

6 軸マニピュレータの力制御

小出光男, 久野敏孝, 林知三夫

Force Control of a 6-Articulated Manipulator

Mitsuo Koide, Toshitaka Kuno, Chisao Hayashi

要 旨

ロボットによる作業の適用拡大を目指して、6 軸の力制御ロボットの開発を行った。現在までに提案されている力制御方式は、(1)位置と力を完全に分離して個別に制御するハイブリッド制御方式と、(2)位置と力を線形関係で関係づけて制御するコンプライアンス制御方式、の 2 つに分けられる。

ツール先端がワークに接触開始するまではコンプライアンス制御することでワークの位置誤差を吸収でき、接触開始後はハイブリッド制御することで正確な

力制御が可能になる。

今回開発した力制御方式は、2 つの方式の利点を生かせるよう 2 つの制御モードを滑らかに切り換えられるようにした。

試作した 6 軸力制御ロボットを用いて基本性能評価実験と応用作業時性能評価実験を行い、型磨き作業、水研作業、はめ合い作業等へ基本的に適用できることを明らかにした。

Abstract

Conventional force control methods for manipulators can be classified into two groups; Force/Position Hybrid control method and Compliance control method. In this report, we propose a new force control algorithm for a 6-Articulated manipulator, which enables continuous force control by using the two control methods alternately.

Also, we developed a 6-Articulated force control robot using this algorithm. And the experiments using this robot were made to evaluate the algorithms. The results of experiments demonstrate the effectiveness of the force control robot for grinding, polishing and fine insertion tasks.

キーワード

力制御, マニピュレータ, ハイブリッド制御, インピーダンス制御, コンプライアンス制御

1. はじめに

現在、工場内作業の自動化を進めるために、ロボットの大幅な機能の向上が求められている。従来からも、位置・速度を制御するロボットを応用し、様々なツーリングの工夫によって塗装、シーリング、パレタイジング、組み付け等々と自動化に大きく貢献してきた。他方、作業者の高齢化、3K職場の人員不足、高付加価値化等の課題を解決しうる自動化技術はまだ未熟である。本論文の開発技術のねらいは、これらの課題を解決しようとするものであり、従来の位置制御ロボットに、人間の腕と同じように力制御の機能を付加しようとするものである。力制御ができるようになると、一定押し付け力を必要とする磨き作業や、接触を伴う組み付け作業を、簡単なツーリングで行えるようになる。また、作業品質の向上も期待できる。

このため、10年程前から力制御ロボットの開発が内外で行われるようになり、ロボットの知能化を運動能力の面から進めるものとして、現在も精力的に続けられている。

今までに、多軸マニピュレータの力制御方式として各種のものが提案されてきた¹⁾が、大きく分けると、(1)位置と力を完全に分離して制御するハイブリッド制御方式^{2,3)}と、(2)位置と力を線形関係で関係づけて制御するインピーダンス制御方式⁵⁾がある。インピーダンス制御方式のなかで、簡易化したものとして、コンプライアンス制御方式⁴⁾がある。

ツール先端がワークに接触開始するまではコンプライアンス制御することで位置誤差を吸収でき、接触開始後はハイブリッド制御することで正確な力制御が可能となる。

本研究では、両方の制御方式を連続的に切り換えることを試み、それぞれの特長を生かした力制御系を構成することで、実用的な力制御を可能にするこゝろをねらった⁶⁾。

提案する制御方式の有効性を確認するために、実際に6軸力制御ロボットを試作し、力制御の基本性能評価を行った。また、応用作業として、磨き作業、はめ合い作業等への適用評価を行った。

本報告では、今までに開発した6軸力制御ロボットの制御手法について、世の中で行われている他の力制御手法 - (1)ハイブリッド制御法と、(2)インピーダン

ス制御法 - との関係について述べ、次に力制御系のハードウェア構成、ソフトウェア構成について記し、最後に、試作ロボットを用いた性能評価実験結果について報告する。

2. 力制御の基本式

2.1 本力制御方式の基本式

本6軸力制御ロボットの制御系の基本式は以下のようになっている。

ロボット手先での望ましい運動を、仮想粘性係数や仮想ばね定数を用いて、次の運動方程式の様に実現しようとする。

$$M_p \ddot{P} + D_d (\dot{P} - \dot{P}_d) + K_d (P - P_d) = -F + \alpha F_d - \alpha K_f (F - F_d) \quad (1)$$

ここで

P ; ロボット手先の位置・姿勢

P_d ; ロボット手先の目標位置・姿勢

F ; ロボット手先の発生力・モーメント

F_d ; ロボット手先の目標力・モーメント

M_p ; 手先座標系でのアーム実慣性行列

D_d ; 手先仮想粘性係数

K_d ; 手先仮想ばね定数

K_f ; カフィードバックゲイン

α ; 制御モード設定パラメータ ($0 < \alpha < 1$)

I ; 単位行列

である。 P , P_d , F , F_d などの座標系は、Fig.1に示す通りである。

本制御方式では、コンプライアンス制御とハイブリ

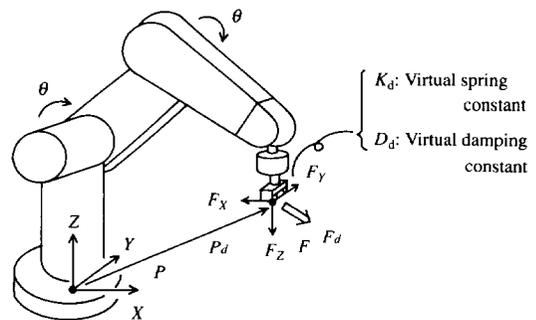


Fig.1 Coordinate system.

ッド制御を、連続的に滑らかに切り換えようとする。そのため、仮想ばね定数の設定と、位置/力制御の制御モードの設定を、同時に行うことが必要になる。これを実現するために、また、仮想ばね定数の設定と、仮想粘性係数の設定に共通のゲイン K_f を使うことで、ゲイン設定を簡易化するために、定数 K_{vh} , K_{fc} を用いて

$$D_d = K_{vh}(K_f + 1) \quad (2)$$

$$K_d = K_{fc} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) (K_f + 1) \quad (3)$$

と置く。式(2), (3)を式(1)へ代入して

$$\begin{aligned} M_p \ddot{P} + K_{vh}(K_f + 1)(\dot{P} - \dot{P}_d) \\ + K_{fc} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) (K_f + 1)(P - P_d) \\ = -F + \alpha F_d - \alpha K_f(F - F_d) \end{aligned} \quad (4)$$

を得る。 $\alpha = 1$ の時は式(4)は

$$\begin{aligned} M_p \ddot{P} + K_{vh}(K_f + 1)(\dot{P} - \dot{P}_d) \\ = -(K_f + 1)(F - F_d) \end{aligned} \quad (5)$$

となり、完全な力制御が実現できる。

また、 $\alpha \rightarrow 0$ の時は式(4)は

$$K_{fc} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) = K_{dmax} \quad (6)$$

として

$$\begin{aligned} M_p \ddot{P} + K_{vh}(K_f + 1)(\dot{P} - \dot{P}_d) \\ + K_{dmax}(K_f + 1)(P - P_d) = -F \end{aligned} \quad (7)$$

となり、ほぼ完全な位置制御となる。

$0 < \alpha < 1$ の時は、位置と力の混じったコンプライアンス制御となることを次に説明する。

$0 < \alpha < 1$ の時、 α が比較的1に近く、 K_f が十分に1より大きい時は、式(4)の右辺は

$$-F + \alpha F_d - \alpha K_f(F - F_d) \approx -\alpha(K_f + 1)(F - F_d) \quad (8)$$

と近似できる。ばね定数 K_d は、力の偏差 $(F - F_d)$ と位置の偏差 $(P - P_d)$ の比を表すものとするれば

$$K_d = \frac{F - F_d}{P - P_d} = K_{fc} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha^2} \right) \quad (9)$$

となる。

$0 < \alpha < 1$ の時、 α が0に近い場合は、式(4)の右辺は

$$-F + \alpha F_d - \alpha K_f(F - F_d) \approx -F \quad (10)$$

と近似できる。この場合のばね定数 K_d は、式(9)と同様に力と位置の比を表すものとするれば

$$K_d = \frac{F}{P - P_d} = K_{fc} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) (K_f + 1) \quad (11)$$

と近似できる。

このように $0 < \alpha < 1$ の時は、ばね定数 K_d を α で設定することが可能であり、力制御と位置制御の混じったコンプライアンス制御モードとすることができる。

実際には係数 α は直接設定するのではなく、

$$K_h = K_{fc} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) \quad (12)$$

を準仮想ばね定数として設定するようにする。こうすると、定数 K_{fc} と K_h を用いて α を

$$\alpha = \frac{K_{fc}}{K_h + K_{fc}} \quad (13)$$

として設定できる。

準仮想ばね定数は、目標仮想ばね定数の変化と対応しているが、真の設定ばね定数 K_h' は α が比較的1に近い時で

$$K_h' = K_h \frac{K_h + K_{fc}}{K_{fc}} \quad (14)$$

として設定されるので注意する必要がある。

仮想ばね定数は、Fig.2に示すように、ツール系で設定でき、仮想ばねを設定することで、あたかもツールがばねで支えられているかのような動きが可能になる。仮想ばねを大きくすると、サーボ剛性が上がり位置制御に近くなり、また、仮想ばねを小さくするほど力制御に近くなり、力が加わると力を小さくする方向

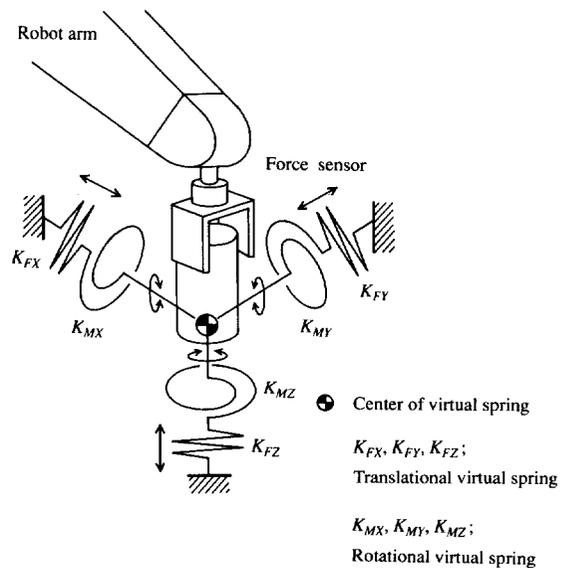


Fig.2 Virtual spring.

に動くような動きが可能となる。また、仮想ばね中心は、ソフトウェアで任意の位置に設定できる。

定数 K_{fc} の大きさは、準仮想ばね定数 K_h との兼ねあいで、ユーザが各成分ごとに任意に設定できるようにした。通常 K_{fc} は K_h の最大値 K_{hmax} よりかなり小さ目(1/10~1/20)に適当に設定する。

K_h と K_{fc} および α の関係を図示すると、Fig.3のようになる。

本制御方式ではFig.4に示すように

$K_h = 0$ の時は、 $\alpha = 1$ となり力制御モードとなる。

$K_h = K_{hmax}$ の時は、 $\alpha = 0$ となり位置制御モードとなる。

$0 < K_h < K_{hmax}$ の時は、 $1 > \alpha > 0$ となり力制御と位置制御の混じったコンプライアンス制御となる。

パラメータ K_h を調節するだけで、完全な力制御と位置制御をコンプライアンス制御を介して、滑らかに連続的に切り変えられる。

という特長を持つ。

コンプライアンス制御と、ハイブリッド制御を切り

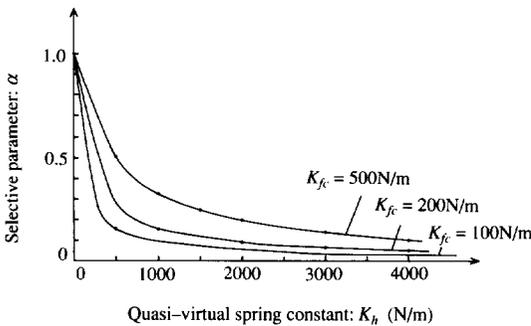


Fig.3 Quasi-virtual spring constant; K_h vs. selective parameter; α .

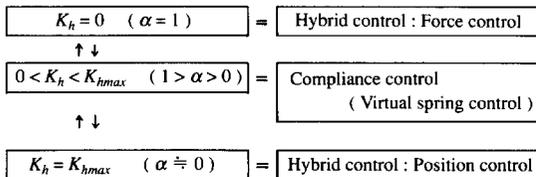


Fig.4 Mode change of force control.

換えて実行しようとする力制御方式も、最近、提案されるようになった⁷⁾。提案されている方式は、選択行列を用いるものであり、モード切り換え時の滑らかな移行を別途考慮する必要がある。本方式では一つのパラメータを調節するだけで、3つのモードを連続的に設定できるというメリットがある。

2.2 他の力制御方式との関係

力制御の手法としては、現在世の中で、ハイブリッド制御²⁾と、インピーダンス制御⁵⁾の2つの方法が主流として行われている。これらの方法と本方式の関係を調べてみる。

ハイブリッド制御との関係

前に述べた様に、 $K_h = 0$ ($\alpha = 1$) の時、本制御則は式(5)のようになり、完全な力制御に速度ダンピングを加えたものとなっている。

また、 $K_h = K_{hmax}$ ($\alpha = 0$) の時は、本制御則は式(7)のようになり、これはほぼ完全な位置制御に、速度ダンピングを加えたものになっている。

インピーダンス制御との関係

インピーダンス制御では、ロボット手先での望ましいインピーダンスを

$$K_d(P - P_d) + D_d(\dot{P} - \dot{P}_d) + M_d\ddot{P} = -(F - F_d) \tag{15}$$

として実現しようとする。ここで、 K_d は仮想ばね、 D_d は仮想粘性、 M_d は仮想質量でありいずれも手先のツール座標系で指定するものとする。

前掲の式(1)の右辺は、式(8)のように近似できるので式(1)は

$$\frac{M_p}{\alpha(1+K_f)}\ddot{P} + \frac{D_d}{\alpha(1+K_f)}(\dot{P} - \dot{P}_d) + \frac{K_d}{\alpha(1+K_f)}(P - P_d) = -(F - F_d) \tag{16}$$

となる。これを式(15)と比べると、本制御則では、仮想質量をカフィードバックゲイン K_f 、および、制御モード設定パラメータ α を通して設定する形となっていることがわかる。 K_f 、 α は同時に仮想粘性、仮想ばねにも影響を与える。 K_f または α を大きくすれば仮想質量が小さくなり、同じ力が加わっても軽く動くようになるが、同時に仮想粘性、仮想ばねも変わってしまうことに注意せねばならない。仮想質量を明示的に設定できないものとなっている。仮想粘性と仮想ばねの設定は、 D_d (式(2))、 K_d (式(3))を通して行うことができる。

すなわち、一応インピーダンス制御にはなっているが、仮想質量を意識して設定するものではなく、コンプライアンスの設定と、ダンピングの設定を行うことを目的とした制御法と言えるだろう。そこで、ここではコンプライアンス制御の一つとして扱うことにした。

3. 力制御系の構成

次に所望の運動を実現するための実際のコントローラを構成する。マニピュレータの運動方程式は一般に

$$M_p \ddot{P} + H_p(\theta, \dot{\theta}) = J^{-T} \tau - F \quad (17)$$

と表せる。ここで

$H_p(\theta, \dot{\theta})$; コリオリ力, 重力項などの非線形項, θ はジョイント角を示す

J ; ヤコビ行列

τ ; 各軸モータトルク

である。式(17), (12)を式(4)へ代入して, また非線形補償は重力補償 $G(\theta)$ だけを行うこととすると

$$\begin{aligned} \tau = & J^T K_{vh} (K_f + 1) (\dot{P}_d - \dot{P}) \\ & + J^T K_h (K_f + 1) (P_d - P) \\ & + J^T \alpha F_d + J^T K_f \alpha (F_d - F) + G(\theta) \end{aligned} \quad (18)$$

となる。ここで P_d, P などは直交座標系レベルであるが, 通常, ロボットはジョイント角レベルの情報しか持っておらず, このままの形で τ を計算すると膨大な計算量を要することになる。そこで, 計算を簡易化するために, ジョイント角レベルの現在値 θ , および目標値 θ_d を用いることが出来るようにする。そこで, ヤコビ行列 J を用いて

$$\dot{P}_d - \dot{P} = J(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (19)$$

$$P_d - P = \Delta P \quad J\Delta\theta = J(\theta_d - \theta) \quad (20)$$

と近似する。式(19), (20)を式(18)へ代入して

$$\begin{aligned} \tau = & (K_f + 1) J^T K_{vh} J (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \\ & + (K_f + 1) J^T K_h J (\theta_d - \theta) \\ & + (K_f + 1) J^T F_d - K_f J^T \alpha F + G(\theta) \end{aligned} \quad (21)$$

を得る。ここで

$$K_{v\theta} = J^T K_{vh} J \quad (22)$$

$K_{v\theta}$; ジョイントレベルの仮想粘性係数

$$K_\theta = J^T K_h J \quad (23)$$

K_θ ; ジョイントレベルの仮想ばね定数

とおくと,

$$\begin{aligned} \tau = & (K_f + 1) K_{v\theta} (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \\ & + (K_f + 1) K_\theta (\theta_d - \theta) \\ & + (K_f + 1) J^T F_d - K_f J^T \alpha F + G(\theta) \end{aligned} \quad (24)$$

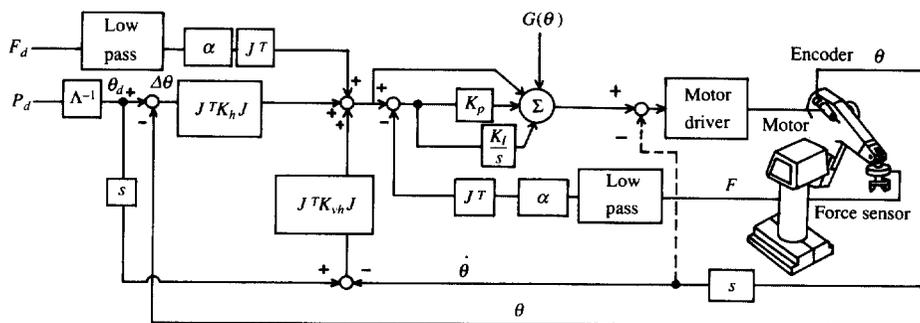
となり, ジョイント角レベルの角速度, および角度を用いることができるようになる。

力フィードバックゲイン K_f は, 比例ゲイン K_p だけではなく, 定常偏差を減らすため, 積分ゲイン K_i も若干加え

$$K_f = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (25)$$

とした。ここで s はラプラス変数を示す。最終的に式(24)を用いて, マニピュレータ手先での望ましい運動式(4)を実現する。

実際のインプリメントに当たっては, 各軸のトルクループサーボの安定性を確保するために, アナログの速度フィードバックも付加した。このため仮想粘性の設定は先の式(1)には完全には一致しない。また, カループ中にも, ノイズ除去と安定性を増すために, ローパスフィルタを設けた。最終的に用いた力制御系のブロック図をFig.5に示す。



Λ^{-1} ; Inverse kinematics

Fig.5 Block diagram of force control system. (dotted; analog velocity feedback)

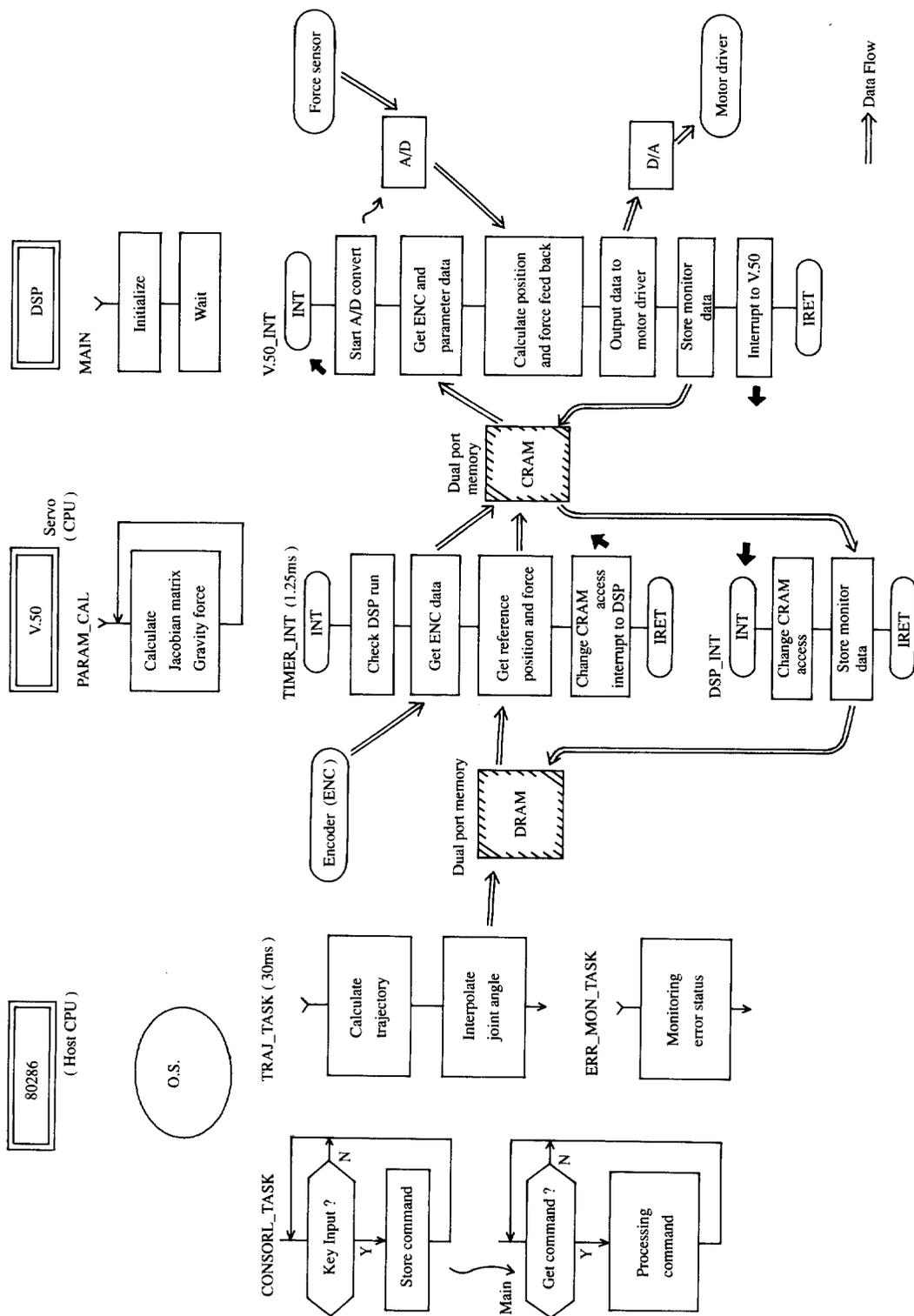


Fig.7 Software of force control robot.

ホストCPUのソフトはマルチタスク構成とした。

V.50とDSP間の通信タイミングは、ハード割り込みによって制御されている。各CPU間のデータ交換は共有メモリを介して行われる。

ホストサンプル周期は30ms、サーボサンプル周期(DSP)は1.25msとした。また、ヤコビ行列、重力補償などのパラメータ計算は50～60msごとに行い、マルチサンプル周期とした。

本力制御ロボットでは、動作の指令はロボット言語ではなく、コマンドで記述するようにした。コマンドはキーボードからユーザが打ち込むか、あるいは、あらかじめ、ディスク中にファイル(コマンドファイル)として作成しておき、メモリ中にロードして実行することもできる。

これにより、一連の応用作業での評価実験を行えるようにした。

また、水研等の磨き作業に必要とされる、離着陸動作をスムーズに行うため、

ティーチング点間で目標力、仮想ばね定数を変更できる。

力モニタリング機能を持ち、力のスレショルド値を指定することで、位置/力制御モードを切り換えることができる。

機能も備えるようにした。

5. 基本性能評価実験結果

開発した6軸力制御ロボットの有効性を確認するために、性能評価実験を行った。

性能評価実験は、(1)基本性能評価と、(2)応用作業時性能評価の2つに分けて行った。基本性能評価は一般的な性能指標を出すことを目的とし、応用作業時性能評価は、型仕上げ、水研作業といった、特定の作業への適用の可能性を検討するものである。

基本性能評価は、力の精度、安定性、ステップ入力応答、外部微い応答、の3つについて評価した。

力の精度の測定結果をFig.8に示す。目標力に対する絶対精度をロードセルを用いて測定した。0～19.6Nの範囲で、おおよそ誤差3%以内に入っている。ただし、4.9N時は誤差7%となっている。これは、定常的なオフセットが加わるために、力の小さい所では相対誤差が大きく現れたものと思われる。

一定目標力を与えた時の、長時間の押し付け力の安

定性に関しては、2時間の間で2～2.5N程度変動しており、特に力センサアンプの余熱時間が短いと、変動が大きくなった。精度、安定性はほとんどが力センサの性能に依存しており、性能を向上させるには、今後、力センサを改良していく必要がある。

指令値に対する応答の評価として、力のステップ入力応答評価実験を行った。その実験結果をFig.9に示す。硬い対象面(金属-金属接触)に対しても、柔らかい対象面(ポリウレタン面)に対しても、また、負荷重量の大小にかかわらず、安定に力制御可能で、いずれも0.5s以内に目標力に収束している。

また、外乱に対する応答の評価として、外部微い時の押し付け力の応答を測定した。この実験結果をFig.10に示す。外部微い応答は、外乱として押し付け対象面を±5mm、0.5Hzで正弦波状に動かし、目標押し付け力からの力偏差の大きさをで応答性を評価した。この場合、金属接触でも安定に力制御できており、力偏

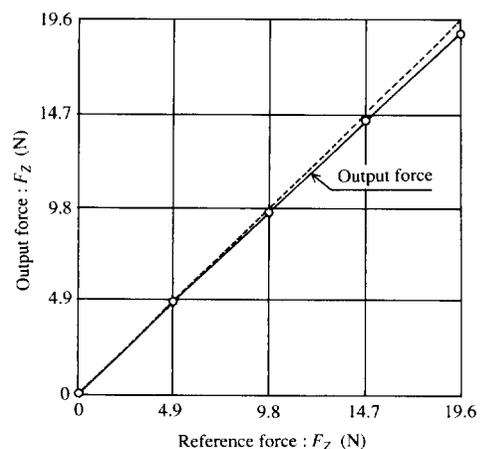
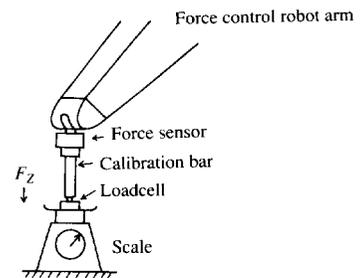


Fig.8 Static force response.

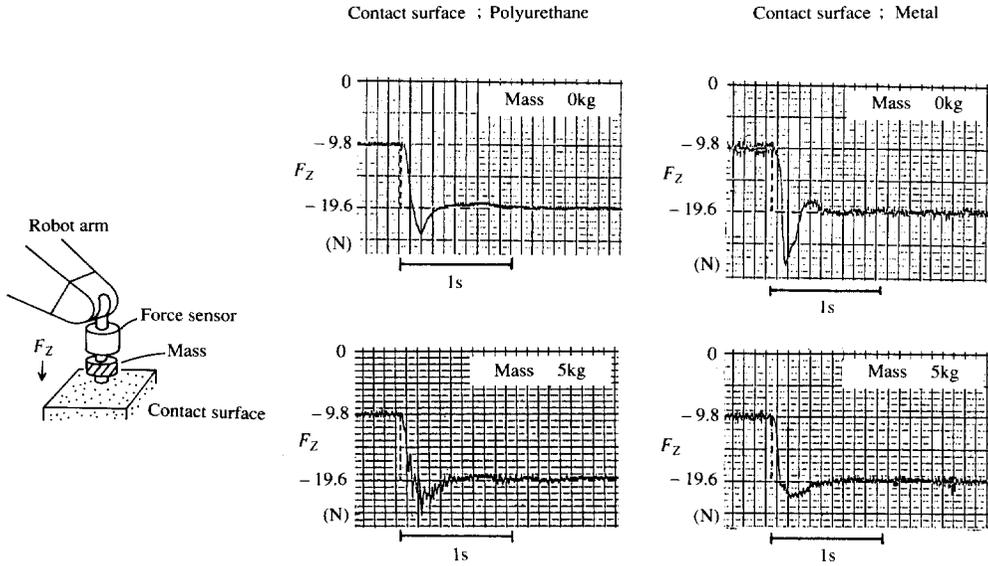


Fig.9 Force response to step input.

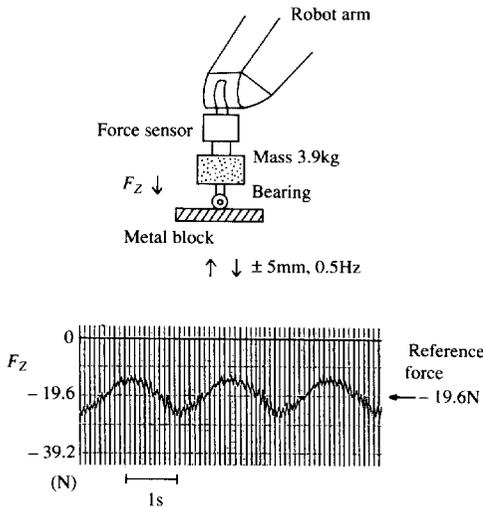


Fig.10 Force response to external constrained-plane moving.

差も ±5N以内となっており、平坦部の磨き作業に十分使える性能となっている。

6. 応用作業時性能評価実験結果

6.1 型仕上げ応用時性能評価

金型を模擬したテストピース，研磨ツールに相当す

るばね定数の金属板，および負荷を用意し，磨き作業の模擬動作を行い，力制御性能を調べた。

押し付け力の例をFig.11に示す。離着陸動作時には，仮想ばね定数を連続的に変化させ，位置から力制御，あるいは，力から位置制御への切り換えを行っている。送り速度3000mm/minで力偏差は ±2N以内となっており，また，離着陸時の力のオーバーシュートもそれ程大きくなく，平坦部の型仕上げ作業に十分適用できる見通しを得た。

6.2 水研作業応用時性能評価

自動車ボデーの局部水研作業を想定して，ボデー面の一部を対象に力制御ロボットで磨き作業を行った。

押し付け力の例をFig.12に示す。この場合は送り速度が40cm/sとかなり速いにもかかわらず，力偏差は ±9.8N以内となっており，水研作業にも使える見通しを得た。

6.3 精密はめ合い

Fig.13は自動車部品の精密はめ合いを模擬した実験である。この場合40μmのはめ合い精度であるが，6軸力制御の特徴である，モーメント制御およびモーメント中心をソフトで任意に設定できる特徴を有効に使うことで，位置ずれが ±1.5mm，軸の傾きが ±2° であってもはめ合いが可能であった。はめ合いは鉛直方向のみ

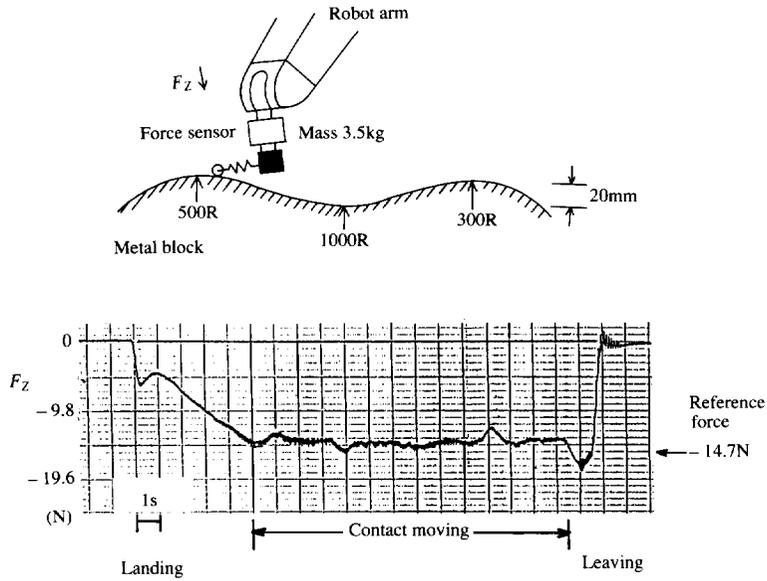


Fig.11 Force response to landing, contact moving and leaving process.

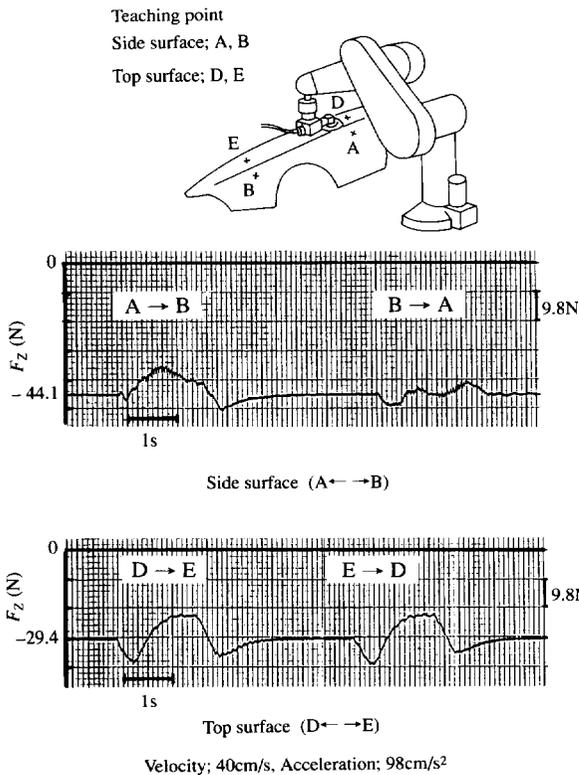


Fig.12 Force response to polishing task.

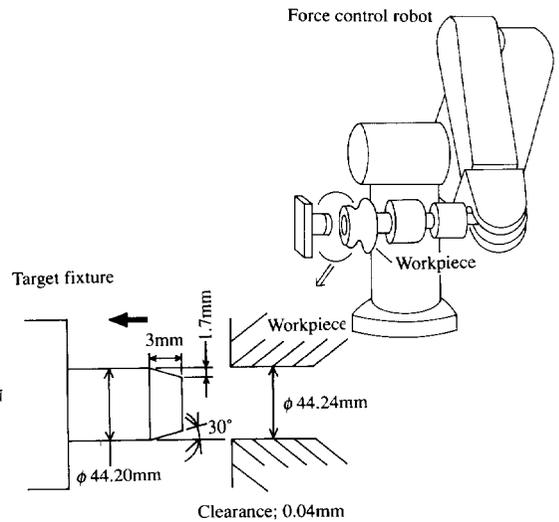


Fig.13 Experiment of fine insertion.

ならず、水平方向にも可能であった。ただし、はめ合いに要する時間が、1～5秒とかなりばらつくので、実用化のためには、短い時間で確実に作業を完了することが望まれる。

7. まとめ

力制御方式として、(1)位置と力を完全に分離して制御するハイブリッド方式と、(2)位置と力を線形関係で関係づけて制御するコンプライアンス制御方式、の両方の制御方式を連続的に切り換えることを試み、より実用的な力制御を6軸マニピュレータにおいて可能にした。

試作した6軸力制御ロボットを用いて、型仕上げ作業、水研作業、精密はめ合い作業等が行えることを示した。

現在は、試行錯誤的に制御系の諸パラメータを設定しているが、今後は、それらの設定限界を明らかにするとともに、作業に応じて最適なパラメータを自動的に設定できるようにすることが望ましい。

最後に、評価実験を行うにあたり協力いただいた多くの方々へ感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Whitney, D. E. : "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control", Proc. 1985 IEEE Conf. on Robotics and Automation, (1985), 262 ~ 268
- 2) Raibert, M. H. and Craig, J. J. : "Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulator", Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. and Control., 104(1982), 56 ~ 57
- 3) Khatib, O. : "A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators : The operational Space

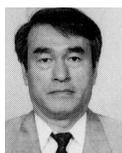
Formulation", IEEE J. Robot. Autom., RA3-1(1987), 43 ~ 53

- 4) Salisbury, J. K. : "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates", Proc. of the 19th IEEE Conf. on Decision and Control, (1980), 95 ~ 100
- 5) Hogan, N. : "Impedance Control Part 1- Part 3", Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. and Control, 107(1985), 1 ~ 23
- 6) 小出光男, 久野敏孝 : "6軸マニピュレータの力制御", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '90 予稿集, Vol.B, (1990), 45 ~ 46
- 7) 桂川敬史, 五百井清, 野呂治, 永田修 : "ハイブリッド・コンプライアンス/力制御による組み立て作業", 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1(1991), 43 ~ 44

著 者 紹 介



小出光男 Mitsuo Koide
 生年：1953年。
 所属：ロボティクス研究室。
 分野：ロボットマニピュレータの制御に関する研究・開発。
 学会等：計測自動制御学会，日本ロボット学会会員。



久野敏孝 Toshitaka Kuno
 生年：1939年。
 所属：システム1部。
 分野：ロボティクスに関する研究。
 学会等：日本機械学会，日本ロボット学会，計測自動制御学会会員。



林知三夫 Chisao Hayashi
 生年：1964年。
 所属：ロボティクス研究室。
 分野：ロボットマニピュレータの設計，ソフトウェア開発。