

モデル追従加速度制御による多関節ロボットのモーション制御

Motion control of multi-joint robot manipulator based on model following acceleration control

代表研究者 大阪工業大学工学部助教授 大石 潔
Assoc. Prof., Fac. of Eng., Osaka Institute of Technology
Kiyoshi OHISHI

In the motion control of multi joint robot manipulator, the difficulty of force and compliance control of each joint is caused by its dynamical nonlinearity, such as the friction force, the interactive force and the mechanical parameter variation. An unknown force disturbance is also imposed on each joint. Since each joint of robot manipulator is always requested to have an accurate position and force response, the state error caused by both its dynamical nonlinearity and the force disturbance should be suppressed completely and rapidly.

For this purpose, I propose the robust control of force and compliance based on the new model following acceleration control system without velocity sensor. Using the proposed, method each joint of robot manipulator is regulated by the acceleration command ω^{cmd} . The resultant system controlled by this acceleration controller has only two integral elements and no mechanical system parameter. This structure is very effective for both the fast motion control and the virtual force & compliance control, because each joint drive system regulated by the proposed acceleration controller has no state error to the position reference θ^{ref} , the velocity reference ω^{ref} and the acceleration reference ω^{ref} . Besides, as the proposed acceleration control is realized by only information from the rotary encoder, the proposed robust control system of force and compliance is not influenced by the noise effect of velocity sensor.

In the proposed robust force control, the force to the target environment pushed by the robot manipulator is controlled by the virtual inertia J_v . Similarly, in the proposed robust compliance control, the arm position θ of the robot manipulator is controlled by the virtual mechanical impedance. Both the virtual force control and the virtual compliance control are constructed by the software algorithm of DSP (digital signal processor) and microprocessor.

Moreover, the hybrid force and position control is also constructed. Using both $T(\theta)$ which is the transformation matrix of the position of each Joint Axis Space and J^{-1} which is the inverse matrix of the Jacobian matrix J , position P , the velocity \dot{P} , the acceleration \ddot{P} and the force F of Cartesian Axis Space is defined respectively. Hence, the force & fast position control system of Cartesian Axis Space for the multi-degrees-of-freedom robot manipulator is constructed. This hybrid controller can be converted into the robust hybrid force and compliance controller.

研究目的

本研究は、モデル追従加速度制御系を用いて多関節ロボットマニピュレータの高性能なモーション制御を行うことを目的としている。

近年、マイクロプロセッサや DSP の発達によって、より複雑で高精度な動作を行うことができるサーボ系の研究・開発が盛んに行われている。ロボットのモーション制御の分野でも、高精

度なモーション・コントロールを行うために、アクチュエータの高性能な制御系の実現が望まれる。ロボットの各関節を駆動するアクチュエータには、摩擦力・干渉力・慣性力・重力等の様々な外力が印加されるので、アクチュエータを駆動する制御系は外力の影響を瞬時に補償する必要がある。特に、バックラッシュの影響を受けずに力を速く伝達させることができる DD (ダイレクト・

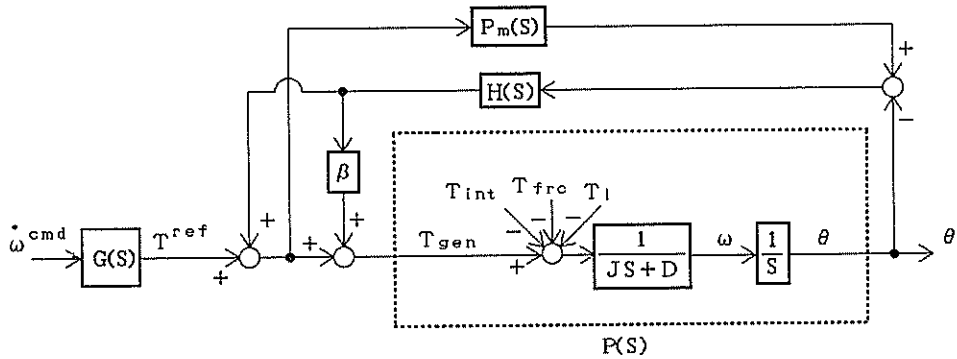


図1. モデル追従加速度制御系のブロック図

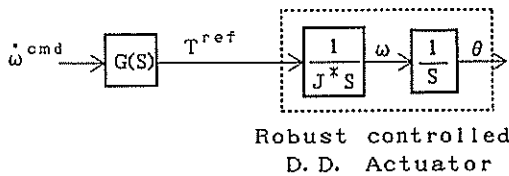


図2. ロバスト制御された DD アクチュエータの構成図

ドライブ) アクチュエータでは、これらの外力の影響をまともに受けてしまうことになる。そこで、外力補償を瞬時に、かつ確実に行うために、外乱オブザーバに代表される加速度制御手法が提案された。この加速度制御法は、サーボ系のパラメータ変動やトルク外乱の影響を瞬時に相殺して、加速度指令 $\dot{\omega}^{cmd}$ によってロバストなモーション・コントロールを実現することができる。しかしながら、通常の外乱オブザーバはトルク電流と位置または速度のどちらかの2種類の状態変数の情報を必要とするので、アクチュエータの種類によっては制御に適さない場合がときどきある。

そこで、本研究ではモデル追従加速度制御系により位置情報だけを用いた加速度制御系をDSPのソフトウェアサーボによって実現する。これより、装置自体の省スペース・省コスト化を図った上に、高性能なモーション制御が期待できることになる。このモデル追従加速度制御系によって構成される加速度制御系により、本研究ではDDアクチュエータを用いた試作の2関節ロボットマニピュレータを用いて、仮想質量に基づく力制御

と仮想コンプライアンス制御を実現する。さらに、力と位置のハイブリッド制御も実現する。仮想コンプライアンス制御とハイブリッド制御を実現することにより、身障者の補助のための義手・義足の役割を行えるような複雑なモーション制御への応用が期待される。

研究経過

モデル追従加速度制御系の基本的な構造は図1のように、受動的適応制御の2重ループシステムと直列補償要素 $G(s)$ の結合により構成されている。図1の破線内のシステムは、トルク指令 T^{ref} で駆動されるDDアクチュエータのブロック図である。図1の各伝達関数は(1)・(2)式のように表される。

$$\frac{\theta}{\dot{\omega}^{cmd}} = \frac{P_m(s) \cdot G(s)}{1 + \frac{\delta(s)}{1 + \beta H(s) P_m(s)} \cdot \{1 - H(s) P_m(s)\}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\theta}{T_{load}} &= \frac{1 - H(s) P_m(s)}{1 + \frac{\delta(s)}{1 + \beta H(s) P_m(s)} \cdot \{1 - H(s) P_m(s)\}} \\ &\times \frac{P_m(s)}{1 + \beta H(s) P_m(s)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\delta(s) = \frac{P_m(s) - P(s)}{P(s)} \quad (3)$$

$$P_m(s) = \frac{1}{J^* S} \times \frac{1}{S} \quad (4)$$

ここで、 $\delta(s)$ はパラメータ変動の項を表す。規範モデル $P_m(s)$ は、制御対象 $P(s)$ が図1より2次系になるので、(4)式のように定義される。(1)・(2)式

の伝達関数において、 $\{1-H(s)P_m(s)\}$ の項が瞬時に零になるように並列補償要素 $H(s)$ を定義すると、図 2 のブロック図のように表される。さらに、直列補償要素 $G(s)$ を (5) 式のように定義すると、図 2 のブロック図は図 3 に示されるように、加速度指令 $\dot{\omega}^{cmd}$ によって駆動される加速度コントローラになる。この加速度コントローラは積分器 2 個が存在するだけで、パラメータの項は一切ない。そのため、Resolved Acceleration Control のような逆ダイナミクスの計算を行わずにロボットマニピュレータの加速度制御を行うことができることになる。

$\{1-H(s)P_m(s)\}=0$ を満足する $H(s)$ を考えると、(6) 式のような規範モデルの逆システムになる。(6) 式は 2 階微分の形をとるので、並列補償要素 $H(s)$ はプロパーなシステムではなくなり、かつ周波数の高い領域での雑音の影響がでてくる。本研究では、2 次系のローパスフィルタを (6) 式のシステムにカスケード結合して、並列補償要素 $H(s)$ を (7) 式に示すように定義する。(7) 式の並列補償要素 $H(s)$ は、実現可能なプロパーなシステムになっている。(7) 式の並列補償要素 $H(s)$ を用いる

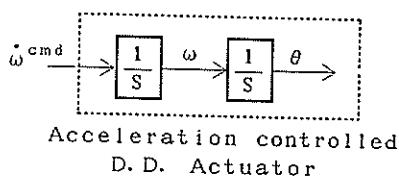


図 3. 加速度コントローラのブロック図

と、モデル追従速度制御系のブロック図は図 4 のように変換することができる。これより、本制御系はアクチュエータのパラメータ変動やトルク外乱の影響は完全に打ち消し、制御対象であるアクチュエータのダイナミクスを規範モデルのダイナミクス $P_m(s)$ に完全に一致させて加速度制御させるための高ゲインフィードバック制御系になっていることがわかる。そのときの加速度コントローラの周波数特性は、並列補償要素 $H(s)$ の周波数応答特性を決める ω_n と β によって定まることになる。図 4 のシステムは、実際に加速度コントローラを DSP のソフトウェア・サーボで構築する際にも使用している。

$$G(s) = J^* \quad (5)$$

$$H(s) = J^* S^2 \quad (6)$$

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\omega_n S + \omega_n^2} J^* S^2 \quad (7)$$

本研究で提案するモデル追従加速度制御系によって構成した力制御系のブロック図を図 5 に示す。DD アクチュエータが目標環境に力を与えると、その力に対して等しい大きさの反力が生じる。この反力は力を加える目標環境の粘性係数 D_{en} ・バネ定数 K_{en} により定まる。そして、この反力は DD アクチュエータにトルク外乱として印加される。モデル追従加速度制御系による力制御系ではこの反力を瞬時に打ち消している。図 5 のシステムは、力センサからの反力 T_{reac} の信号を用いて、DD アクチュエータが発生する力を指令 T^{cmd} に追従させるサーボ系になっている。すなわ

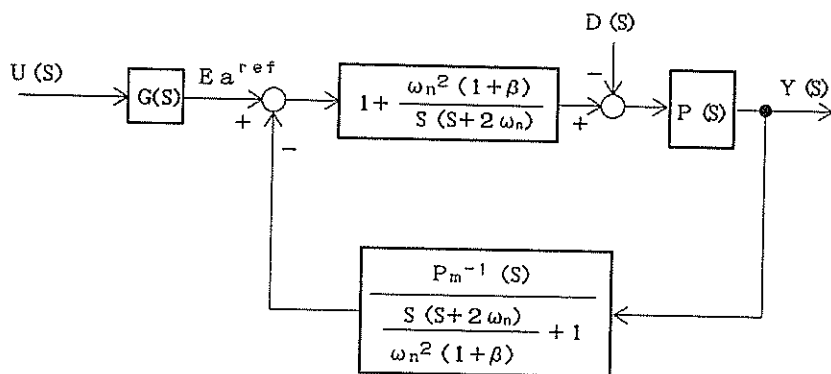


図 4. モデル追従加速度制御系の等価変換図

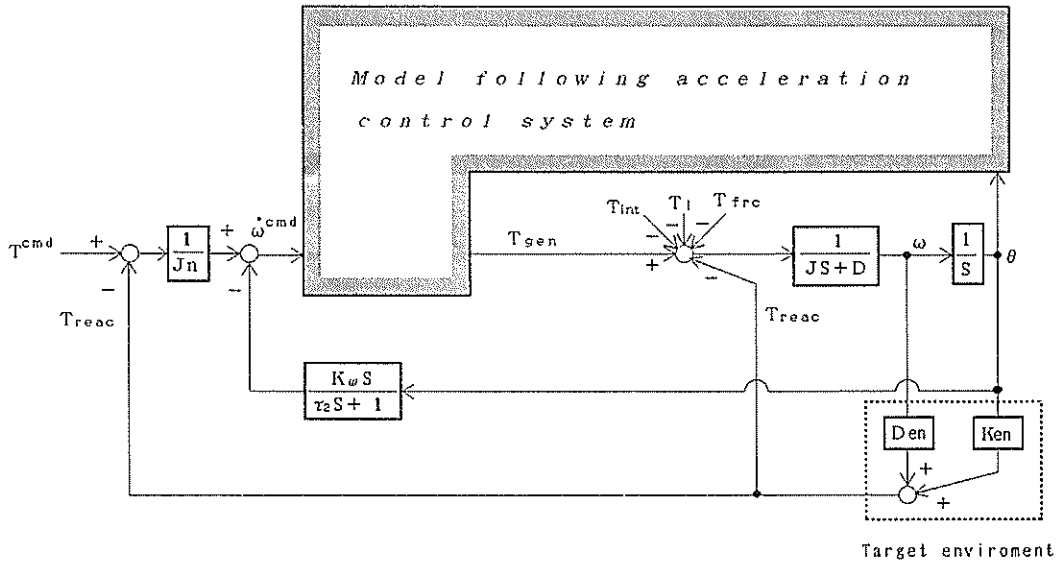


図5. モデル追従加速度制御系による力制御系

ち、本力制御系は摩擦力や重力等のトルク外乱の影響を完全に打ち消して、所望の力を目標環境に与えるのでロバストな力制御系になっている。

図5の力制御系の力指令 T^{cmd} から力の応答 T^{reac} までの伝達関数は(8)式ようになる。ここで、 K_ω は力制御において目標環境との間に生じる振動を抑制するためのフィードバック定数であり、 J_n は任意に設定される仮想慣性モーメントの項である。この J_n の値を設定することで目標環境に対する力の応答特性を自由に決めることができる。例えば、 J_n を小さくすると見掛けの慣性モーメントが小さくなるので目標環境に対する力の応答を早くすることができる。また、逆に J_n を大きくすると、力の応答を遅くすることもできる。

$$\frac{T^{\text{reac}}}{T^{\text{cmd}}} = \frac{D_{\text{en}}S + K_{\text{en}}}{J_n S^2 + (J_n K_\omega + D_{\text{en}})S + K_{\text{en}}} \quad (8)$$

仮想コンプライアンス制御では、アクチュエータへ作用する力 $F(s)$ に対して位置サーボ系の応答を制御し、任意の機械インピーダンスを実現する。今、力 $F(s)$ が図6に示すようにロボットマニピュレータに印加されたとき、その運動は図6に示す仮想機械インピーダンスのばね定数 K_v ・粘性係数 D_v ・慣性モーメント J_v により(9)式の運

動方程式で表すことができる。(9)式より、印加された力 $F(s)$ に対するDDアクチュエータの位置 θ 、速度 ω 、加速度 $\dot{\omega}$ はそれぞれ(10a)、(10b)、(10c)式のように求めることができる。各々の式で求められた位置 θ 、速度 ω 、加速度 $\dot{\omega}$ を実現することで、仮想コンプライアンス制御が実現できることになる。本モデル追従加速度制御系によって構成される仮想コンプライアンス制御系のブロック図は図7に示される。図7のブロック図において、左側部分は仮想機械インピーダンスによって位置 θ 、速度 ω 、加速度 $\dot{\omega}$ の各指令値を算出する部分のブロック図で、右側部分はモデル追従加速度制御系によって構成された位置サーボ系である。この位置サーボ系に左側部分で算出された各指令値を加えることで、本仮想コンプライアンス制御が構成される。位置サーボ系の各指令値に対する伝達関数は(11)式ようになるので、この位置サーボ系はパラメータ変動やトルク外乱に対して影響を受けずに各設定値に対して追従することになる。即ち、所望の仮想機械インピーダンスで力 $F(s)$ に反応するロバストな位置サーボである。

$$F(s) = J\dot{\omega}(s) + D\omega(s) + K\theta(s) \quad (9)$$

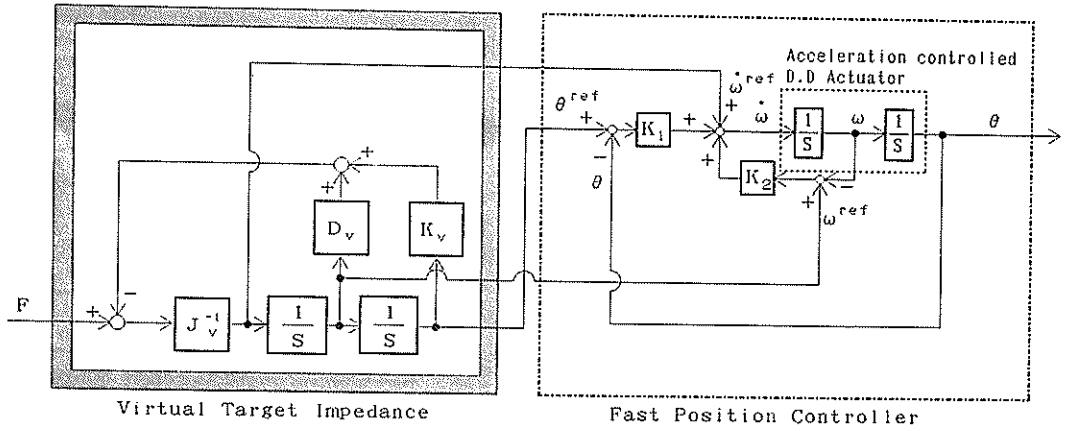


図6. 仮想コンプライアンス制御系のブロック図

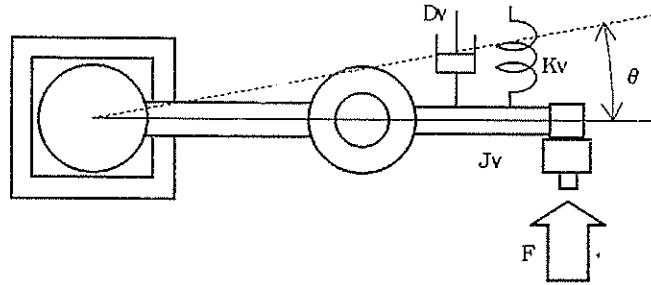


図7. コンプライアンス機構

$$\begin{aligned} \theta(s) &= \dot{\omega}(s) \times \frac{1}{S^2} \\ &= \frac{F(s) - (D/S + K/S^2)\dot{\omega}(s)}{J} \times \frac{1}{S^2} \quad (10a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta(s) &= \dot{\omega}(s) \times \frac{1}{S} \\ &= \frac{F(s) - (D/S + K/S^2)\dot{\omega}(s)}{J} \times \frac{1}{S} \quad (10b) \end{aligned}$$

$$\omega(s) = \frac{F(s) - (D/S + K/S^2)\dot{\omega}(s)}{J} \quad (10c)$$

$$\frac{\theta}{\theta^{ref}} = \frac{\omega}{\omega^{ref}} = \frac{\dot{\omega}}{\dot{\omega}^{ref}} = \frac{S^2 + K_2S + K_1}{S^2 + K_2S + K_1} = 1 \quad (11)$$

多関節ロボットにおいて、直角座標系の位置 P 、速度 \dot{P} 、加速度 \ddot{P} と作業空間座標系の位置 θ 、速度 $\dot{\omega}$ 、加速度 $\ddot{\omega}$ の関係式は各々 (12) 式、(13) 式、(14) 式に示される。したがって、直角座標系の加

速度指令値 \dot{P}^{cmd} を作業空間座標系の加速度指令値 $\ddot{\omega}^{cmd}$ に変換する式は (15) 式ようになる。また、直角座標の力 F と作業空間座標のトルク T の関係は (16) 式のように表される。ここで、 J^{-1} と J^T はヤコビアン J の逆行列と転置行列をそれぞれ表す。以上の式を用いて、多関節ロボットマニピュレータの力と位置のハイブリッド制御系を構成すると、図8のようなブロック図になる。ここで、 M は直角座標系の仮想質量であり、行列 H は力と位置の制御を選択するための行列である。すなわち、 H が単位行列 I のとき、図8のブロック図は位置制御だけになる。

$$P = T(\theta) \quad (12)$$

$$\dot{P} = J\dot{\omega} \quad (13)$$

$$\ddot{P} = \dot{J}\dot{\omega} + J\ddot{\omega} \quad (14)$$

$$\ddot{\omega}^{cmd} = J^{-1}\ddot{P}^{cmd} - J^{-1}\dot{J}J^{-1}\dot{P} \quad (15)$$

$$T = J^{-1}F \quad (16)$$

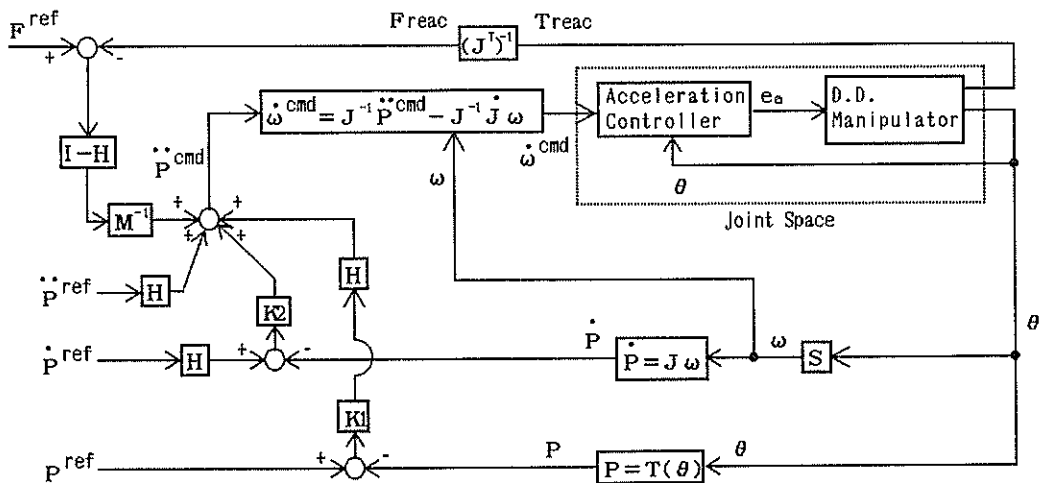


図8. 力と位置のハイブリッド制御系のブロック図

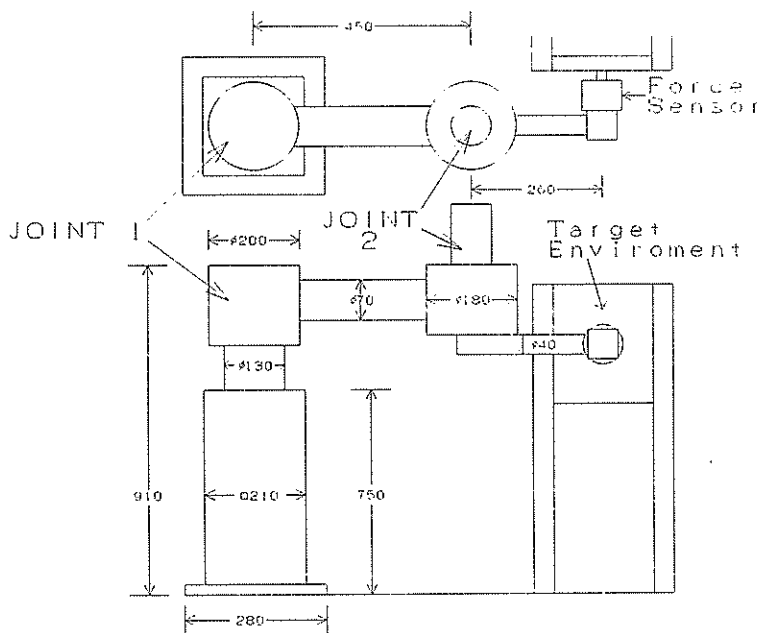


図9. 試作の2関節DDロボットマニピレータ

研究成果

本研究で提案するモデル追従加速度制御系に基づく力制御系の有効性を検証するために、図9の試作の2関節ロボットマニピレータによって実験を行った。ジョイント1はDDアクチュエー

タで駆動され、ジョイント2はDCサーボモータと遊星ギアの結合系で構成されている。本研究では、試作のロボットマニピレータのジョイント1を用いて、DDアクチュエータによる力制御の実験を先ず行う。このとき、ジョイント2はジョ

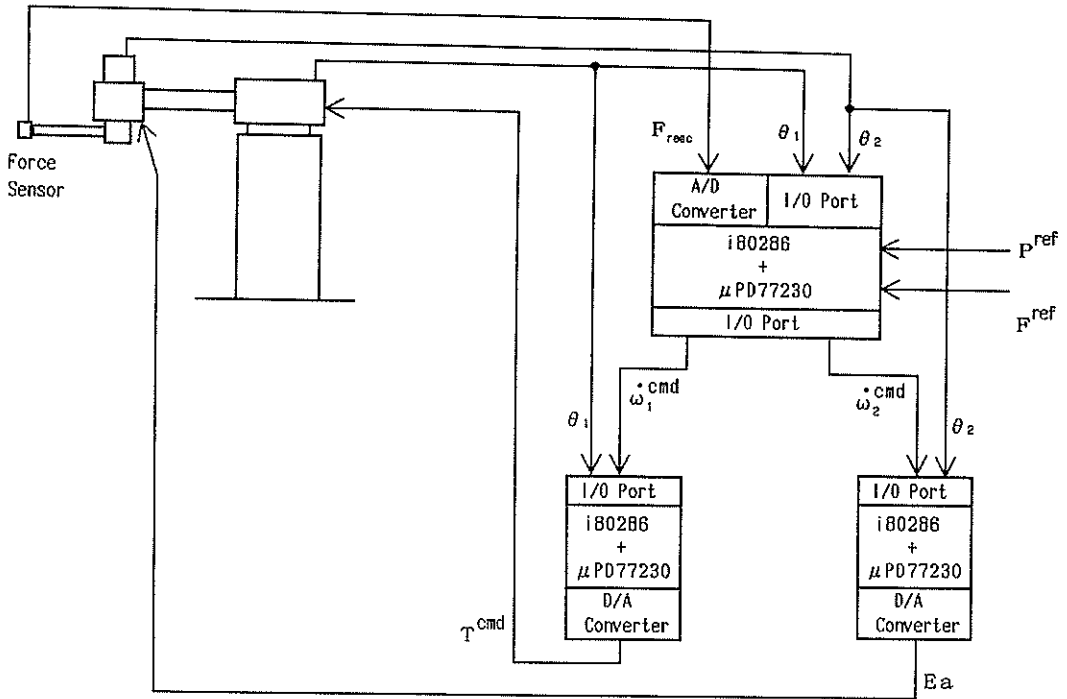


図 10. DD ロボットの駆動装置のハードウェア

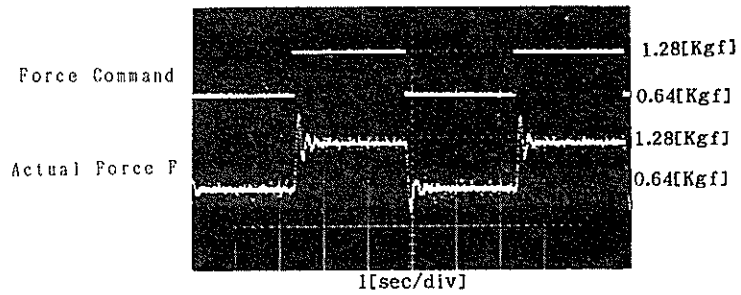
イント 1 の延長上にまっすぐ伸ばしたままの状態である。従って、等価的に 1 自由度マニピュレータの力制御を行うことになる。図 9 のロボットマニピュレータを駆動するためのハードウェアの概要は図 10 に示す。力制御系は DSP (μ PD 77230) 上のソフトウェアサーボにて構成される。マイクロプロセッサ i80286 は A/D・D/A・I/O・タイマーなどを管理するために用いられる。力制御系のサンプリング時間は 240 [μ sec] であり、エンコーダの分解能は約 65 万 [パルス/rev] である。また、力制御の実験に用いた並列補償要素 $H(s)$ の β は 10 で、 ω_n は 100 [rad/sec] である。

実験は、仮想慣性モーメント J_n を変化させて、方形波状の力指令 T^{cmd} に対する目標環境への力応答の応答性能結果を調べた。その実験結果を図 11 に示す。実験結果より、実際の慣性モーメントの大きさに関わらず、仮想慣性モーメント J_n を変えることで目標環境に対する力応答特性を自由に設定できることが分かる。このことは、本力制御系がロバストな構造であることを別な角度から確

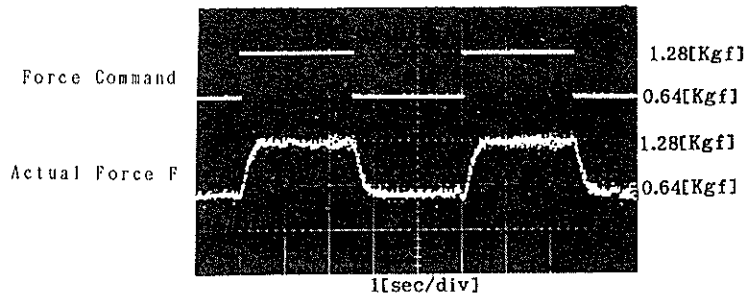
認したことになる。

本研究で提案する仮想コンプライアンス制御系の実験を、図 9・図 10 に示した実験システムで行う。仮想コンプライアンス制御系も力制御と同様に DSP 上のソフトウェアサーボで構築する。この場合のサンプリング時間と並列補償要素 $H(s)$ の β は先の力制御で用いたものをそのまま用いている。実験は、印加される力 $F(s)$ を方形波状信号で与え、仮想ばね定数 K_v を変化させたときの位置設定値 θ^{ref} とその位置応答 θ を調べている。その実験結果は図 12 に示す。 K_v を変化させることで印加された力に対する設定値 θ^{ref} が変化し、位置 θ もそれに追従して所望の機械インピーダンスで応答していることがわかる。したがって、本研究で提案する仮想コンプライアンス制御系が、印加される力 $F(s)$ に対して任意の機械インピーダンスの応答を実現できることがわかった。

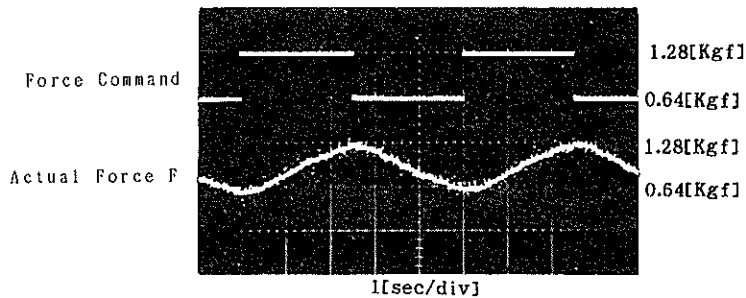
さらに、力と位置のハイブリッド制御を図 9 の 2 関節ロボットマニピュレータで行う。2 関節ロボットマニピュレータを駆動する図 10 のハード



(1) $J_n = 0.22$ [kgm²]



(2) $J_n = 1.11$ [kgm²]

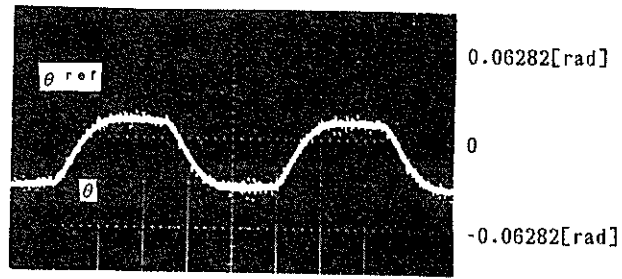


(3) $J_n = 4.44$ [kgm²]

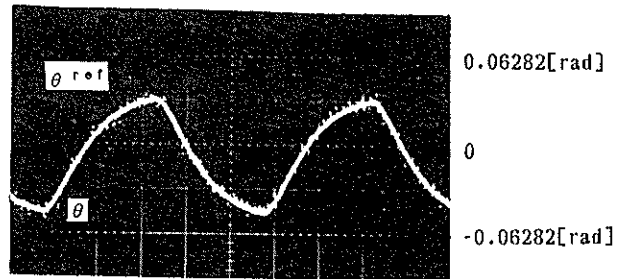
図 11. 力制御の実験結果

ウェアにおいて、ホストコンピュータは各関節が加速度コントローラになっているとして、力制御と位置制御を行う。実験に用いた仮想質量 M は 10 [kg] であり、位置制御系の各ゲイン K_1 と K_2

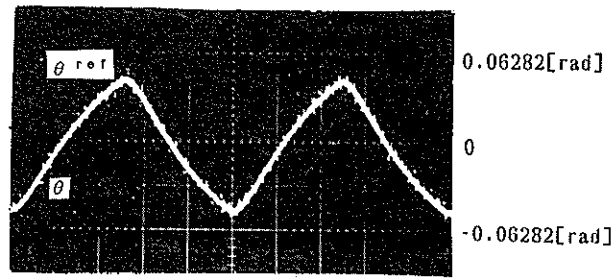
は両者とも 10 である。また、そのときのホストコンピュータのサンプリング時間は 1.5 [msec] となる。さらに、各関節を加速度制御しているモデル追従加速度制御系の各パラメータは、先の力



(1) $K_v=35.9$ [kg/m]
 $D_v=17.9$ [kgsec/m]
 $J_v=2.26$ [kgm²]



(2) $K_v=17.9$ [kg/m]
 $D_v=17.9$ [kgsec/m]
 $J_v=2.26$ [kgm²]



(3) $K_v=8.96$ [kg/m]
 $D_v=17.9$ [kgsec/m]
 $J_v=2.26$ [kgm²]

図 12. 仮想コンプライアンス制御の実験結果
 (1) X 方向位置制御 (等速度運動)
 Y 方向力制御 (正弦波力指令)

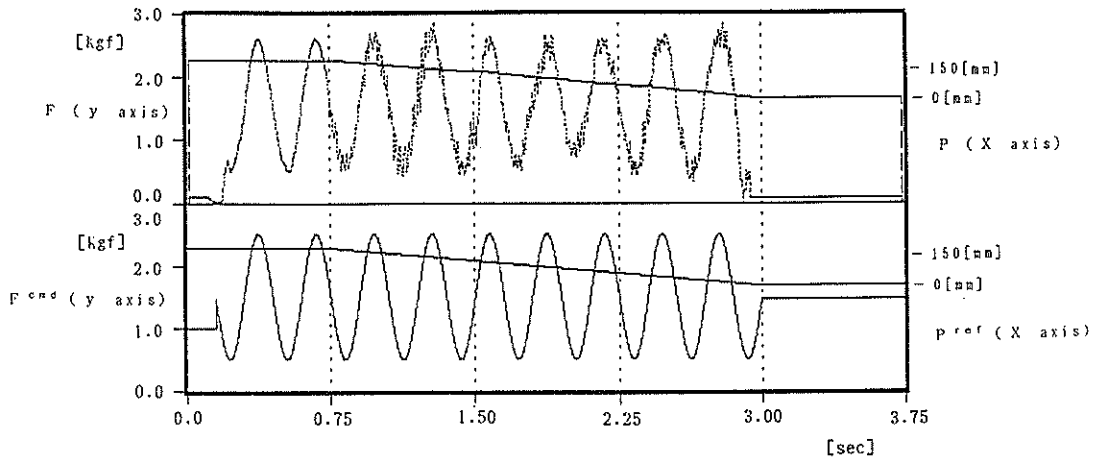


図 13. 力と位置のハイブリッド制御の実験結果
(2) X 方向位置制御 (等速度運動)
Y 方向力制御 (方形波力指令)

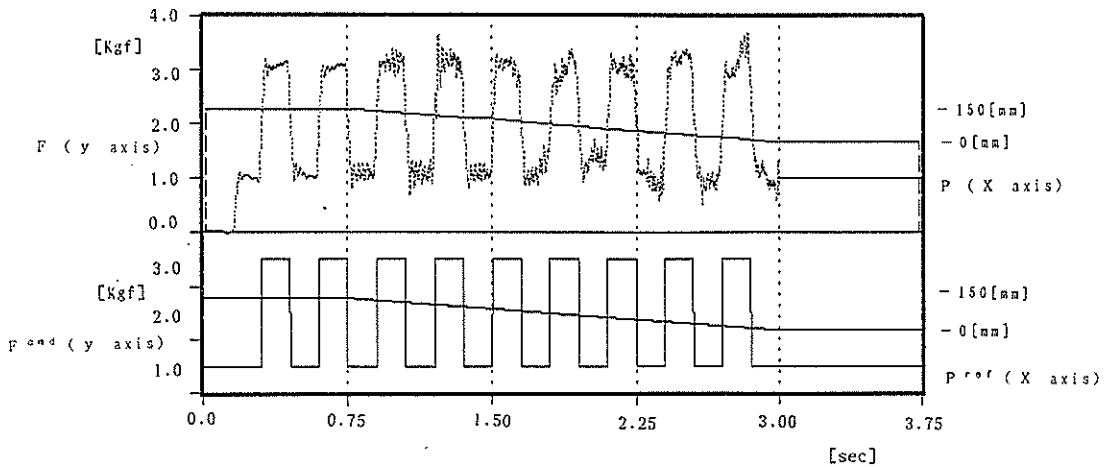


図 14. 力と位置のハイブリッド制御の実験結果

制御に用いた値をそのまま用いており、そのサンプリング時間は $240 [\mu\text{sec}]$ である。

本研究のハイブリッド制御の実験は二つ行った。その結果を図 13 に示す。力の指令を Y 方向に正弦波状に与え、且つ位置の指令を X 方向に直線的に与えるハイブリッド制御の実験結果を図 13-1 に示す。また、力の方向を Y 方向にステップ状に与え、位置の指令を同様に X 方向に直線的に与える実験結果を図 13-2 に示す。実験結果

により、本ハイブリッド制御系は安定に力と位置を制御しており、指令値に対して追従していることがわかる。

本研究で提案するモデル追従加速度制御系により構成された加速度コントローラは、外力やパラメータ変動の影響を瞬時に抑圧して、DD アクチュエータを加速度指令 ω^{cmd} によって駆動する。提案する加速度コントローラにより、DD アクチュエータのロバストな仮想質量の力制御と仮想

機械インピーダンスのコンプライアンス制御を実現することができた。さらに、DDアクチュエータを用いた2関節ロボットマニピュレータの各関節にこの加速度コントローラを適用して、力と位置のハイブリッド制御を行うことができた。

今後の課題と発展

以上のような本研究の実験によって、モデル追従加速度制御系によるロボットマニピュレータの高性能なモーション制御の実現が確認された。この仮想コンプライアンス制御とハイブリッド制御に基づいて、多関節ロボットに身障者の補助のための義手・義足の役割を行えるような複雑な軌道制御と力制御を実現できると考えられる。今後は、こちらへの応用の研究を重ねていきたい。

また、本研究で提案するモデル追従加速度制御系は、並列要素 $H(s)$ と β によって応答性能が決

まってしまうが、その系統的な決定の仕方がまだない。したがって、この $H(s)$ と β の決定の仕方が今後の研究課題になると思われる。

発表論文

- 1) K. Ohishi, Y. Ogino, and M. Hotta: "High Performance Motion Control Based on Model Following Acceleration Joint Control Method", Proc. of 1989 Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 3, p. 1792 (1989-5).
- 2) K. Ohishi, S. Matsuda and K. Ohnishi: "DSP-Based DC Servo Acceleration Control without Speed Sensor," Proc. of IEEE IAS Annual Meeting, Vol. 1, p. 480 (1989-10)
- 3) 松田, 大石: 「位置情報だけを用いた DSP による加速度制御系」, 電気学会論文誌 D 分冊, 110 巻, 2 号, p. 101 (平 2-2) .
- 4) 大石, 松田: 「DD アクチュエータの力とコンプライアンスのロバスト制御」, 電気学会論文誌 D 分冊, 110 巻, 11 号 (平 2-11) .