

技術論文

パラレルロボット HEXA の動的制御実験

内山 勝* 佐渡友 哲也* 益川 和之*

Dynamic Control Experiment on a Parallel Robot HEXA

Masaru Uchiyama*, Tetsuya Sadotomo* and Kazuyuki Masukawa*

A 6-DOF parallel robot called HEXA which we have developed recently is suited for very fast motion. In this paper, we apply dynamic control to the HEXA robot to improve the accuracy of its trajectory tracking in the fast motion. First, we present a simple dynamic model for the HEXA robot to decrease the cost of computation and, then, experiment on identification of its parameters. We adopt so-called Adept motion, which is commonly used as a benchmark to measure the ability of fast motion, to evaluate the effect of the dynamic control. The results of the experiment on the dynamic control show that the control improves the trajectory tracking accuracy dramatically.

Key Words: Dynamic Control, Parallel Robot, Adept Motion, Trajectory Tracking, Very Fast Motion

1. はじめに

近年、高剛性、高速性、高負荷、高精度という特徴を備えたパラレルロボットに関心が持たれている [1][2]。また、このような特徴を生かしたパラレルロボットが数多く開発されている [3]~[6]。Pierrot らは直接駆動に適し、高速性を追求した 6 自由度パラレルロボット HEXA を提案した [7]。我々は、この提案をもとに 6 自由度パラレルロボット HEXA を開発した [8]。

HEXA ロボットの開発時には、その高速運動能力を確かめるために、アデプトモーションと呼ばれる高速性能を評価するための動作規定が用いられた。その結果、1 サイクル 0.465 [s] という優れた結果を得ることができ、HEXA ロボットのポテンシャルの高さを証明した [8]。しかし、このとき軌道追従性において、位置、速度ともに無視できないほど大きな偏差が見られた。

そこで、今回我々はこれを改善するため、動的制御を HEXA ロボットに適用する。運動方程式の導出には Pierrot らが提案する HEXA ロボットの簡易動力学モデル [7] を採用する。これにより動力学計算コストが大幅に低減され、実時間制御が容易になる。運動方程式に必要な摩擦項などの各パラメータは実験により同定する。実験に使用した HEXA ロボットは速度指令型のサーボモータにより駆動される。実験には、実用的な動作であるアデプトモーションを採用する。

本論文では、簡易動力学モデル、動力学パラメータの同定、および動的制御実験について報告する。実験の結果、簡易動

学モデルを用いた動的制御により軌道追従性が大幅に向上することが確認される。

2. HEXA ロボット

HEXA ロボットおよび制御システムの詳細については文献 [8] を参照されたい。ここでは、その概要を述べる。

2.1 HEXA ロボット

可動部を軽量化するために Fig.1 に示すように、ダイレクトドライブモータ (DD モータ) を 2 個ずつペアとして固定部 (ベース) に 120° ごとに合計 6 個配置する。アームは DD モー

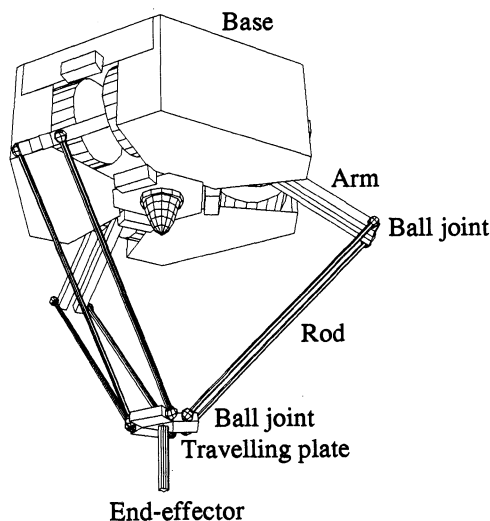


Fig.1 HEXA robot

原稿受付 1995年3月27日

*東北大学工学部

*Faculty of Engineering, Tohoku University

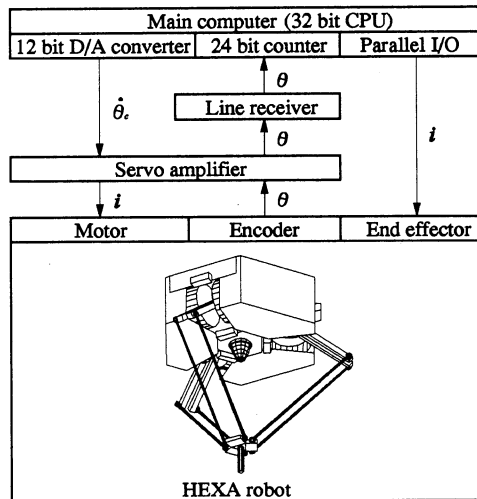


Fig. 2 Control system diagram

タに取り付けられており、これにより駆動される。アームのモータと反対側の先端にはボールジョイントが取り付けられており、それによってロッドと接続されている。さらに、ロッドはボールジョイントによってトラベリングプレートに接続され、トラベリングプレートは6自由度を持つ。

2.2 制御システム

まず、Fig. 2 に制御システムの概要を示す。メインコンピュータはCPUがi486DX2 (数値演算プロセッサ内蔵、動作クロック64 [MHz]) のものを用いている。メインコンピュータでは、モータの回転角からモータの制御量を計算し、速度指令 $\dot{\theta}_c$ をD/A変換器を通して、モータドライバ(速度サーボアンプ)に送る。サーボアンプからは、さらにモータに指令が電流 i として出力される。

モータは、最大トルク15 [Nm]、定格トルク10 [Nm]、最大回転数2.4 [rps]の横河プレジジョン(株)製ダイレクトドライブモータDM1015Bを使用している。ダイレクトドライブモータには光学式高分解能エンコーダ(分解能:655,360 [p/rev])が内蔵されており、これによりモータ回転角 θ を計測する。エンコーダからの出力は、一度モータドライバに入力され、モータドライバ内でF/V変換が施され、速度フィードバックに利用される一方、パルス列としてモータドライバから出力される。この信号をラインレシーバでTTLレベル信号に変換し、パルスカウンタを通して、モータの回転角としてメインコンピュータに取り込む。

また、これらとは独立してエンドエフェクタのオンオフ用に平行I/Oボードを用いており、1 [bit]のデジタル信号を電流 i に変換し、これによりエンドエフェクタ(電磁ホルダ)のオンオフを制御する。

3. 運動学

HEXAロボットの運動学の詳細については文献[7]~[9]を参照されたい。ここでは、その概要を述べる。

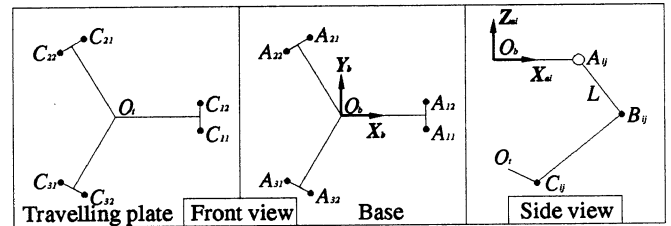


Fig. 3 Kinematic notations and coordinate systems

3.1 記号の定義

まず、以下のように記号を定義する。Fig. 3 に示すように、アームとモータの結合点の中心を A_{ij} 、アームとロッドの結合点の中心を B_{ij} 、ロッドとトラベリングプレートの結合点の中心を C_{ij} とする。ただし、 $i = 1, 2, 3$ はモータペアの番号、 $j = 1, 2$ は各ペア内のモータ番号を表す。

また、 $\Sigma_b (O_b, X_b, Y_b, Z_b)$ をベースに固定された基準座標系とし、 O_t をトラベリングプレートの中心とする。さらに、 $\Sigma_{ai} (O_b, X_{ai}, Y_{ai}, Z_{ai})$ ($i = 1, 2, 3$) をベースに固定された座標系とする。ただし、 $Z_{ai} = Z_b$ であり、また、 X_{ai} はアーム ij ($j = 1, 2$) に平行とする。 θ_{ij} はモータの回転角であり、アームが水平のとき $\theta_{ij} = 0$ とし、アームがこれより下方に回転する方向を正とする。 p はエンドエフェクタ中心の位置、姿勢を表すベクトルとする。

3.2 順運動学

順運動学を解析的に求めるためには、6元連立2次方程式を解かねばならず、これは極めて困難である。そこで、順運動学を解くためにはHEXAロボットのヤコビ行列を用いて逐次計算を行う[8][9]。

3.3 逆運動学

一般に、平行ロボットの逆運動学は解析的に求めることができる。HEXAロボットの場合も解析的な解が得られる。ただし、速度、加速度の解は、計算を簡単にするため、得られた θ_{ij} を数値微分することにより求める。

4. 簡易動力学モデル

HEXAロボットの簡易動力学モデルは文献[7][8]に詳しく述べられているが、本論文において重要であるので、その概要をやや詳細に述べる。

4.1 簡易動力学モデル

動力学計算のコストを低減させるために、多少の厳密性が損なわれるが、以下のようなPierrotらが提案したHEXAロボットの簡易動力学モデルを使用する[7]。

簡易動力学モデルはロッドが軽量なことに着目し、Fig. 4 に示すようにロッドの質量の半分をアームの先端に付加し、残りの半分の質量をトラベリングプレートのボールジョイント部に付加する。そして、ロッド自身は質量ゼロ、慣性モーメントゼロの棒として取り扱う。

ロッドの質量を付加されたアーム、トラベリングプレートをそれぞれ仮想アーム、仮想トラベリングプレートと呼ぶ。ロッドの質量を m_r 、アームの質量を m_a 、アームのモータ軸回りの慣性モーメントを J_a とすると、仮想アームの質量 m_{va} 、仮

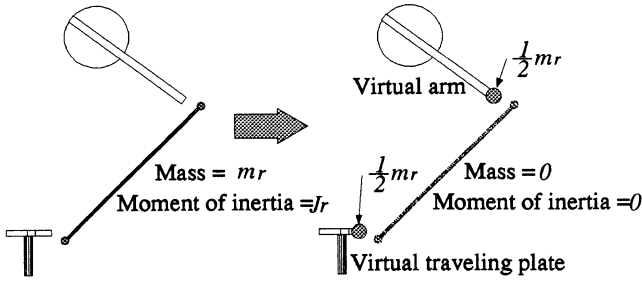


Fig. 4 Simple dynamic model of HEXA robot

想アームの慣性モーメント J_{va} は次のように定義することができる。ただし、 L はアームの長さである。

$$\begin{aligned} m_{va} &= m_a + 0.5m_r \\ J_{va} &= J_a + 0.5m_r L^2 \end{aligned}$$

4.2 仮想トラベリングプレートおよび仮想アームのつりあい

F_{ij} を C_{ij} においてトラベリングプレートよりロッドに加わる力、 F_a 、 C_a をトラベリングプレートの中心 O_t に加わる力および、モーメントとする。ボールジョイントには摩擦の影響がないものとし、簡易動力学モデルを用いると、力はロッドの軸方向のみにかかるので、

$$F_{ij} = \lambda_{ij} \overrightarrow{C_{ij} B_{ij}} \quad (1)$$

と表すことができる。これより、点 O_t におけるトラベリングプレートの力のつりあいから λ_{ij} を求めることができる [7][8]。

トラベリングプレートに作用する重力、慣性力、および外力負荷によるアクチュエータトルク μ_{ij} は次のように求められる。

$$\begin{aligned} \mu_{ij} &= (F_{ij} \times \overrightarrow{A_{ij} B_{ij}}) \cdot Y_{ai} \\ &= \lambda_{ij} (\overrightarrow{C_{ij} B_{ij}} \times \overrightarrow{A_{ij} B_{ij}}) \cdot Y_{ai} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 Y_{ai} は座標軸 Y_{ai} 、すなわちモータペアの回転軸方向の単位ベクトルを表す。各アクチュエータのトルク τ_{ij} は、アクチュエータの摩擦トルク、仮想アームの重力などを考慮に入れ、次式のように求められる。

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \mu_{ij} + \{ \overrightarrow{A_{ij} G_{ij}} \times (m_{va} g) \} \cdot Y_{ai} \\ &\quad + \tau_{fij} + (J_{va} + J_m) \ddot{\theta}_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 G_{ij} は仮想アームの重心、 g は重力加速度、 τ_{fij} は各アクチュエータの摩擦のトルク、 J_m はアクチュエータの回転軸回りの慣性モーメントとする。

4.3 運動方程式

ヤコビ行列 J_p 、 J_θ を用いると、エンドエフェクタの速度、角速度を表すベクトル \dot{p} は、 $\dot{\theta}$ より次のように求められる [8]。

$$\dot{p} = -J_p^{-1} J_\theta \dot{\theta} \quad (4)$$

これを時間に関して微分すると、

$$\ddot{p} = -J_p^{-1} (J_\theta \ddot{\theta} + \dot{J}_p \dot{p} + \dot{J}_\theta \dot{\theta}) \quad (5)$$

となる。式 (5) を用いて、式 (3) を $\ddot{\theta}$ についてまとめると次式を得る [10]。

$$\begin{aligned} \tau &= J(p(\theta), \theta) \ddot{\theta} + h(\dot{p}(\dot{\theta}, \theta), p(\theta), \dot{\theta}, \theta) \\ &\quad + g(p(\theta), \theta) + V(\dot{\theta}) + F_e(p(\theta), \theta) \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $J(p(\theta), \theta)$ は慣性項、 $h(\dot{p}(\dot{\theta}, \theta), p(\theta), \dot{\theta}, \theta)$ は遠心力・コリオリ力の項、 $g(p(\theta), \theta)$ は重力項、 $V(\dot{\theta})$ は摩擦項、 $F_e(p(\theta), \theta)$ はトラベリングプレートにかかる外力によるトルクである。各項の成分の詳細については文献 [10] を参照されたい。

5. 動力学パラメータの同定

動力学パラメータのうち、HEXA ロボットの各部品品の質量、慣性モーメントは、部品の形状および寸法から計算により求められる。このほかの動的制御に必要なパラメータ、すなわちモータドライバゲインおよびモータの摩擦係数は実験により求める。

5.1 モータドライバゲインの測定

モータの速度制御は P 制御モードにより行われている。モータドライバにはジャンパピンとゲインボリュームで設定できるドライバゲインがあり、両者の積がモータドライバゲイン K_v であり、同定実験中はその値は 11 に設定してあるが、この値の単位は不明である。そこで、このモータドライバゲインを測定するために次のような実験を行った。

モータドライバに一定の速度指令値を与え、モータ回転中心より 0.26[m] の位置 (Fig.3 の点 B_{ij}) において、これとつりあう力をばねばかりにより測定する。次に、与える速度指令値を変化させ何点か測定した値を用い、最小二乗法によりモータドライバゲインと静止摩擦トルクを計算する。

各モータのモータドライバゲインの測定値を Table 1 に、モータ 1 の測定結果を Fig.5 に示す。Fig.5 を見ると、測定結果に誤差が含まれていることが分かる。他のモータについても同様な結果が得られる。この測定実験では、モータの測定範囲がおよそ 0 ~ 13 [Nm] であり、これとは別にモータの最大静止摩擦トルクを測定した結果、測定値の変動が約 1 [Nm] 程度もあり、それがこの実験結果に大きく影響を及ぼしていると考えられる。

しかし、前述したハード的に設定した 11 という値は、この測定値に非常に近い値となっている。そこで、このハード的に設定されている値 K_v の単位を [Nm/(rad/s)] として、この設定値をモータドライバゲインとして用いることにする。

5.2 粘性摩擦係数とクーロン摩擦係数の測定

今回、摩擦のモデルとして粘性摩擦とクーロン摩擦を用いた。その測定方法は各モータに一定の速度指令値 $\dot{\theta}_{ref}$ を与え、エンコーダからの位置信号を微分して得られるモータの飽和速度を求める。そして、以下のように粘性摩擦係数とクーロン摩擦係数を計算する。まず、各モータについて次のようなつりあいの式が成り立つ。

$$K_v(\dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta}_{sat}) - V\dot{\theta}_{sat} - \text{sgn}(\dot{\theta}_{sat})R + \left| \overrightarrow{AG^{arm}} \right| m_a g \cos \theta = 0 \quad (7)$$

Table 1 Measured values of motor driver gains

Motor	Motor driver gain K_v [Nm/(rad/s)]	Static friction R [Nm]
M1	11.0	0.671
M2	12.4	0.440
M3	12.0	0.0842
M4	11.5	0.923
M5	11.1	0.428
M6	11.2	0.258

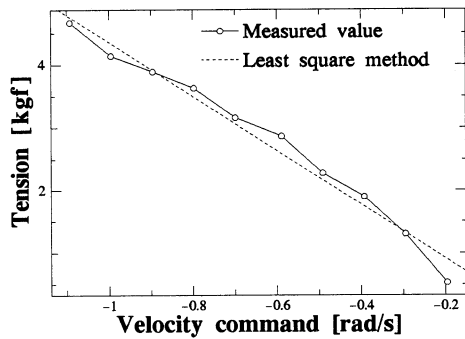


Fig. 5 Results of motor driver gain identification experiment

ただし, $\dot{\theta}_{sat}$ はモータの飽和速度, V は粘性摩擦係数, R はクーロン摩擦トルク, A はアームとモータの結合点の中心, G^{arm} は実アームの重心, m_a はアームの質量である. 次に, 飽和速度の測定を n 回行ったとすると, 粘性摩擦係数 V , クーロン摩擦トルク R は最小二乗法により式 (8) のように求められる.

$$\begin{bmatrix} V \\ R \end{bmatrix} = (Z^T Z)^{-1} Z^T \phi \quad (8)$$

ここで,

$$Z = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{sat1} & \text{sgn}(\dot{\theta}_{sat1}) \\ \dot{\theta}_{sat2} & \text{sgn}(\dot{\theta}_{sat2}) \\ \vdots & \vdots \\ \dot{\theta}_{satn} & \text{sgn}(\dot{\theta}_{satn}) \end{bmatrix}$$

$$\phi = \begin{bmatrix} K_v (\dot{\theta}_{ref1} - \dot{\theta}_{sat1}) + \left| \frac{AG^{arm}}{AG^{arm}} \right| m_a g \cos \theta \\ K_v (\dot{\theta}_{ref2} - \dot{\theta}_{sat2}) + \left| \frac{AG^{arm}}{AG^{arm}} \right| m_a g \cos \theta \\ \vdots \\ K_v (\dot{\theta}_{refn} - \dot{\theta}_{satn}) + \left| \frac{AG^{arm}}{AG^{arm}} \right| m_a g \cos \theta \end{bmatrix}$$

である. 結局, 粘性摩擦係数とクーロン摩擦トルクは Table 2 のように求められる.

6. 動的制御

現在, モータドライバは速度指令モードを使用しているので, 式 (6) で計算されるトルクは直接モータドライバにトルク指令値として与えることができない. そこで, これを速度指令値に変換しなければならない. モータドライバを速度の P 制御モードで使用したとき, モータの出すトルクと速度および速度指令

Table 2 Friction parameters

Motor	Viscous friction V [Nm/(rad/s)]		Coulomb friction R [Nm]	
	positive direction	negative direction	positive direction	negative direction
M1	0.146	0.141	2.24	1.47
M2	0.141	0.143	1.28	0.767
M3	0.164	0.162	1.37	1.50
M4	0.157	0.146	1.74	0.893
M5	0.212	0.183	1.56	0.977
M6	0.101	0.0663	0.757	1.15

値との間には以下のような関係が成り立つ.

$$\tau = K_v (\dot{\theta}_{com} - \dot{\theta}) \quad (9)$$

ただし, τ はモータの発生トルク, $\dot{\theta}_{com}$ は速度指令値, $\dot{\theta}$ はモータの現在の速度を表すベクトルである. ここで, 以下のような速度指令を考える.

$$\dot{\theta}_{calc} = K_v^{-1} \tau_d + \dot{\theta}_d \quad (10)$$

ただし, τ_d は目標軌道 θ_d に対して式 (6) により計算される目標トルクである. 次に, この目標トルクより計算される速度指令値 $\dot{\theta}_{calc}$ に PD 制御による速度指令値をたし合わせたものをあらたに速度指令値とすると,

$$\dot{\theta}_{com} = \dot{\theta}_{calc} + K_p (\theta_d - \theta) + K_d (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (11)$$

となる. ただし, θ はモータの現在角度, K_p は比例ゲイン, K_d は微分ゲインである. 本論文の動的制御は式 (11) により行う. すなわち, 式 (11) により計算される $\dot{\theta}_{com}$ をモータドライバの指令値として出力することにより動的制御を行う.

7. 実験

7.1 アダプトモーション

文献 [8] では HEXA ロボットの高速性を確かめるためにアダプトモーションを用いた. このときの実験では 1 サイクル 0.465 [s] と優れた結果を得たが, 軌道追従性において位置, 速度ともに大きな偏差が見られた. 本論文では, この問題を改善するために, 動的制御を導入している. したがって, 今回の実験の軌道においても同じアダプトモーションを再び用いることにする.

ここで, アダプトモーションについて改めて説明すると, ロボットメーカーのアダプト社がロボットの高速運動性能の評価法として定めた規定で, 横 300 [mm], 高さ 25 [mm] という軌道を設けてその軌道上を繰り返し往復させ, その 1 サイクルあたりの所要時間を評価するものである (Fig. 6 参照).

実際に実験を行う場合には, 上に述べた規定に添うようにトラベリングプレートの位置, 姿勢に関する軌道を生成しなければならない. 軌道生成の概略は, まず軌道を上昇, 水平移動, 下降の三つに分解し, これらをそれぞれ 5 次の多項式により補間し, さらにこの軌道をコーナーで適度な丸みを帯びるように結合させる. 詳細については, 文献 [8] を参照されたい.

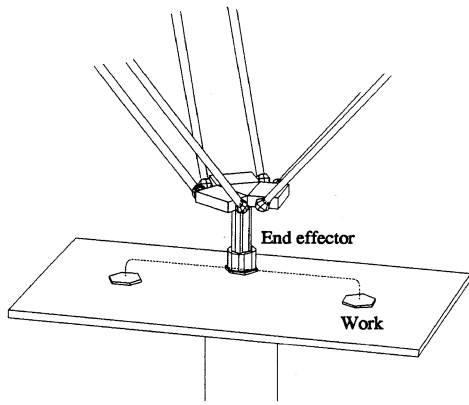


Fig. 6 Adept motion

Table 3 Start and end points of Adept motion

	Start point	End point
x [m]	-0.15	0.15
y [m]	0.0	0.0
z [m]	-0.5686	-0.5686

アダプトモーションの軌道の始点と終点は Table 3 のように与えた。ただし、姿勢角ロール、ピッチ、ヨーはいずれも 0 [rad] とした。

7.2 実験方法

まず、アダプトモーションの目標軌道 p_d のサンプリングタイムごとの各点において逆変換を行いモータ回転角の目標軌道 θ_d を生成する。そして、3.3 節で述べたように、このモータ回転角の軌道を数値微分して速度 $\dot{\theta}_d$ 、加速度 $\ddot{\theta}_d$ の軌道を求める。さらに、軌道上のすべての点において式 (6) より目標計算トルク τ_d をオフラインで求め、メモリ上に用意しておく。そして、実行時には Fig. 7 に示すように、目標軌道と共に τ_d を順次与えていく。もし、オンラインで動力学を計算しようとすると、エンコーダより得られる角度 θ から順変換によりトラベリングプレートの位置、姿勢 p を求めなければならない。そして、この順変換に 5 回の逐次繰り返し計算が必要であるとすると、この計算に約 10.9×10^{-3} [s] の時間がかかり、現在用いているサンプリングタイムの 3×10^{-3} [s] 以内には収まらない。また、本論文の実験では、簡易動力学モデルを用いた動的制御の有効性を検証し、将来の実時間制御を準備することを目的とする。したがって、今回の実験では動力学計算はオフラインで行う。

実験は、以下の 4 通りの場合について行う。

7.2.1 動力学を考慮した場合

まず、6 章に示した方法を用いて、式 (12) により動的制御実験を行う。

$$\dot{\theta}_{com} = K_v^{-1} \tau_d + \dot{\theta}_{ff} + K_p (\theta_d - \theta) + K_d (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \tag{12}$$

ここで、サンプリングの影響による遅れを補正するために $\dot{\theta}_d$ の代わりに $\dot{\theta}_{ff}$ を用いた。ただし、 $\dot{\theta}_{ff}$ はサンプリングタイム $\mu \times 0.5$ だけ時間を進めた目標速度である。

7.2.2 PD 制御のみの場合

また、比較のために動力学を考慮しない単なる PD 制御でアダプトモーションの実験を行う。このときの速度指令は次のようになる。

$$\dot{\theta}_{com} = K_p (\theta_d - \theta) + K_d (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \tag{13}$$

7.2.3 速度のフィードフォワードを付加した場合

さらに、動的制御との比較のために PD 制御に速度のフィードフォワード項を付加した式 (14) を用いて実験を行う。

$$\dot{\theta}_{com} = \dot{\theta}_{ff} + K_p (\theta_d - \theta) + K_d (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \tag{14}$$

以上の三つの実験において、アダプトモーションの 1 サイクルあたりの所要時間は 1.026 [s] とした。この所要時間は、モータのトルク飽和がなく、かつ動的制御の効果が顕著に現れるよう選定した。

7.2.4 1 サイクルの所要時間を短くした場合

比較のために、アダプトモーションの 1 サイクルあたりの所要時間を 0.552 [s] として軌道を生成し、動的制御実験を行う。

以上すべての実験において、比例ゲインは $K_p = 50.0$ [s⁻¹]、微分ゲインは $K_d = 0.5$ 、サンプリングタイムは 0.003 [s]、モータドライバゲインは $K_v = 6.5$ [Nm/(rad/s)] とした。

また、トラベリングプレートには質量 0.571 [kg] の負荷を取り付けている。

7.3 実験結果

以下の実験ではアダプトモーションを 10 回繰り返し、そのうちの 10 サイクル目のモータ 1 およびモータ 3 の回転角度データと、それを順変換して得られる作業座標系での軌道を示す。

7.3.1 動力学を考慮した制御

実験結果を Fig. 8, Fig. 9 に示す。Fig. 8 は、モータの回転角の目標値と測定値をグラフにしたもので、Fig. 9 は、モータ回転角を順変換して得られるトラベリングプレート中心の軌道をグラフに示したものである。

7.3.2 PD 制御のみの場合

実験結果を Fig. 10, Fig. 11 に示す。Fig. 10 は、モータ回転角の目標値と測定値をグラフにしたもので、Fig. 11 は、モータ回転角を順変換して得られるトラベリングプレート中心の軌道をグラフに示したものである。

7.3.3 速度のフィードフォワードを付加した場合

実験結果を Fig. 12, Fig. 13 に示す。Fig. 12 は、モータ回転角の目標値と測定値をグラフにしたもので、Fig. 13 は、モータ回転角を順変換して得られるトラベリングプレート中心の軌道をグラフに示したものである。

7.3.4 1 サイクルの所要時間を短くした場合

最後に、アダプトモーションの 1 サイクルの所要時間を 0.552 [s] と短縮した場合の実験結果を Fig. 14, Fig. 15 に示す。

7.4 考察

PD 制御の実験結果 Fig. 10, Fig. 11 では、モータ回転角、トラベリングプレートの軌道の両方で、かなり大きな偏差が見られるが、動的制御の実験結果 Fig. 8, Fig. 9 では、軌道追従性

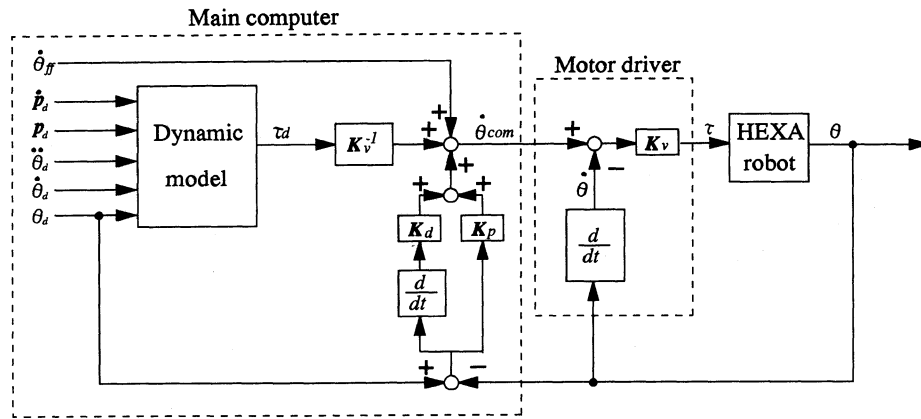


Fig.7 Block diagram of dynamic control

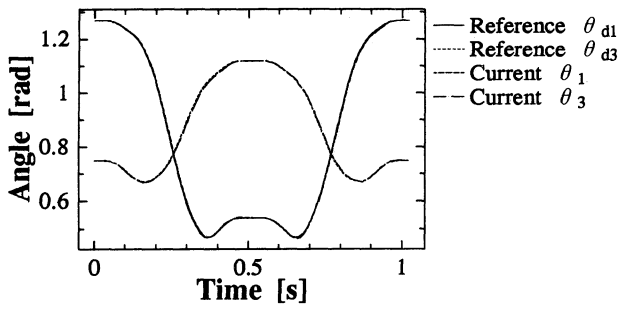


Fig.8 Motor angle (dynamic control)

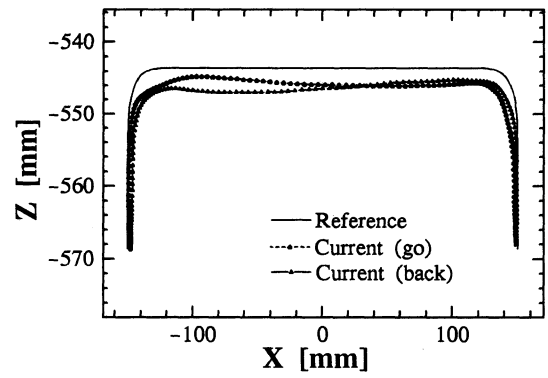


Fig.11 Trajectory of traveling plate (PD control)

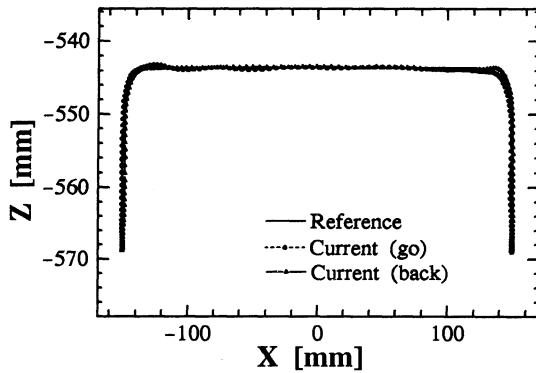


Fig.9 Trajectory of traveling plate (dynamic control)

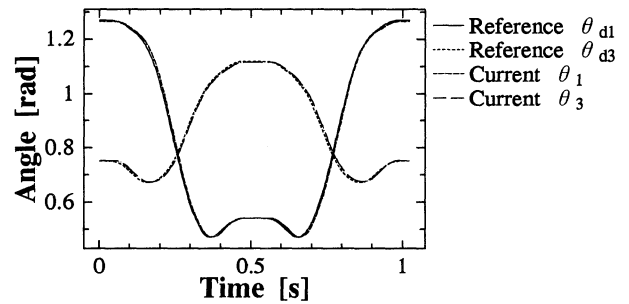


Fig.12 Motor angle (PD control with velocity feed-forward)

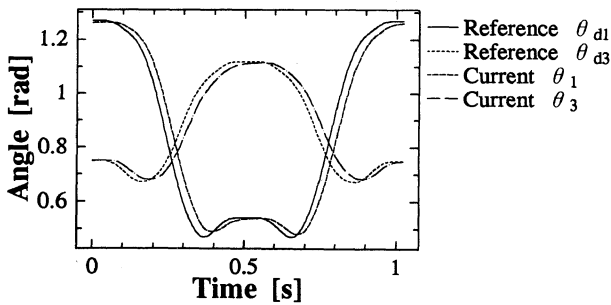


Fig.10 Motor angle (PD control)

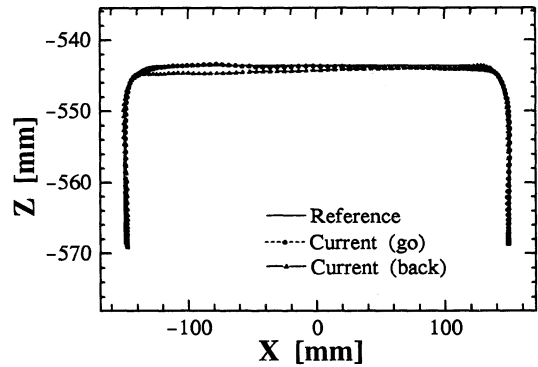


Fig.13 Trajectory of traveling plate (PD control with velocity feed-forward)

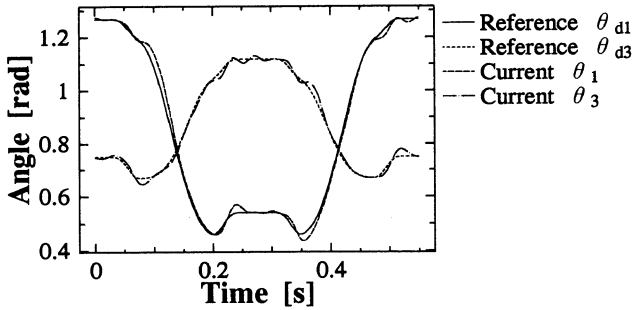


Fig. 14 Motor angle (dynamic control for cycle time 0.552 [s])

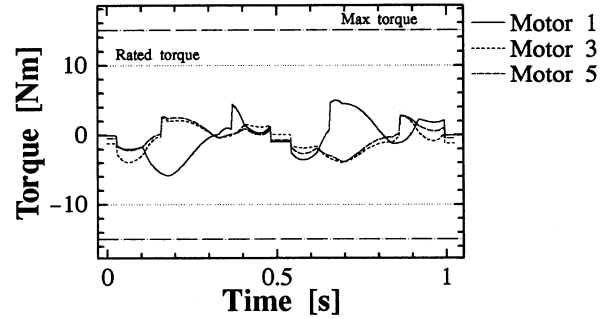


Fig. 16 Computed torques (cycle time 1.026 [s])

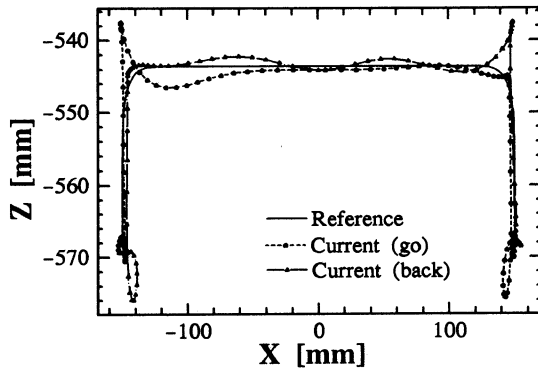


Fig. 15 Trajectory of traveling plate (dynamic control for cycle time 0.552 [s])

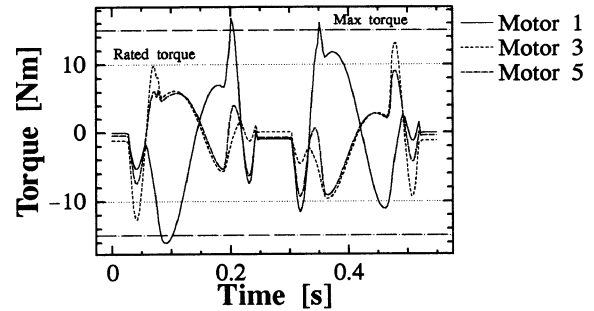


Fig. 17 Computed torques (cycle time 0.552 [s])

が大幅に向上し、目標値との偏差がほとんど見られなくなっている。

また、Fig. 12, Fig. 13 から、PD 制御に速度のフィードフォワードを付加しただけで、動的制御ほどではないが、PD 制御の場合よりかなり軌道追従性が向上することが分かる。

さらに、Fig. 14, Fig. 15 より、アダプトモーションの 1 サイクルの所要時間を短くすると動的制御を用いても軌道追従性は改善されず、逆に軌道のコーナや始点・終点において大きなオーバーシュートが発生してしまうことが分かる。

この原因としてモータトルクの飽和が考えられる。これを明らかにするため、各所要時間に対する計算トルクのグラフを Fig. 16, Fig. 17 に示す。Fig. 14 と Fig. 17 を比較されたい。1 サイクルあたりの所要時間を短くすると、それに伴い計算トルクが大きくなり、モータの定格トルクをオーバーしてしまうことが分かる。実際の制御時には動力学モデルなどの誤差から生じる軌道の偏差を修正するためのフィードバックによるトルクが計算トルクに付加されてモータドライバに速度指令値として出力される。しかし、計算トルクが大きいとモータトルクはすぐに飽和してしまうのでフィードバックによるトルクが利かなくなってしまう。これにより、アダプトモーションの軌道上でのカーブや始点および終点においてかなり大きなオーバーシュートが生じてしまうと考えられる。したがって、計算トルクが定格トルクや最大トルク以上になるような軌道においては、動的制御を用いても軌道追従性は改善されず、逆にオーバーシュートという問題が発生してしまうものと考えられる。

8. おわりに

高速性に優れた能力を持つ HEXA ロボットに、軌道追従性を向上させるために動的制御を導入した。HEXA ロボットの簡易動力学モデルを用いて、運動方程式を導出し、運動方程式に必要な各パラメータを同定した。そして、この運動方程式を用いて動的制御を実現し、その有用性をアダプトモーションを用いた実験により確かめた。その結果、計算トルクがモータの定格トルク以下であるような加速度での運動には、動的制御が軌道追従性を大幅に改善させることが分かった。また、動的制御を用いなくても速度のフィードフォワードを PD 制御に付加するだけで軌道追従性は、かなり改善されることを示した。しかし、計算トルクが定格トルクや、最大トルク以上になるような軌道においては、動的制御を用いても軌道追従性は改善されず、逆にオーバーシュートという問題が発生することが明らかになった。

参考文献

- [1] 特集パラレルメカニズム, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.6, pp.695-796, 1992.
- [2] Special Issue on Parallel Closed-Kinematic Chain Manipulators and Devices, J. of Robotic Systems, vol.10, no.5, pp.561-790, 1993.
- [3] 津坂祐司, 福泉武史, 井上博允: "パラレルマニピュレータの設計と機構特性", 日本ロボット学会誌, vol.5, no.3, pp.180-187, 1987.
- [4] 舟橋宏明, 堀江三喜男, 久保田哲也, 武田行生: "6 自由度空間パラレルマニピュレータの開発", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.56, no.523, pp.829-834, 1990.
- [5] T. Arai, K. Cleary, T. Nakamura, H. Adachi and K. Homma: "Design, Analysis and Construction of a Prototype Parallel Link Manipulator," Proc. IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and

- Systems'90, pp.205-212, 1990.
- [6] 町田和雄, 戸田義継, 岩田敏彰, 板倉省一, 小松 督: “3自由度パラレル機構と宇宙スマート効果器への応用”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.1, pp.105-111, 1994.
- [7] F. Pierrot, M. Uchiyama, P. Dauchez and A. Fournier: “A New Design of a 6-DOF Parallel Robot,” J. of Robotics and Mechatronics, vol.2, no.4, pp.308-315, 1990.
- [8] 内山 勝, 飯村憲一, 多羅尾進, フランソワ・ピエロ, 外山 修: “6自由度高速パラレルロボット HEXA の開発”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.3, pp.117-124, 1994.
- [9] 内山 勝, 飯村憲一, 多羅尾進: “パラレルロボット HEXA の運動学”, 計測自動制御学会東北支部第130回研究会資料, 資料番号130-10, 1991.
- [10] 益川和之, 内山 勝: “パラレルロボット HEXA の動的制御”, 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.859-872, 1993.



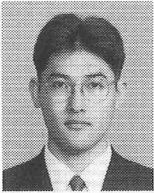
内山 勝 (Masaru Uchiyama)

1949年9月16日生。1972年東京大学工学部産業機械工学科卒業, 1977年同大学院博士課程修了, 工学博士。同年東北大学工学部精密工学科助手, 1980年同助教授, 1992年同学部機械航空工学科教授。ロボット工学の研究に従事。日本航空宇宙学会北部支部幹事。(日本ロボット学会正会員)



佐渡友哲也 (Tetsuya Sadotomo)

1970年2月20日生。1993年東北大学工学部精密工学科卒業。1995年同大学大学院修士課程(工学研究科精密工学専攻)修了。同年(株)東芝入社。(日本ロボット学会学生会員)



益川和之 (Kazuyuki Masukawa)

1970年7月4日生。1992年東北大学工学部精密工学科退学(飛び級)。1994年同大学大学院修士課程(工学研究科精密工学専攻)修了。同年(株)東芝入社。現在, 生産技術研究所勤務。