

6 軸材料試験機の力制御

藤原基芳*, 増田峰知*, 大久保善之**, 加藤典彦**

Force Control of 6 D.O.F. Material Testing Machine

by Motoyoshi FUJIWARA, Takanori MASUDA, Yoshiyuki OKUBO,
and Norihiko KATO

It is general to use a special machine for material test. In this research we use the parallel mechanism with six degrees of freedom for material test. Parallel mechanism has advantages that it is controlled with fine accuracy on high load. The compression test and the bending test was performed under some conditions. Hybrid control law of position and force based on the damping control is used.

Key words: parallel mechanism, damping control, material test, 6 D.O.F., position and force hybrid control.

1. はじめに

現在, 材料試験を行なうには圧縮試験機や曲げ試験機のような専用の試験機, あるいは万能試験機のように, 引張, 圧縮, 曲げが可能な材料試験機を用いるのが一般的である. しかし, 材料の自由度は並進運動が 3 自由度, 並進運動方向を軸にしたそれぞれの回転運動が 3 自由度の計 6 自由度であり, すべての動きを万能試験機で扱うことはできない. また, 万能試験機ではそれぞれの試験に応じて治具の取り付けが必要となり, わずらわしさが生じる. そこで本研究では, 手先に 6 自由度を持つパラレルメカニズム(図 1)を材料試験機に用いることに着目する.

パラレルメカニズムとは, 複数のリンクを用いて手先に複数の自由度を持つように同期させる閉リンク機構である. 同様に手先に複数自由度を持つ機構として, シリアルメカニズム(図 2)がよく

知られている. しかし, シリアルメカニズムはリンクが直列に連なっているため, ベースに近いモータによる誤差が手先にまで影響し, 高精度な位置決めは望めない. また, 手先での出力特性が, 非等方であるため, 材料試験機には不向きである. それに対しパラレルメカニズムはリンクが並列に

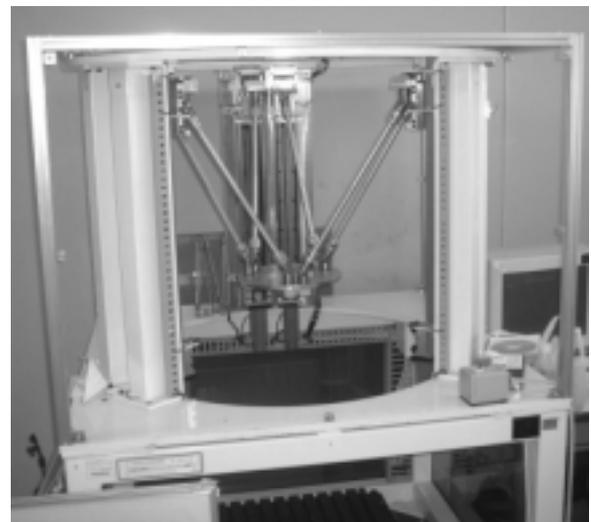


図 1 パラレルメカニズム

* 金属研究室研究グループ

** 三重大学大学院工学研究科

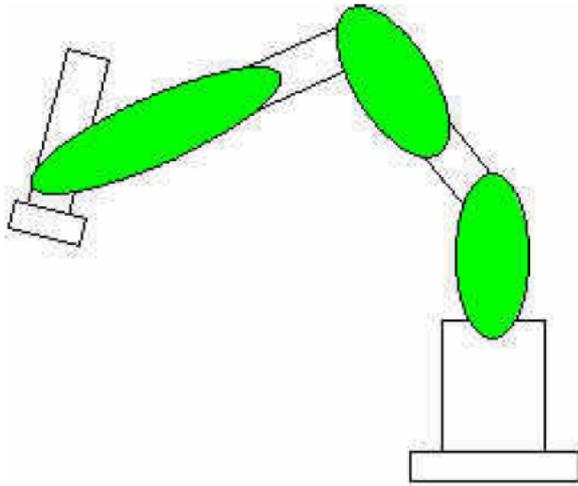


図2 シリアルメカニズム

連っており高精度な位置決めが可能である¹⁾⁶⁾。また、出力特性は等方性を示す。

パラレルメカニズムを用いることで、上述の試験以外にせん断試験やねじり試験などが可能となる。さらに従来の試験に加えて、材料をひねりながら引張、圧縮するという試験も可能となり、材料試験の幅が広がると期待できる。

対象とする材料試験については、一定の力を与えたときに材料がどれだけ変位するかを調べる力-変位試験とする。このためパラレルメカニズムに力制御を適用する⁴⁾⁵⁾。

本研究では、材料に複数自由度の負荷または変位を与えることが可能な6自由度材料試験機の実

現を目指し、押し付け動作とモーメント負荷試験の動作確認実験を行った。

2. 6軸材料試験機について

2.1 位置と力のハイブリッド制御

材料に6自由度の負荷または変位を与えるために、位置と力のハイブリッド制御を適用した²⁾。位置と力のハイブリッド制御とはある軸方向/軸周りに力/トルク制御を行ない、その他の方向に対しては位置/姿勢制御を行なうものである。力/トルク制御を行なう軸を選択するために選択行列 (Selection Matrix) と呼ばれる $S = \text{diag}[s_1, \dots, s_6]$ となる対角行列を導入する。手先の位置、姿勢を示すベクトルを $x = [x_1, \dots, x_6]^T$ とする。 S の各対角要素 $s_i (i=1, \dots, 6)$ について、対応する座標軸が力/トルク制御を行なう場合は $s_i=1$ 、位置/姿勢制御を行なう場合には $s_i=0$ とおく。これにより力制御を行なう座標系は Sx 、位置/姿勢制御を行なう座標系は $(I-S)x$ で表すことができる。図3に位置と力のハイブリッド制御の構成を示す。

2.2 ダンピング制御

力制御のうち、ロボット手先に作用する抗力に応じて物体の速度を修正する制御方法をダンピング制御という。他に一般的なものとして、位置と速度と加速度を扱うインピーダンス制御がある³⁾。本研究でダンピング制御を用いる理由は、一般に

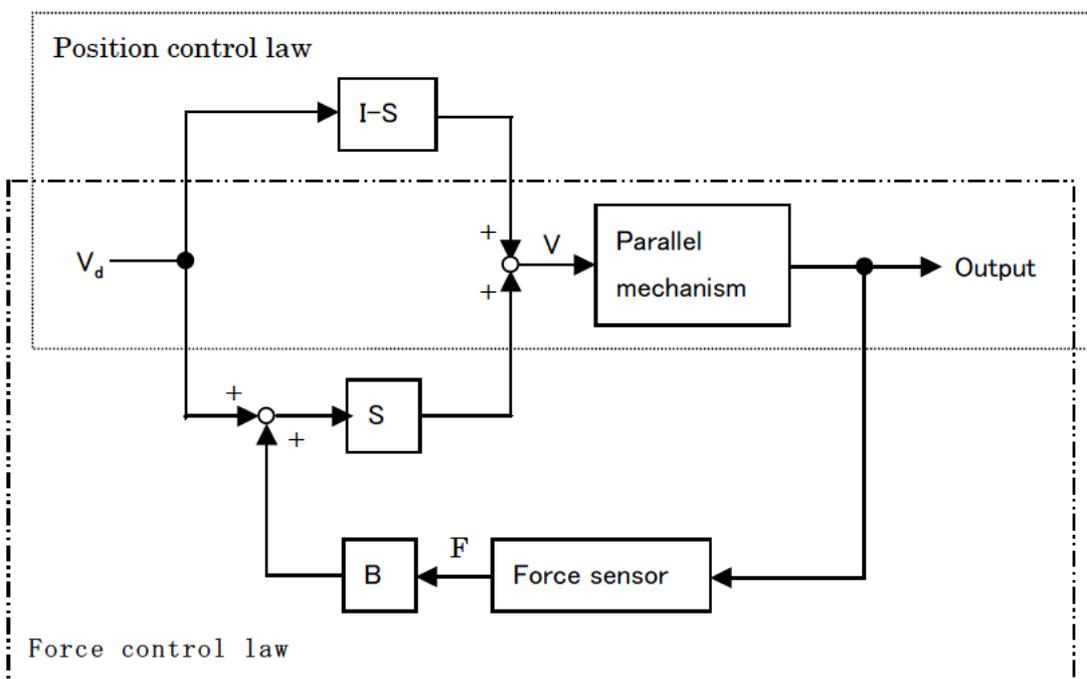


図3 ハイブリッド制御のブロック線図

ロボットが速度指令で動作することにある。速度指令で動作するロボットに対しては、速度を扱うダンピング制御が適用しやすい。そのため、本研究ではダンピング制御を用いて力制御を行なう。

手先の目標速度を V_d 、手先に加わる外力を F 、アドミッタンスを B 、手先速度 V として、それらの関係は式(2.1)のようになる。

$$V = V_d + BF \quad \dots (2.1)$$

手先が自由空間にある場合、外力 F は 0 となるので、式(2.2)が成り立つ。

$$V = V_d \quad \dots (2.2)$$

式(2.2)により手先速度が目標速度に達する。また、手先が拘束空間にある場合は、手先速度 V が 0 となるため、以下の式(2.3)が成立する。式(2.3)において、目標速度 V_d を変えることで手先に発生する力を制御することが可能となる。

$$F = -\frac{V_d}{B} \quad \dots (2.3)$$

以上のブロック線図を図 3 の”Force control law”の部分に示す。

2. 3 6 軸材料試験機の構成

6 軸材料試験機はパーソナルコンピュータと平行メカニズムと力センサで構成される。装置の構成を図 4 に示す。また、図 5 に指令情報とセンサ情報の流れを示す。まず、パーソナルコンピュータからの指令が D/A ボード、モータドライバを介して各サーボモータへ出力される。サーボモータが回転することでボールねじとつながったリンクが上下し、材料に変位、姿勢変化を与えることが可能となる。さらに、手先に取り付けた力センサが材料に加わる力、モーメントを計測し、その値がパーソナルコンピュータへ取り込まれる。使用した機器の仕様を以下に示す。

平行メカニズム

- 幅 1.2 m × 幅 1.2 m × 高さ 1.8 m
- 垂直方向の動作領域 最大 500 mm
- 最大可搬重量 60 kg
- 最大押しつけ力 1200 N
- ボールねじピッチ 10 mm

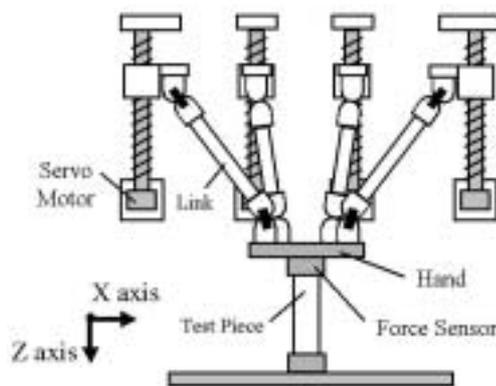


図 4 平行メカニズムと試験片

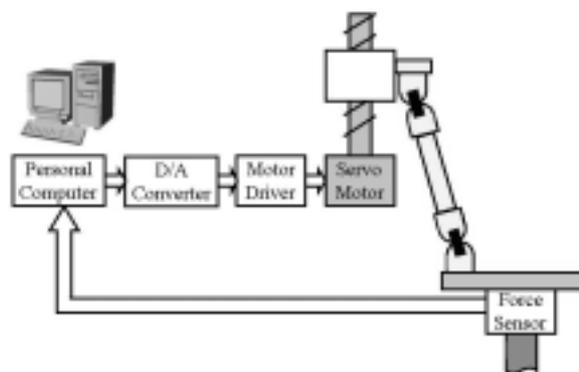


図 5 システム構成

力覚センサ

■ 定格力、トルク：

- X 軸方向，Y 軸方向：400N
- Z 軸方向：800N
- X 軸周り，Y 軸周り，Z 軸周り：40N・m

パーソナルコンピュータ

- CPU PentiumIII 933 MHz
- メモリ 512 MB
- OS ART-Linux 2.4.22
- 制御周期 10 ms

AC サーボモータ

- 定格出力：100 W 定格トルク：0.32 N・m 最大トルク：0.95 N・m
- 定格回転速度：3000 rpm 最大回転速度：4500 rpm
- サーボアンプ方式：正弦波 PWM 制御
- 位置検出：アブソリュートエンコーダ方式 (8192 pulse/rev)

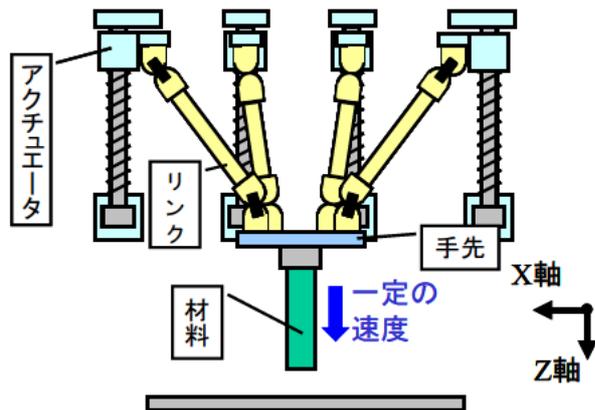


図 6 z 軸方向への押し付け試験

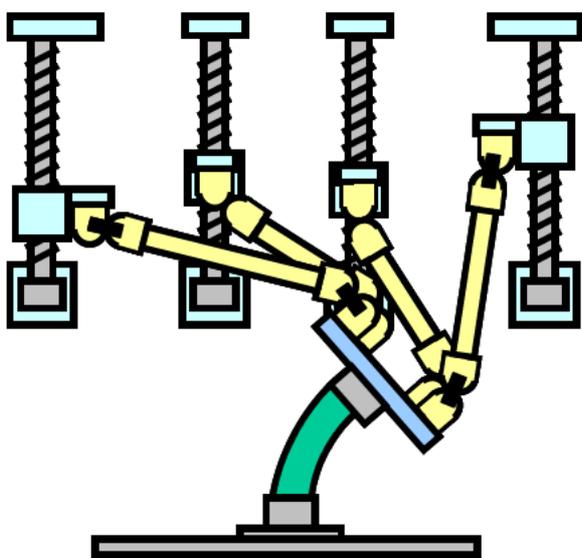
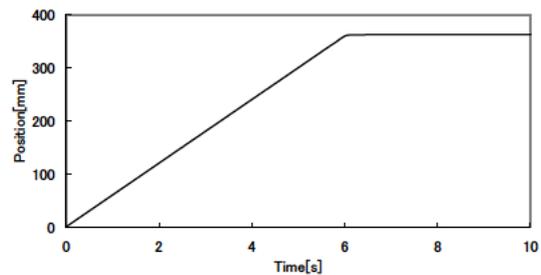
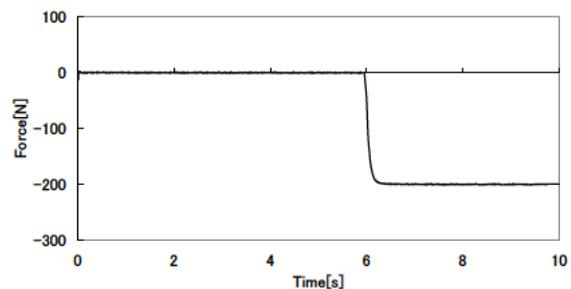


図 7 y 軸周りのモーメント負荷試験



(a)エンドエフェクタの z 座標



(b)z 方向の力

図 8 押し付け試験

3. 実験と考察

材料試験時の動作を想定して、Z 軸方向への押付動作の実験と Y 軸周りにモーメントを与えるモーメント負荷試験を行なった。

押付動作はまず、自由空間から鉛直下向きへ移動させる(図 6)．そして土台に接触後、一定の力をかける．この際位置と力のハイブリッド制御を用い、Z 軸に力制御、その他の軸に位置制御を行った。

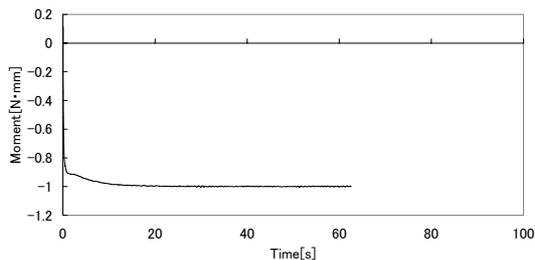
またモーメント負荷試験は、両端固定の状態から指定した値になるまで Y 軸周りのモーメントを与える(図 7)． X 軸周り、Z 軸周りについてはモ

	押付動作	モーメント負荷試験
力 F_x [N]		0
力 F_z [N]	-200	0
モーメント M_y [N・mm]		-1
目標速度 V_d [mm/s]	60	4
アドミッタンス B_x [mm/(N・s)]		0.25, 10
アドミッタンス B_z [mm/(N・s)]	0.3	0.25
アドミッタンス B_{yy} [mm/(N・s)]		0.25, 2, 10

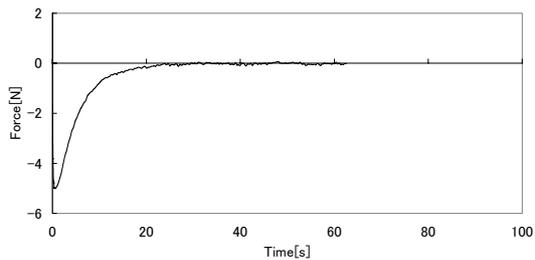
表 1 実験パラメータ

	円柱型ウレタンゴム A	円柱型ウレタンゴム B
直径 [mm]	50	50
高さ [mm]	200	200
断面積 [mm ²]	1963	1963
ばね定数 [N/mm]	41.7	185.2

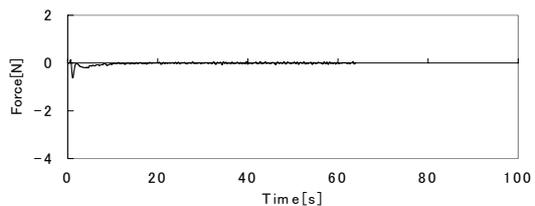
表 2 ウレタンゴムの形状とバネ定数



(a) y 軸周りのモーメント



(b) x 軸方向の力



(c) z 軸方向の力

図 9 モーメント負荷試験 ($B_x=0.25, B_{ry}=10$)

モーメントが 0 になるように制御を行った。また、X, Y, Z 軸方向には力が 0 になるように制御を行った。表 1 にダンピング制御における押付動作、モーメント負荷試験の各パラメータを示す。材料は 2 種類のウレタンゴムを用いる。それぞれのウレタンゴムの形状とばね定数を表 2 に示す。ばね定数は市販の圧縮試験機 (保証制度 1%) を用いた実測値である。

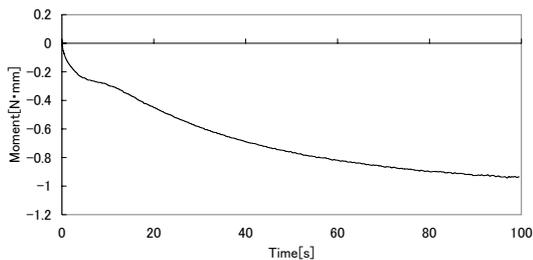
押付動作、モーメント負荷試験の結果を図 8, 図 9, 図 10, 図 11 に示す。

まず、押付動作では図 8 (a) に示すように、時間とともに Z 軸方向の位置が増えていき、約 6 秒あたりで一定の値をとっている。これは土台に接触し静止した状態を表す。また図 8 (b) では、約 6 秒までは 0N であり自由空間上にあることが分かる。約 6 秒での接触とともにスムーズに力が発生し、目標値である -200N にオーバーシュートなく安定している。このことより、押付動作が期待通り行なえたといえる。また、0N から -200N に達するまでの時間は約 0.5s である。

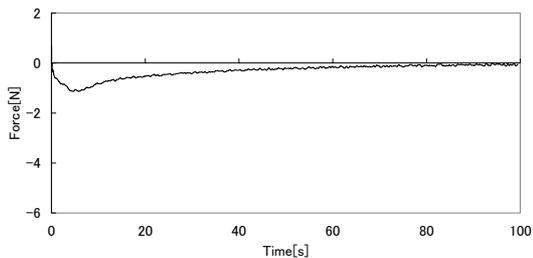
次に、モーメント負荷試験では $B_{ry}=10$ の図 9 (a) においてモーメント M_y が目標値 $-1\text{N}\cdot\text{m}$ にオーバーシュートなく安定している。かかった時間は約 23 秒である。しかし、図 9 (b) では力をかけるべきでない X 軸に力が発生している。また、図 9 (c) に示す Z 軸方向の力についてはほとんど発生していない。X 軸方向への力の最大値は -5N をとっているため、材料へ余分な力がかかっている。ただし、定常状態では 0N に収まっていることからダンピング制御が働いていることが分かる。そこで、 B_{ry} を 0.25 と小さくして実験を行なった。その結果を図に示す。図 10 (b) では X 軸に発生する力が最大 -1N と小さくすることができた。しかし、 M_y が目標値に達するまでの時間は 142s かかった。また、図 11 に示すように B_x を 10 にとると発散した。よって、静的なモーメント負荷試験に関しては極力小さいアドミッタンスをとる必要がある。

4. まとめ

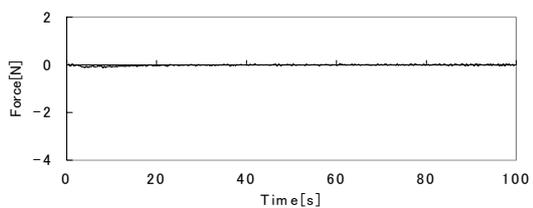
パラレルメカニズムを応用した材料試験機で押付動作、モーメント負荷試験の実験を行った。ハイブリッド制御の導入により、押付動作、モーメ



(a) y 軸周りのモーメント



(b)x 軸方向の力



(c)z 軸方向の力

図 10 モーメント負荷試験($B_x=0.25, B_{ry}=0.25$)

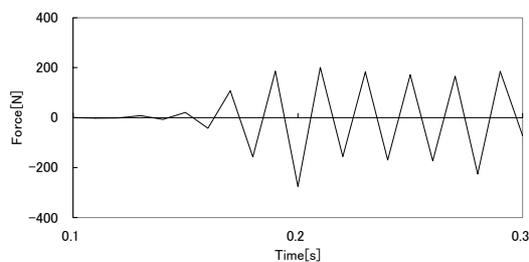


図 11 モーメント負荷試験($B_x=10, B_{ry}=2$)

ント負荷試験が行なえた。押付動作に関してはスムーズな力制御が行なえ、一定の力を与えることができたといえる。しかしモーメント負荷試験に関しては、アドミッタンスの設定によっては安定となったり、不安定となったりする。また同じくアドミッタンスによって力を与えたい方向以外にも力が発生してしまう。これらの問題を解消するには、時間はかかるがアドミッタンスを極力小さい値にすることが良いと考えられる。

現在、この試験機を用いて脊椎のモーメント負

荷試験を行っている。今後の課題は、制御の安定化、試験時間の短縮、およびこの試験機の他の材料への適用である。

参考文献

- 1) 舟橋宏明：“ロボット機構としてのパラレルメカニズム”.日本ロボット学会誌, 10(6),p.699-704, (1992).
- 2) 小菅一弘ほか：“油圧アクチュエータを用いたパラレルリンクマニピュレータの力制御”,日本機械学会論文集(C 編), 62(601), p.3536-3542, (1996-9).
- 3) 小菅一弘：“力制御法の分類と制御システムの設計法” 日本ロボット学会誌, 9(6),p.751-758, (1991).
- 4) 杉本浩一：“パラレルマニピュレータの力解析”,日本ロボット学会誌,10(6),p.11-14,(1992)
- 5) 小菅一弘ほか：“パラレルリンクマニピュレータの力解析”, 日本機械学会(C 編), 60(575), p.2338-2344, (1994).
- 6) 新井健生：“静力学に基づくパラレルリンクマニピュレータの解析と統合”, 日本ロボット学会誌, 10(4),p.526-533, (1992).