

空気圧人工筋2リンクマニピュレータによる力・軌道制御

Force and Orbit Control of 2-link Manipulator driven by Pneumatic rubber Actuator

○吉田説与(山形大院), 沼澤雅寿, 中野政身(山形大)

Nobuyoshi Yoshida, Masatoshi Numazawa, Masami Nakano
Dept. of Mechanical Systems Engineering, Yamagata University

キーワード: 空気圧人工筋(Pneumatic rubber Actuator), 2リンクマニピュレータ(2-Link Manipulator), 力と軌道(Force and Orbit), ハイブリッド制御(Hybrid Control), コンプライアンス制御(Compliance Control)

連絡先: 〒992 米沢市城南4-3-16 山形大学工学部機械システム工学科中野研究室
中野政身 Tel:(0238)26-3248, Fax(0238)26-3248, E-mail:nakan@mnaka.yz.yamagata-ac.jp

1. 緒言

人間とロボットの共存において、安全であることが第一の条件となる。そこで、本研究では、空気圧の圧縮性により大きなコンプライアンスを持つ、空気圧ゴム人工筋に着目し、これを用いた柔らかで安全なマニピュレータの実現を目指している。

これまで一般的な産業用ロボットは位置制御によって、手先効果器を指定した軌道に沿うよう制御されたマニピュレータである。これらのマニピュレータは、重力や慣性項、コリオリカなど非線形項の影響を極力排して高精度の位置決めを行うためにハードウェアの剛性を高めると同時にサーボ剛性も高めてある。しかし、こ

の時、位置制御しか行われていないと、マニピュレータの動作空間に対象物や人間等のあらかじめ位置の分かっていない障害物等があったときに、予期しない位置誤差により非常に大きな力が発生してしまう。これにより、マニピュレータ・障害物の双方に破壊などのよくない状況が起きてしまうことがある。このような事態を避けるために、手先の力を制御する方法をとればよい。この力制御の方法として、ハイブリッド制御¹⁾やインピーダンス制御²⁾などがある。

本研究では、空気圧ゴム人工筋によって駆動される平面2リンクアームを対象として、位置と力のハイブリッド制御及びコンプライアンス制御について実験と数値シミュレーションとの両

面から検討した結果を提示する。(4)(5)

2. 空気圧人工筋

2.1 リンクマニピュレータの構成

図1に空気圧ゴム人工筋によって駆動される2リンクマニピュレータシステムの構成を示す。実験ではブリジストン製の空気圧ゴム人工筋を使用した。また、コントローラはパーソナルコンピュータを用いソフトウェアによって実装しており、各関節の回転角をロータリーエンコーダ、またアーム手先に加わる力を2軸力センサによって検出できるようにしている。

まず、位置については関節変位をロータリーエンコーダによって検出し、カウンタボードを介してパーソナルコンピュータに取り込んでいる。また、2軸力センサの出力は、A/Dコンバータを介してパーソナルコンピュータに取り込まれ、力の大きさと方向が求められる。ま

た、パーソナルコンピュータからの操作量はD/Aコンバータによって電圧に変換され、分配器を介してサーボバルブに出力され、サーボバルブにより人工筋の内圧が制御され、アームの駆動とるが発生する。

2.2 空気圧ゴム人工筋

本研究で用いた空気圧ゴム人工筋とは、ブリジストンが開発した、マツキンベン型ゴム人工筋である空気圧式ゴム製アクチュエータ（商品名（RUBBERTUATOR）」）である。この空気圧ゴム人工筋は次のような特徴を持つ。

1. 高出力であり、収縮力は同じ径の空気圧シリンダと比べ、3~10倍である。
 2. 収縮率0%で最大収縮力を発生し、収縮率が増すにつれて収縮力が低下するバネ特性を有する。
 3. メンテナンスが容易である。
- また次のような短所を持っている。

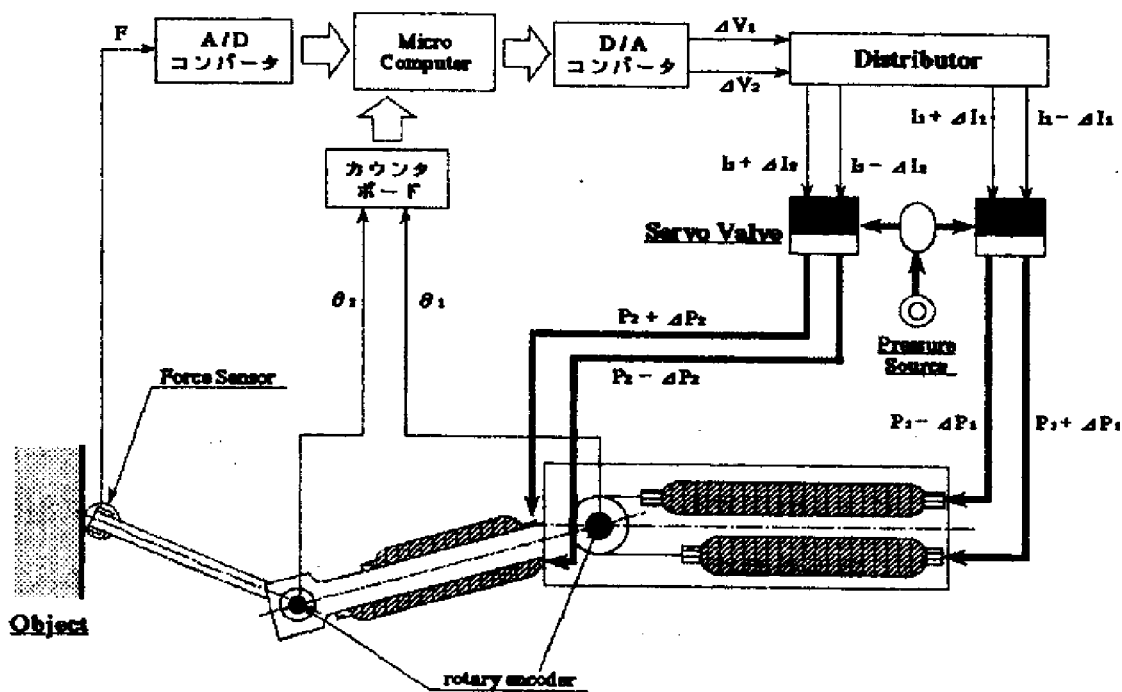


図1 空気圧人工筋2リンクマニピュレータシステム

1. ストロークが小さい。最大で収縮率 20%である。
2. 高精度、高速化のためのアクチュエータには不向きである。
3. 非線形・ヒステリシス特性を有する。これは、スリーブの繊維コードの伸び、コード間・コードとゴムチューブ間摩擦、ゴムチューブの弾性に起因している。

従って、空気圧ゴム人工筋は精度の高い位置決めを行わなければならないマニピュレータのアクチュエータには向かないが、空気圧ゴム人工筋を用いれば、ロボットアームの重量を非常に小さく抑えることができ、人工筋のバネ特性のため関節が柔軟になり、緩衝機能を持つ柔らかで軽量のロボットアームを構築する事ができる。

3. 空気圧人工筋 2 リンクマニピュレータの解析

3.1 空気圧人工筋の静特性

図 2 に示すように、空気圧ゴム人工筋は収縮率と共に収縮力が変化するバネ特性と内圧によって変化するコンプライアンス特性を有する。故に、マニピュレータの軸トルクは線形化により間接変位に関する項と人工筋の平衡圧力変化に関する項で近似でき、空気圧ゴム人工筋を用いたアームでは平衡圧力を変えることによりアームのコンプライアンスを変えることができる。

空気圧ゴム人工筋の収縮力と収縮率、内圧の関係は次式により近似できる。⁷⁾

$$F = \frac{\pi}{4} D_0 P \{ a(1-\varepsilon)^2 - b \} \quad (1)$$

ここで、 F は収縮力、 D_0 は人工筋の変形前の

有効径、 P は内圧、 ε は収縮率、 a, b は人工筋固有の定数である。

3.2 サーボバルブの圧力制御特性

空気圧人工筋サーボ系のモデル化にあたって、まず、各関節に用いた組み合わせのサーボバルブによる人工筋の圧力制御特性モデル化を行った。サーボバルブへの入力電圧と出力電圧の関係は次式で近似できる。⁸⁾

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{\omega_m^2}{S^2 + 2\zeta_v \omega_m S + \omega_m^2} \quad (2)$$

ここで、 ζ_v はサーボバルブの減衰係数及、 ω_m は固有振動数であり、第一関節では $\zeta_v=0.28$ 、 $\omega_m=52.6$ 、第二関節では $\zeta_v=0.28$ 、 $\omega_m=62.5$ となった。図 3 に実験結果及び式(1)で近似した結果を示す。また、手先拘束を受ける 2 リンクマニピュレータの運動方程式は、手先に発生する拘束力を ${}^c f$ とすると、

$$M\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + \tau_{fric} = \tau_{act} J_c^T {}^c f \quad (3)$$

である。ここで、 $M\ddot{\theta}$ は慣性項、 $h(\theta, \dot{\theta})$ は遠心力、コリオリ力、に相当する項である。また、 τ_{fric} は関節の摩擦によるトルク、 τ_{act} はアクチュエータ出力トルクを表し、 J_c は拘束座標系表現の手先位置のヤコビアンを示す。

3.3 ロードセルコンバータのローパスフィルタ

力センサからの出力を増幅しているロードセルコンバータにはノイズ除去のためローパスフィルタが内蔵されている。これを離散時間で行う数値計算上でミュレートするため等価な特性を持つデジタルフィルタを考える。入力を $x(t)$ 、出力を $y(t)$ とすると

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{(1+Ts)^2} \quad (4)$$

$$= \frac{\psi_n^2}{s^2 + 2\zeta\psi_n s + \psi_n^2}$$

ただし、 s は次式で表される

$$s = \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})} \quad (5)$$

また、式(5)を z について解くと

$$z = \frac{1 + (T/2)s}{1 - (T/2)s} \quad (6)$$

となる。この関係は、双線形変換である。双線形変換によるアナログフィルタからデジタルフィルタへの変換では、アナログフィルタの元の特性に対しデジタルフィルタのそれは歪みが現れることが分かっている。これを考慮すれば、元のパラメータ $\psi_n = 2.0$ 、 $\zeta = 0.70627$ を $\psi_n = 12.55$ 、 $\zeta = 0.70627$ に修正すれば元の特性に近いデジタルフィルタが得られる。このアナログフィルタとデジタルフィルタのボード線図を図4に示す。

4. ハイブリット制御

位置と力のハイブリット制御は、力の制御が必要な多くの作業においては位置を制御すべき方向と力制御すべき方向が混在することを考慮し、これらの位置制御と力制御を同時に行わなければならないという要求を満たす制御方式として提案されたものである。

このハイブリット制御を、空気圧人工筋2リンクマニピュレータにおける面做い作業、及びハンドル回転作業に適用し、その効果を実験と

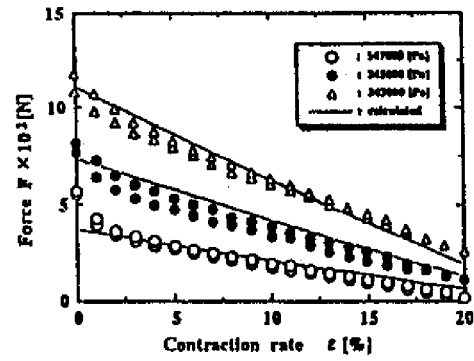


図2 空気圧人工筋の静特性

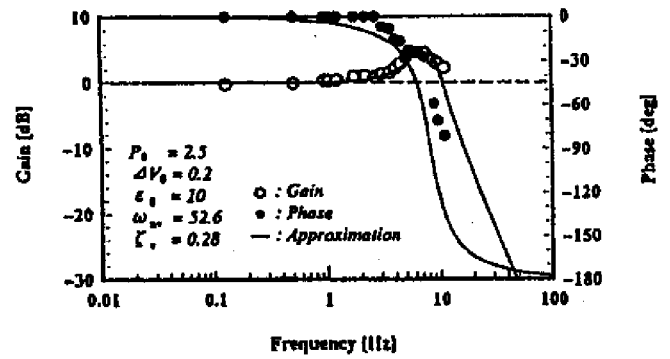


図3 サーボバルブの圧力特性

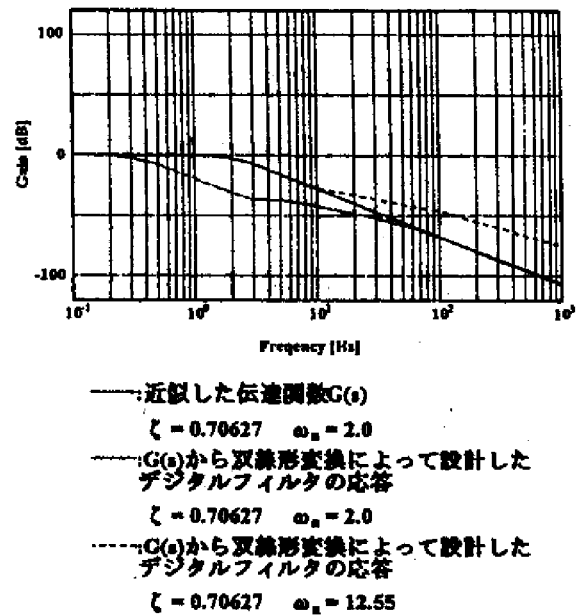


図4 デジタルフィルタとデジタルフィルタのボード線図
シミュレーションとの両面から検討する。

4.1 制御系の構成

拘束面の法線方向を X_c 軸、接線方向を Y_c 軸とする拘束座標系を定義する。2リンクマニピュレータにおいて、平面做い作業を行う場合、 X_c 軸方向を力制御方向、 Y_c 軸方向を位置制御方向

とする。拘束座標系表現の手先位置 ${}^c x$ と関節角 θ の関係が

$${}^c x = \Lambda(\theta) \quad (7)$$

で与えられるものとする。このとき位置目標値 ${}^c x_d$ 、力目標値 ${}^c f_d$ を与えると、それぞれの制御方向を考慮した誤差は、

$${}^c x_e(t) = S_y [{}^c x_d(t) - {}^c x(t)] \quad (8)$$

$${}^c f_e(t) = S_x [{}^c f_d(t) - {}^c f(t)] \quad (9)$$

で表される。ここで S_y, S_x は

$$S_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, S_y = I - S_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

で定義される方向選択行列である。従って J_c を関数 Λ のヤコビアン行列とすると、これらの偏差を関節座標系に戻した値は、

$$\theta_e(t) = J_c^{-1} {}^c x_e \quad (11)$$

$$\tau_e(t) = J_c^T {}^c f_e \quad (12)$$

で与えられる。 τ_e は関節トルクベクトルである。

よって、これらの位置誤差及び力誤差を補償するための関節駆動力をそれぞれ適当な位置制御則及び力制御則より求め、それらの和を各関節に印加する。すると位置目標値の Y_c 方向成分、及び力目標値の X_c 方向成分が達成されることが期待できる。

本研究では、位置制御則及び力制御則にPID制御則

$$u_P = K_{PP} \left(\theta_e + \frac{1}{T_{IP}} \int_0^t \theta_e(t') dt' + T_{DP} \dot{\theta}_e \right) \quad (13)$$

$$u_F = K_{FP} \left(\tau_e + \frac{1}{T_{IF}} \int_0^t \tau_e(t') dt' + T_{DF} \dot{\tau}_e \right) \quad (14)$$

を用いて、位置制御則による操作量 u_P 、力制御則による操作量 u_F の和を各関節に印加している。すなわち、位置誤差及び力誤差それぞれの偏差から求めた操作量は明らかに制御方向しか持たず、これらの和を印加する事で両目標値に追従する事が予想される。よって位置と力のハイブリッド制御のブロック線図は図5のようになる。

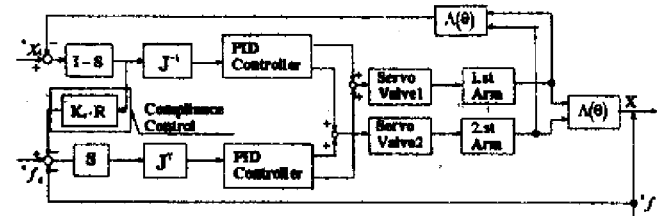


図5 位置と力のハイブリッド制御及びコンプライアンス制御のブロック線図

4.2 実験結果及び考察

空気圧人工筋 2 リンクマニピュレータに面做い作業を行わせたところ、位置制御だけでは、位置目標値と実際の拘束面との間に微少な誤差しかない場合でもアームの手先は拘束面に対して非常に大きな力を発生した。これは、アームの慣性によって平面とアームの手先の間で発生する拘束力、及び位置目標値と実際の拘束面との間の微少な位置誤差により発生する拘束力であると考えられる。

しかし、位置と力のハイブリッド制御によって、アーム手先を面に沿って動かしながら面に対して一定の力が加えるように面做い作業を行わせた結果、位置目標値の拘束座標系原点や拘束座標系の傾き θ_c と実際の拘束面との間に多少の誤差

があった場合でも Xc 方向はその力目標値に追従しながら、Yc 方向には位置制御だけの場合よりなめらかに位置目標値に追従した。これは、ハイブリッド制御によれば面倣い作業のような場合、アームや拘束面の位置設定が多少ラフになっても滑らかな作業を行うことができることを表している。

次に、ハンドル回し作業について、位置制御のみ場合の実験を行った。位置制御のみの場合では、面ならい作業と同様に位置誤差に伴い思わぬ大きな力を発生してしまう。そこで、位置と力のハイブリッド制御によって、ハンドル回し作業を行わせた。ハイブリッド制御によるハンドル回し作業の場合、ハンドルの回転方向に位置制御を選択し、軌道円の法線方向に力制御を選択して、ハンドルを目標通りの速度で回しながら、ハンドルを引っ張る方向には無駄な力を出力しないようにして、ハンドル回し作業を行わせた。その実験結果とシミュレーションの結果を図 8、図 9 に示す。

このように、ハンドル回し作業においても位置と力のハイブリッド制御によれば不必要に力を出力することなく、ハンドルをなめらかに回転させることができた。また、力目標値は変えずに、荷重を変化させて実験を行った結果、荷重が目標力以下ならば大きな力を出力することなく予定通りの時間で、うまく作業を行わせることができた。

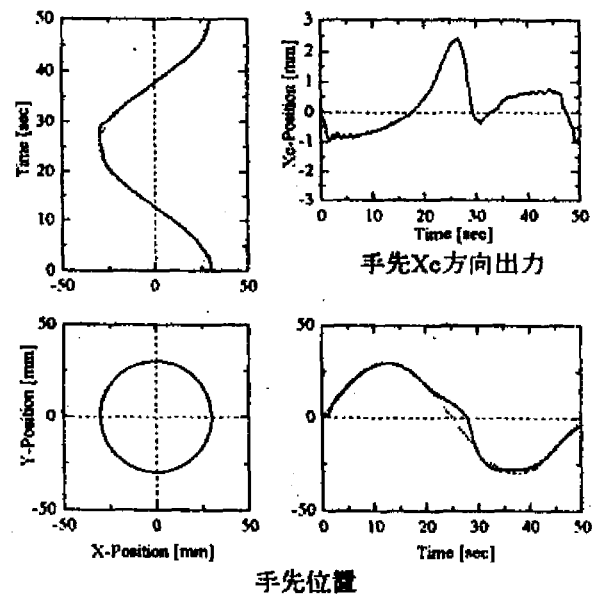


図 7 位置制御によるハンドル回し作業

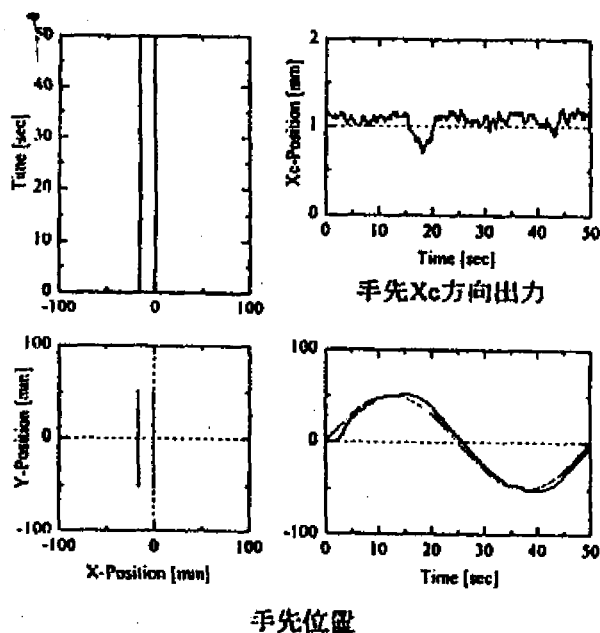


図 6 ハイブリッド制御による面倣い作業

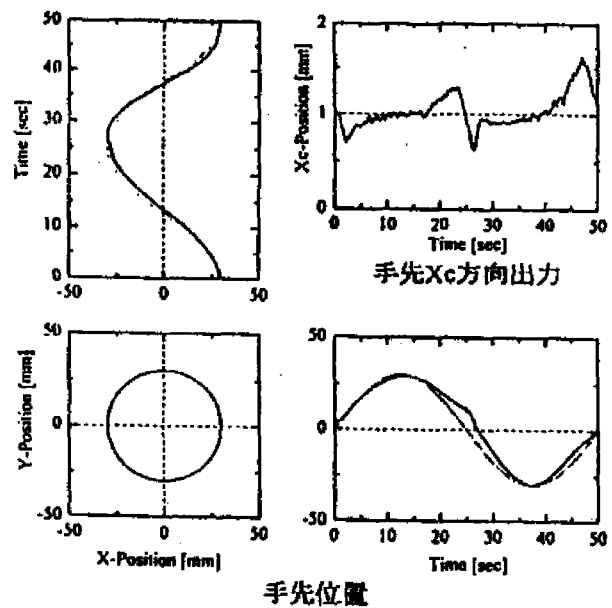


図 8 ハイブリッド制御によるハンドル回し作業の実験結果

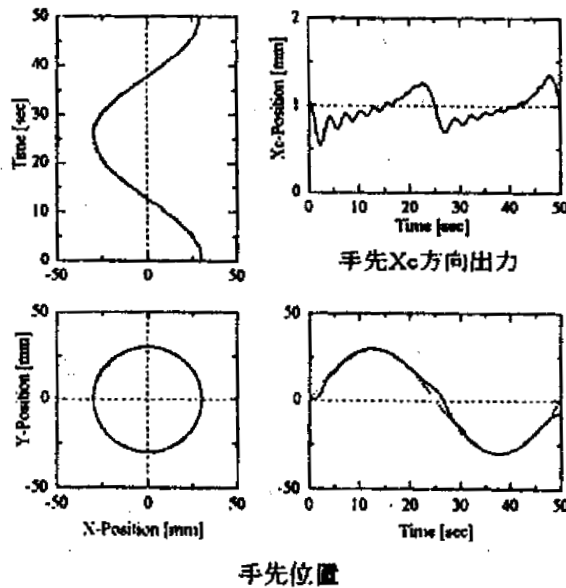


図9 ハイブリット制御によるハンドル回し作業のシミュレーション結果

5.コンプライアンス制御

5.1 コンプライアンス制御法

本研究で提示するコンプライアンス制御とは、マニピュレータの手先があたかも柔らかさ（コンプライアンス）を持つかのように制御しようとするものである。

コンプライアンス制御法とは、位置制御方向と力制御方向を同時に行わせて、その方向の手先コンプライアンスを任意に変化させようというものである。

拘束座標系 X_c 軸、 Y_c 軸両方向に対して位置制御と力制御を行うとすると、その制御方向を考えた誤差は

$${}^c x_e(t) = I [{}^c x_d(t) - {}^c x(t)] \quad (15)$$

$${}^c f_e(t) = I [{}^c f_d(t) - {}^c f(t)] \quad (16)$$

となる。これらの偏差を式(8),(9)によって関節座標系に変換する。そして式(10),(11)によって操作量を決定するものとする。

また次式に示すように空気圧人工筋のコンプ

ライアンス特性により位置誤差に比例して力の定常偏差が発生してしまうことが分かる。

$${}^c f_e = -\frac{((J_c)^{-1})^2}{K_I} {}^c x_e = R^c x_e \quad (17)$$

ここで、 K_I は位置制御及び力制御におけるPIDパラメータの積分ゲインの比

$$K_I = K_{IF} / K_{IP}$$

である。手先のコンプライアンスは、アームの姿勢及び積分ゲインの比によって定まるから、この積

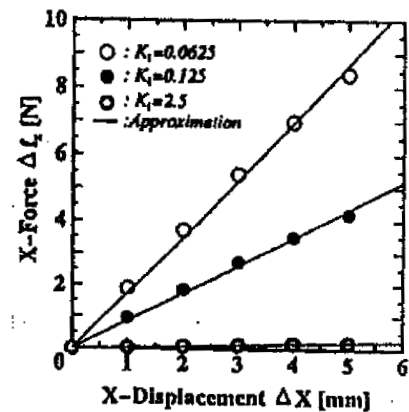


図10 位置偏差と手先出力の関係

分ゲインの比を変化させることにより図10に示すようにコンプライアンスの制御ができる。

また位置偏差によって出力される余分な力を式(17)によって算出することができる。この点に着目すると、力目標値から余分に出力される力を差し引くことにより、新しい力目標値 ${}^c f_{xr}$ を定め制御する事で余分な力を出力しないようにする。

$${}^c f_{xr} = {}^c f_{xd} - R^c x_e \quad (18)$$

そこで、この差し引く値に、任意の係数 K_c を掛けてから、力目標値から差し引くことで手先に任意のコンプライアンスを与えることができる。

$${}^c f_{xr} = {}^c f_{xd} - K_c R^c x_e \quad (19)$$

K_c を 1 とすれば位置偏差が生じても目標値

通りの力が出力されるため、コンプライアンスは非常に大きくなる。また、負の値にとれば位置偏差が少しでも生じれば新たな力目標値が元の力目標値よりも大きくなり、手先は非常に大きな力を発生してしまうため、コンプライアンスは小さくなる。この方法を目標力可変のコンプライアンス制御と呼ぶこととし、この方法によるコンプライアンス制御のブロック線図を図5に示す。

5.2 実験結果及び考察

まず積分ゲインの比を変える場合、面の法線方向すなわち、 X_c 軸方向のコンプライアンスを制御する。そこで、 X_c 軸方向には位置と力、両方の制御を行い、 Y_c 軸両方向には任意の位置に手先がとどまるように位置制御を行う。

ある位置座標を与え、一定の力目標値を与えておく。また、拘束面は X 軸に対して垂直に置く。その後、位置目標値をステップ状に変化させた時の実験結果を図10に示す。 X_c 方向の位置誤差に比例して余分な力を出力することが分かる。また積分ゲインの比 K_I を大きくするとコンプライアンスが大きくなり、積分ゲインの比 K_I を小さくするとコンプライアンスが小さくなった。このように積分ゲインの比を変えることによって手先のコンプライアンスを任意に変えることができる。しかし、コンプライアンスを大きくしてしまうと位置制御が弱まり Y_c 方向の位置目標値に追従しなくなってしまう。またコンプライアンスを小さくすると、力制御が弱まり力目標値に追従しなくなってしまう。

この方法では、PID パラメータを変化させてしまうため、コンプライアンスを変化させると系の動特性も同時に変化してしまい、位置の追従性が犠牲になったり、力目標値の変化に追従できなくなったりする。

目標力可変の方法で位置目標値をステップ状に変化させた実験結果を図12に示す。図から分かるように、目標値可変の方法によれば、重み係数 K_c を変えることで手先のコンプライアンスを変えることができる。また積分ゲインを変える方法と異なり PID パラメータを変えずに目標力を変えているだけであるのでコンプライアンスを変えても系の動特性は変わらず、手先のコンプライアンスを制御する事ができる。

次に、コンプライアンス制御によってハンドル回転作業を行った。この場合アームの手先軌道円の接線方向、すなわち Y_c 軸両方向に位置と力の両方の制御方向とし、アームの手先軌道円の法線方向、 X_c 軸方向には力制御とする。実験及びシミュレーションを行った結果を図13、図14に示す。図より、位置誤差が生じたところで、手先の出力が大きくなっているが、位置制御のみの場合と比べると、不必要な力を出力することなくハンドル回し作業を行うことができた。また、コンプライアンス制御によるハンドル回し作業では、ハンドルに加えた負荷トルクと負荷トルクによってハンドル先端にかかるであろう Y_c 軸方向の目標力に誤差を生じさせて、作業が行えるか実験を実施した。その結果を図15(a)から(c)に示す。図15(a)では、ハンドルに加えた負荷トルクと Y_c 軸方向の目標力は同じ値であ

るのでほぼ目標通りに作業を行うことができた。また、図(b),(c)の様に Y_c 軸方向の目標力に誤差が生じた場合でも、 Y_c 軸方向の目標力と負荷トルクに多少の誤差が在った場合でもうまく作業を行うことができた。

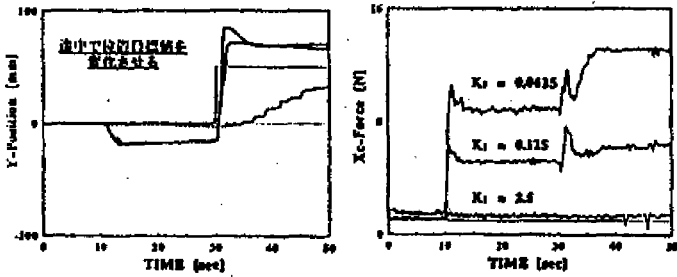


図 11 積分ゲインを変える方法のコンプライアンス制御

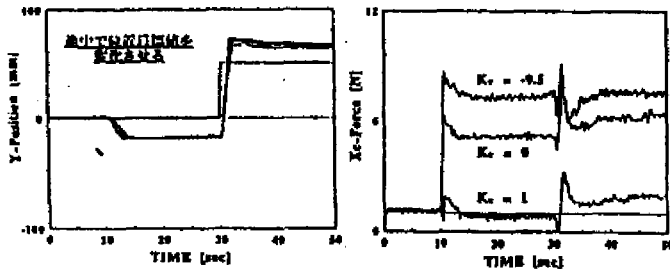


図 12 目標力可変の方法のコンプライアンス制御

6 結言

位置と力のハイブリット制御によって面倣い作業を行ったところ、拘束面の接線方向を位置制御方向、法線方向を力制御方向と選択する事により拘束面の位置設定に多少のずれが生じていても拘束面に対し不必要な力を出力せず、滑らかな作業を行わせることができた。ハンドル回転作業において、ハンドル先端の軌道円の接線方向を位置制御方向、法線方向を力制御方向と選択する事により滑らかにハンドル回し作業を行えた。25,50[sec]前後で位置制御の遅れが大きくなっているがこれは、第一関節がほぼ停止し第二関節の運動だけでハンドルを回して

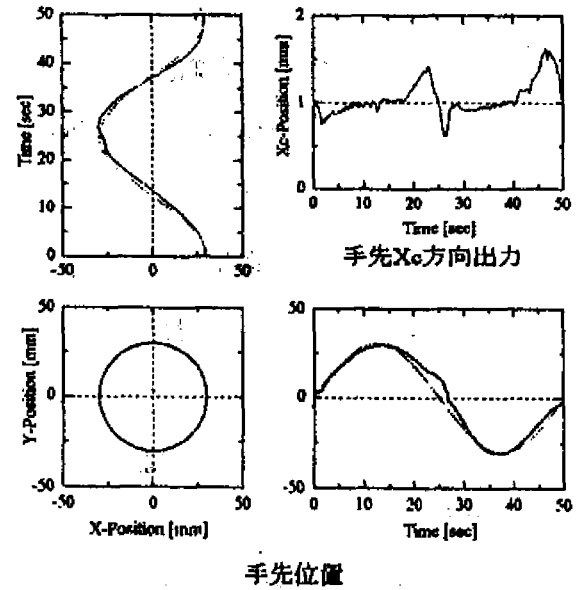


図 13 コンプライアンス制御による回転作業の実験結果

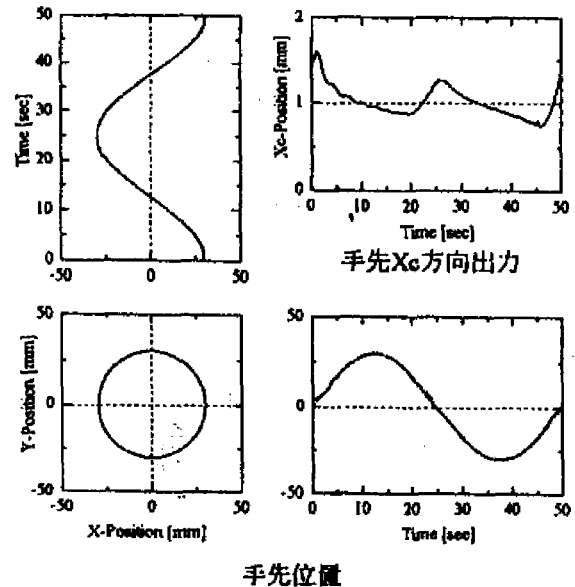


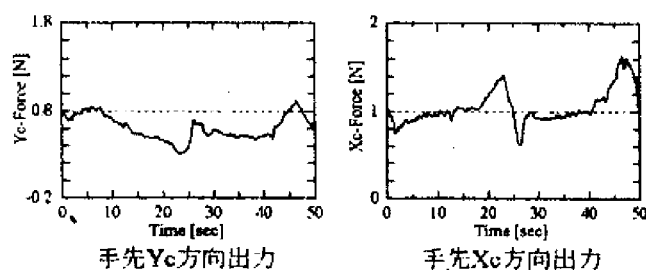
図 14 コンプライアンス制御による回転作業のシミュレーション結果

いるために起こるものであろうと思われる。

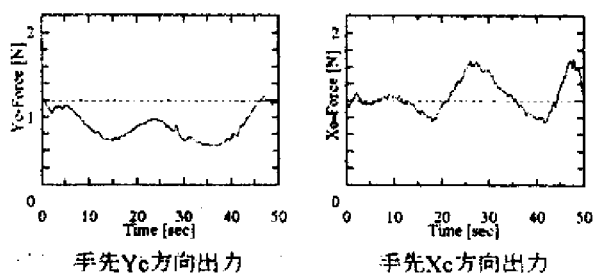
コンプライアンス制御による面倣い作業では、面の法線方向に位置と力の両制御を行い、かつ、接線方向に力制御を行うことによってコンプライアンスの制御を実施した。積分ゲインの比を変える方法では、任意にコンプライアンスを変えることができたが、同時に系の動特性も変化してしまった。目標力可変の方法では系の動特性を変えることなくコンプライアンスを任意に

変化させることができた。

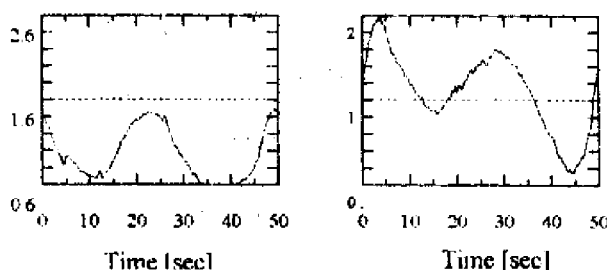
コンプライアンス制御によるハンドル回し作業を行う場合、 Y_c 軸方向の力目標値はおもりによって与えている負荷によってハンドル先端にかかるであろう Y_c 軸方向の力(負荷 100[g]の場合 0.8[N]) もしくは、それより多少大きめの力を Y_c 軸方向の力目標値にするとうまく作業を行う。それより小さい場合にはハンドルは逆転してしまい作業を続けることができなくなってしまう。また、力目標値が大きすぎる場合にはハ



(a) (X_c 軸目標力, Y_c 軸目標力)=(1, 0.8) [N], 負荷トルク 0.8[N]



(b) (X_c 軸目標力, Y_c 軸目標力)=(1, 1) [N], 負荷トルク 0.8[N]



(c) (X_c 軸目標力, Y_c 軸目標力)=(1, 1.6) [N], 負荷トルク 0.8[N]

図 15 コンプライアンス制御による回転作業の手先出力

ンドルの回転が目標より進みすぎてしまい実際の拘束座標系と目標値としての拘束座標系との間の傾きが余りにも大きくなりハンドルが突然反転してしまうなどの予期しない動作が起こり作業を続けることが不可能になる。

参考文献

- 1) M.H. Raibert and J.J. Craig : Hybrid Position/Force Control of Manipulator, ASME Journal of DSC, 103-2, 126/133 (1981)
- 2) H.Hogan : Impedance Control, An Approach to Manipulation, Part I~III, ASME Journal of DSC, 95/100 (1980)
- 3) 武富康宏: 空気圧人工筋 2 リンクマニピュレータの位置と力のハイブリッド制御, 山形大学大学院、平成 4 年度修士学位論文 (1993)
- 4) 浦下勝秀: 空気圧人工筋 2 リンクマニピュレータの位置と力のハイブリッド制御, 山形大学大学院、平成 5 年度修士学位論文 (1994)
- 5) 中野, 浦下, 横野 (=沼澤) : 空気圧人工筋 2 リンクマニピュレータの位置と力のハイブリッド制御, 計測自動制御学会東北支部 30 周年記念学術後援会予稿集, 計測自動制御学会、189/190 (1994)
- 6) 沼澤雅寿: 空気圧人工筋 2 リンクマニピュレータによる力・軌道制御 山形大学大学院、平成 7 年度修士学位論文 (1996)
- 7) ブリジストン: ラバチュエータとロボットへの応用, 技術資料, No.1(1985)