 \cdot \sin(\theta_2) & -a_2 \cdot \sin(\theta_3) \\ a_1 \cdot \cos(\theta_2) & a_2 \cdot \cos(\theta_3) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

a_1 : アーム1の長さ

a_2 : アーム2の長さ

θ_2 : X 軸方向とアーム1のなす角

θ_3 : X 軸方向とアーム2のなす角

[II] エンドエフェクタの目標値の計算方法:

$$\Delta\theta_1 = K_1 \cdot m_{z0} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

K_1 : ゲイン

m_{z0} : 操作用センサの Z 軸回りの力

[III] 台座の目標値の計算方法:

$$\Delta\theta_4 = K_4 \cdot f_{z0} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、

K_4 : ゲイン

f_{z0} : 操作用センサの Z 軸方向の力

なお、 $\theta_1 \sim \theta_4$ は、図1に示してある。

よって、以上の [I] [II] [III] により操作用センサによるダイレクトティーチングが実現できる。

仮想コンプライアンス制御⁹⁾によってもダイレクトティーチングと組立作業が可能であるが、数多くの異なった作業に対して、作業に応じた仮想コンプライアンスに更新する必要がある。本論文で提案するマン・ロボット協調作業によるダイレクトティーチングでは、人間の不十分な部分はロボットが補完し、ロボットが不十分な部分は人間が補完するという相互補完

性が高い特徴である。数多くの異なった作業を行う場合の制御系の安定性を考え、マン・ロボット協調作業によるダイレクトティーチングを用いた。

4.2 フレキシブルアームの振動制御

4.2.1 フレキシブルアームの利点と問題点

従来の研究によると、微妙なはめあい作業などを行うためには、機械コンプライアンス機構による方法と力制御による方法の2通りがある。本システムにおいては、RCCハンド機構⁶⁾とは異なるが、アームをフレキシブル化することでロボットに機械コンプライアンスを持たせることができ、また、人間側からの補完によりロボットにコンプライアンスを持たせることができる。本システムでは、エンドエフェクタとアーム間の力制御用センサを用いることで力制御ができるので、操作者によるコンプライアンスが対象物の剛性に対し不適であっても力制御系の安定性を保つことができる。

以上より、微妙なはめあい作業などは、操作用センサレバーを用い、マン・ロボット協調作業によりロボットを動作させることで実行可能である。しかし、一般に操作者によるコンプライアンスはあいまいであり、作業に合った適切なコンプライアンスの実現は難しく、微妙な位置決め制御が安定性の点から困難な場合が考えられる。このような場合においては、アームの柔軟性に起因する弾性変形のみにより作業を行うほうが作業のしやすさから考えて有利と考えられる。フレキシブルアームを用いたマン・ロボット協調制御により、機械的コンプライアンス機構と力制御が実現できるため、微妙なはめあいなどの作業が容易となり、また、対象物の剛性の変化に対しても、ロボットあるいは、対象物を壊すことを防止できる。しかし、アームをフレキシブル化することにより、アーム自身の弾性振動が問題となってくる。本実験では、図7に示す1リンクのフレキシブルアームを考え、 θ_3 を回転させるための入力 u による O 点回りの回転運動を考える。図7での中心剛体の慣性モーメントを一定とし、図1における Arm 1 のリンク外部のみを弾性体と考える⁽²⁾。

4.2.2 振動制御実験方法 アーム自身の柔軟性に起因する振動のアクティブ振動制御手法は各方面で提案されている^{(2)~(4)}。本研究で提案するマン・ロボット協調作業型マニピュレータにおいては図7に示すとおりロボットとオペレータが相互に結合した状態にあるため、振動制御入力としては(1) ロボット自身からの入力、(2) オペレータからの入力の2種が考えられる。本実験では、ロボットからの振動制御入力の

みによるフレキシブルアームの振動制御手法について考察する。ただし、フレキシブルアーム振動制御中は、振動制御用入力による位置の外乱によりロボットが操作者の意志に反し動作してしまうため、オペレータからの動作指令は零とする。

実験方法としては、ペイロードを吸盤で持ち、急に落下させる。本実験では、吸盤スイッチ OFF と同時に振動制御入力を自動的に加える。フレキシブルアームのたわみおよびたわみの動的変動成分をフィードバックしフレキシブルアームの曲げ振動を制御する。ただし、高次モードの不安定化を防ぐためにひずみゲージ出力にローパスフィルタをかける。また、カットオフ周波数は位相遅れが少なく二次モード以上を減衰するに十分な値とする。図 6(a) にフレキシブルアーム振動制御のブロック線図を示す。なお、フレキシブルアーム振動制御に用いた式を以下に示す。

$$u(t) = -K_a \cdot \varepsilon - K_b \cdot \dot{\varepsilon} \dots \dots \dots (10)$$

ただし、

$u(t)$: フレキシブルアームの振動制御入力

K_a : 位置フィードバックゲイン

K_b : 速度フィードバックゲイン

ε : 現在のひずみ

$\dot{\varepsilon}$: ひずみの差分

4・2・3 実験結果 振動制御有り、無しの場合の結果の比較を図 8 に示す。図 8 より、フィードバックをかけない場合は 3 秒を過ぎても振動が残ることがわかる。一方、ひずみとひずみ変化速度を同時にフィードバックする場合の 3 秒後では、ほとんど振動は残らない。この実験からわかる様に、ロボット自身からの入力により、ペイロード変化時に生じるフレキシブルアームの振動を制御することができる。

図 7 フレキシブルアームのモデル

4・3 力制御用センサを用いた制御

4・3・1 力制御用センサによる協調制御

ペイロードを吸着システムで持ち上げ組立作業を行う場合、過度にペイロードや壁などを押さえつけてしまい、モータに無理な負担をかけてしまうことがある。力制御用センサは、ペイロードや壁からの反力を検出することにより、過度な押さえつけを防止するためのセンサである。力制御用センサの構造は、操作用センサと同じ構造をしている (図 4)。

図 6(b) に示すように、力制御用センサの出力 f_f は、押さえつけの限界値 f_c を有するものとする。信号の流れとしては、

(1) $f_f < f_c$ の場合は、『人間→操作用センサ→ロボット→対象物』であり、力制御用センサ出力に制限されることなく、式(4)、(9)に基づいてロボットは動作する。

(2) $f_f \geq f_c$ の場合は、『対象物→力制御用センサ→ロボット→人間』というぐあいに信号が流れる。すなわち、 $f_f \geq f_c$ の間は、人間が操作用センサに加える力の方向と大きさに関係なく、出力が f_c 以下になるまで、ロボットはエンドエフェクタの座標系においてペイロードや壁からの反力を減少させる方向へ移動する。人間はロボットからの反力を感じることで、過度な押さえつけ状態を知ることができる。なお、力

(a) フィードバックしない場合

(b) フィードバックした場合

図 8 振動制御実験結果

制御用センサの値に基づいてロボットが移動するときの各軸目標回転角 $\Delta\theta_f$ の計算式を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} -K_f \cdot f_f \\ -K_f \cdot f_v \end{bmatrix} \quad (f_f \geq f_c) \dots\dots\dots (11)$$

ただし、

J : ヤコビ行列

K_f : 力制御用センサフィードバックゲイン

このように、本論文で提案するマン・ロボット協調作業型マニピュレータは、操作用センサと力制御用センサを用いることにより、人間とロボットとの協調作業が達成される。

4.3.2 実験方法および実験結果 壁やペイロードとの接触時の押さえつけ動作を例にとって、力制御用センサの値に上限値を与えロボットを動作させる場合と与えない場合の比較を行う。図9に力制御用センサを用いたペイロードのX軸方向(前方向)への押さえつけ実験結果を示す。図9の(a)に示すように力制御用センサに押さえつけの上限値を与えない場合はペイロードを過度に押さえ過ぎてしまっていることがわかる。しかし、(b)に示すように力制御用センサに押さえつけの上限値を与えロボットを逆方向に動作させることにより、対象物への過度な押さえつけを防止することができる。

この実験により力制御用センサはペイロード運搬・

(a) 力制御用センサの上限値無し

(b) 力制御センサの上限値有り

図9 力制御用センサを用いた押さえつけ実験

組立作業に対し非常に役立つといえる。

5. 操作性評価実験

5.1 基本動作モードの設定

操作性評価実験の目的は、(1) 操作者がロボットを扱う際に、最もロボットを扱いやすい操作用センサ出力フィードバックゲイン K_a が存在するかどうかを確認すること、(2) 操作用センサ出力フィードバックゲインの大小が操作性にどのような影響を与えるを確認することの二つにある。

例えば、ペイロードを地面から持ち上げる作業は、モード3とモード1を組み合わせることで行うことができる。このように、すべての作業は以下に示すモード1からモード4の動作に細かく分類できると考え、これらのモードを基本モードとし、操作性を評価するための最重要モードと考える。したがって、他の作業モードは、これらの基本モードを組み合わせることで合成することができる。複雑な作業に対しては、モードの使用回数に応じた重みを用い操作性の評価ができると考える。

基本動作モードを以下のように設定する。

モード1：手首回転運動

図10 基本動作モード

図 11 操作性評価実験結果 (被験者 A)

モード2：前後運動

モード3：上下運動

モード4：台座回転運動

なお、各モードを図10に示す。

5.2 実験方法 各モードにおいて、それぞれある幅を持った大きな力 F_b と小さな力 F_s でロボットを動作させる。ここで、 F_b 、 F_s は操作力であり図11、図12に示すそれらの範囲は、作業時間内における最大値と最小値である。このとき操作用センサ出力フィードバックゲインを変化させ「作業時間」と「力の分散」を用いて操作性の評価を行った。

作業時間 T_w とは一つの動作モードを1回行うのに要した時間であり、また、力の分散 σ_f^2 を、

$$\sigma_f^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{0i} - m_{f0})^2}{n} \dots\dots\dots (12)$$

で計算する。ここで、 m_{f0} は f_0 の平均値、 n は作業時間に要したサンプリング回数である。力の分散が操作力の平均値からの変動をあらわしていると考えられるため、力の分散が大きい時を操作がしにくいと評価した。大きな力と小さな力とは非常にあいまいであり個人個人によっても、また同一人物であってもその時の心体の状態によって違った値になるであろう。そこで、ここではそのような変動をある程度考慮するために、操作者が加える力に、“ある幅”をもたせて実験をした。また、それぞれのモードにおいて一つのゲインに対し4回実験を繰返し、その平均値を実験データとして用いた。実験をする際に被験者には大きな力あるいは小さな力で操作するように指示を与える。両被験者をA、Bとし、ともにロボットの操作に十分熟練した後、実験を行うものとする。

以上の実験は、被験者により結果が違ってくるのが予想されるので別の被験者についても実験を行う。ただし、ここでは、被験者Bの実験結果はモード2のみを例にとって示す。

5.3 実験結果 図11より、各モードとも小さいゲインでは作業時間が長い。逆にゲインが大きな場合は、作業時間は短い、ロボットが暴走的になりやすく、操作がしにくくなる。さらに、過度にゲインを上げ過ぎると作業時間が逆に長くなる。この原因はゲインを上げ過ぎたことにより、ロボットが発振しやすくなり、ロボットが扱いにくくなったため、作業時間が伸びたと考えられる。この操作の難易度を力の分散と作業時間のトレード・オフを行うことにより評価した。操作し易いゲインの条件は力の分散が小さく作業時間が短いということである。そこで、以下に示す式(13)

図12 操作性評価実験結果 (被験者B)

を用い評価値が最小となるようなゲインを操作しやすいゲインと考える。

操作性評価に用いた式

$$E = a_1 \sigma_f^2 + a_2 T_w \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 E ：評価値

σ_f^2 ：分散

T_w ：作業時間

a_1, a_2 ：重み係数

被験者Aによるモード2に関しては、重み係数 $a_1 = 1/0.3$ 、 $a_2 = 1/30$ としたとき、ゲイン $K_{23} = 0.05$ [cm/Volt] において評価値 E が最小となる。また、作業による違いをみるために、モード2について被験者Aと同じ実験を被験者Bが行った場合の実験結果を図12に示す。図12と図11(2)のモード2との比較から、個人差があるが、だいたい被験者Aと同じ傾向があることがわかる。以上により、本論文で示すロボットマニピュレータの操作性においては、個人差があるもののオペレータにとって操作しやすいロボットの制御ゲインがあることがわかった。この実験結果を基に、違った操作者に対する操作用センサフィードバックゲインを選ぶ際に参考になるといえる。

6. おわりに

本研究ではマン・ロボット協調型の新しいロボットを実際に試作し、ダイレクトティーチングによる位置

制御が可能であることを示した。センサについては力の干渉を防ぐために非干渉化マトリックスを用いて力を分解した。アーム部については、マン・ロボット協調作業における微小な位置決めを容易に行うためにアームの一部をフレキシブル化した。その一方で、ペイロードをはなした時のロボットアームの振動制御の有効性を確かめた。また、力制御用センサを用いることで、ペイロードや壁などを、過度に押さえつけることがなくなりモータに無理な負荷をかけないで済むことを実験で確かめ、マン・ロボット協調作業が可能であることを示した。操作用センサ出力フィードバックゲイン K_d を変化させた時の作業時間と力の分散を使い、マン・ロボット協調作業形ロボットの操作性を評価し操作用センサフィードバックゲインの大小が操作性に及ぼす影響について考察した。

文 献

- (1) 福田・谷江・光岡, マイクロマニピュレータの制御 (第1報, マイクログリッパの基本特性とバイラテラル制御の一方法), 機論, 53-493, C (1987), 1950.
- (2) 福田, フレキシブルロボットアームの制御 (第1報, 1, 2自由度系の位置決め時の振動制御), 機論, 51-468, C (1985), 2140-2144.
- (3) 福田・荒川, フレキシブルロボットアームの制御 (第2報, 2自由度連成系のモデル化と基本特性), 機論, 53-488, C (1987), 954-961.
- (4) 福田, フレキシブルアームの研究の動向, 日本ロボット学会誌, 6-5 (1988), 424-465.
- (5) 平林・杉本ほか2名, 多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御, 計測自動制御学会論文集, 22-3 (1986), 343-350.
- (6) Whitney, D. E. Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts, *ASME Jour. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 104-1 (1982), 65-77.