

# ロボットによるなぞり動作

- パラレルメカニズムの位置/力 ハイブリッド制御系の構築と実験 -

藤原基芳<sup>\*</sup> , 増田峰知<sup>\*</sup>

Tracing with a robot

-Development of position/force hybrid control system with parallel mechanism-

by Motoyoshi FUJIWARA, and Takanori MASUDA

Parallel mechanism has advantages that it is controlled with high accuracy on high load. Therefore, the application to high load work is expected. For high load work, force control is indispensable. In this report, a force control system of a parallel mechanism was built. The control system is carried out based on the damping control. Moreover, hybrid control of position and force is also enabled. Furthermore, experiment of forcing was preformed.

Key words: parallel mechanism, damping control.

## 1. はじめに

パラレルメカニズムは、現在広く用いられているシリアルリンク機構に比べて、動作領域が小さいという欠点がある。しかし、機構の剛性が高く、高負荷においても精度よく制御することができるなど、シリアルリンク機構にはない利点も多く持っている。したがって、高負荷作業への応用が期待されている。パラレルメカニズムの力制御技術は、高負荷作業への応用に欠くことができないものであり、いくつかの研究が行われている<sup>1)</sup>。

本研究ではパラレルメカニズムのハイブリッド制御系を構築した。構築した制御系は力制御の一つであるダンピング制御と、位置（速度）制御を基にしている。ロボットの力制御には様々な方式がある。力を指定するだけの制御系では、エンドエフェクタが外部物体に接触したときには一定の力で押しつけ動作をするが、自由空間中では加速するため危険である。ダンピング制御は自由空間

中で一定の速度で動作し、外部物体に接触したときには一定の力で押しつける安全な制御であるので、この制御則を採用した。

さらに、構築した制御系の検証のため、パラレルメカニズムのエンドエフェクタに把持した物体の押しつけおよびなぞり動作の実験を行った。

## 2. ダンピング制御<sup>1)</sup>とは

ダンピング制御とは、ロボットハンド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である。具体的には次式で表される。

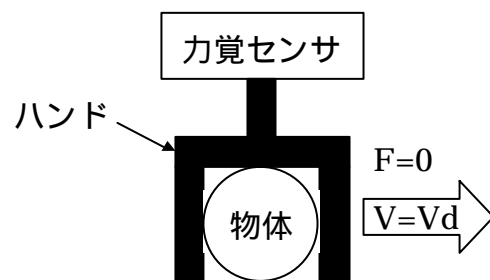


図1 外部物体に接触していない場合

\* 金属研究室研究グループ

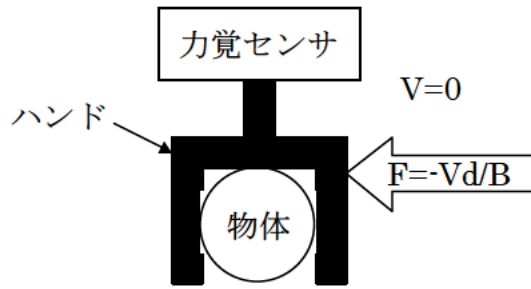


図2 外部物体に接触した場合

$$V = V_d + BF \quad (1)$$

ここで $V$ はロボットハンドの速度,  $V_d$ は目標速度,  $B$ はアドミッタンス, および $F$ はロボットハンドに作用する抗力(力覚センサに検出される力)である. このうち,  $V_d$ と $B$ は, ロボットの動作前に設定しておく.

今,  $V_d=30[\text{mm/s}]$ ,  $B=1[\text{mm/s/N}]$ と設定した場合を考える.

ロボットハンドが外部の物体に接触していない場合, 力覚センサに検出される力は $F=0[\text{N}]$ であり,  $F=0$ を式(1)に代入すると, ロボットハンドの速度は $V=V_d(=30[\text{mm/s}])$ となり, ロボットハンドは $V_d$ の初期設定値 $30[\text{mm/s}]$ で自由空間を動く(図1).

ロボットハンドが外部の物体に接触した場合, 力覚センサに検出される力 $F<0$ となる.  $F$ の絶対値が徐々に大きくなり,  $F=-30[\text{N}]$ になった場合を考える.  $F=-30[\text{N}]$ を式(1)に代入すると, ロボットハンドの速度 $V=0[\text{mm/s}]$ となる. したがって, ロボットハンドは外部環境に $-30[\text{N}]$ の力を与えながら静止する(図2).

このように,  $V_d$ と $B$ を指定することにより, マニピュレータが空間中を運動するときの最高速度と, 外部の物体に接触したときの接触力を指定することができる.

ただし, 式(1)より,  $B$ の値が大きいときは,  $F$ の変化に対して $V$ の変化が大きくなることがわかる. したがって, ロボットハンドが外部の物体に接触した時に,  $F$ は短時間で目標値 $V_d/B$ に達するが, 振動しやすくなる.

逆に,  $B$ の値が小さいときは,  $F$ の変化に対して $V$ の変化は小さくなる. したがって, ロボットハンドが外部の物体に接触したときに, 振動しにくい,  $F$ が目標値 $V_d/B$ に達するのに時間がかかる.

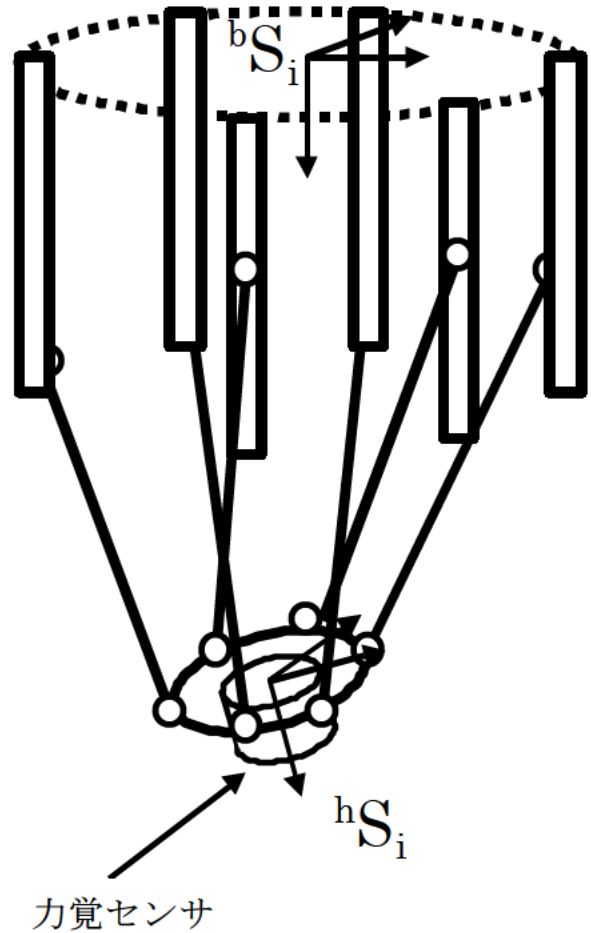


図3 パラレルメカニズムの座標系

### 3. パラレルメカニズムのハイブリッド制御

通常, 多自由度系を用いた作業では, 全ての自由度に対して力制御が必要とされることは少なく, ある方向には力制御を行い, そのほかの方向に対しては位置制御を行うことが多い. そこで, 本章では前章のダンピング制御を多自由度系に拡張し, さらに速度制御も考慮して, これらのハイブリッド制御系とした.

パラレルメカニズムの各軸方向, 各軸周りの速度ベクトル  $V=[V_x, V_y, V_z, R_x, R_y, R_z]^T$  について式(1)を適用して, 次式のような制御系を考える.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{dx} \\ V_{dy} \\ V_{dz} \\ R_{dx} \\ R_{dy} \\ R_{dz} \end{bmatrix} + SB \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}$$

$$B = \text{diag}[B_{fx}, B_{fy}, B_{fz}, B_{mx}, B_{my}, B_{mz}]^T$$

ここで、 $F_x, F_y, F_z$  はベース座標系(図3の ${}^bS_i$ )の各軸方向の力を、 $M_x, M_y, M_z$  はベース座標系の各軸周りのモーメントを、 $V_x, V_y, V_z$  はハンドの各軸方向の速度指令値(ベース座標系)を、 $R_x, R_y, R_z$  各軸周りの速度指令値(ベース座標系)を表す。

力制御を行う座標系を選択するために、Selection Matrix と呼ばれる

$$S = \text{diag}[S_{fx}, S_{fy}, S_{fz}, S_{mx}, S_{my}, S_{mz}]$$

なる対角行列を導入した。Sの各要素 $S_i$ ( $i=fx, \dots, mz$ )について対応する座標軸 $i$ が力制御を行う場合は $S_i=1$ , それ以外の場合には $S_i=0$ とおく。

また、パラレルメカニズムは、逆運動学計算(ハンドの位置からアクチュエータの制御量を計算)が容易である。したがって、アクチュエータへの指令値の計算には、指令速度と制御周期から計算した目標位置を用い、ヤコビ行列は使わなかった。

また、エンドエフェクタの姿勢を変えると、ハンド座標系とベース座標系の軸方向が異なる。力覚センサで検出した各軸方向の力、各軸周りのモーメントはハンド座標系のものなので、これらをベース座標系の各軸方向の力、各軸周りのモーメントに変換して用いた。<sup>2)</sup>

#### 4. 実験

当研究室保有のパラレルメカニズム(図4)を用いて把持物体の押し付けの実験を行った。制御周期は10msecである。エンドエフェクタには力覚センサと樹脂製の丸棒を取り付けている。鉛直下方にエンドエフェクタを動かし、作業台に丸棒を接触させた。実験の写真及び模式図を図5、6に示す。

最初に、無負荷状態の力覚センサからの出力データを調べた。図7はローパスフィルタ無し、図8は力覚センサに付属のローパスフィルタ(遮断周波数 7.8Hz, 遅延時間 128msec)を用いた状態でのデータである。ローパスフィルタ無しの状態では最大で $\pm 1$ [N]程度のノイズが出ているのに対し、ローパスフィルタありの状態では最大で $\pm 0.1$ [N]程度のノイズにおさまっている。

次に、鉛直方向への移動速度 $V_d=50$ [mm/s]とし、Bの値は1(静止時-50.0[N]の力を発生)、力覚センサのローパスフィルタ無し、として押し付け実験を行った。実験の結果を図9に示す。自由空間中で

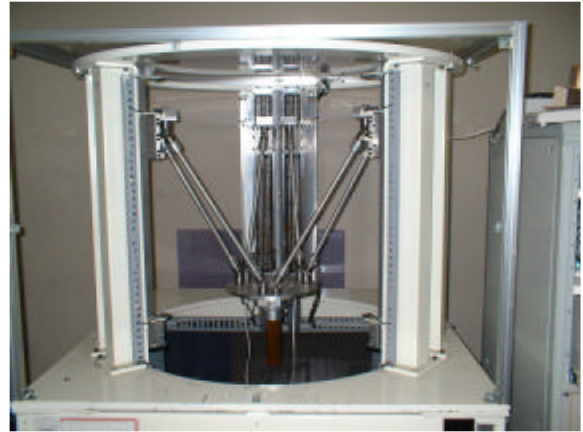


図4 実験に用いたパラレルメカニズム

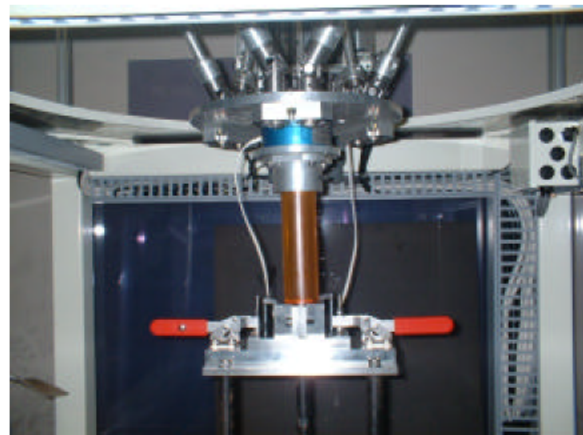


図5 動作中の実験機の写真

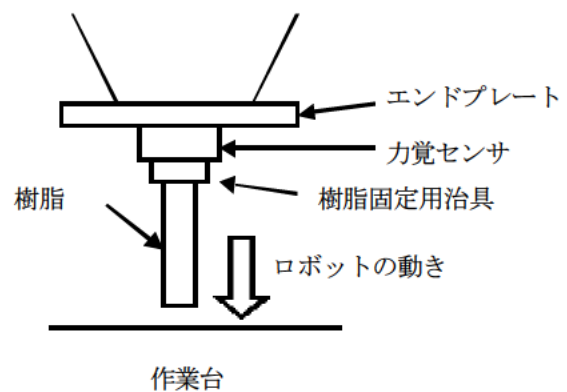


図6 実験機の動作模式図

は50[mm/s]の速度で移動し、接触時は0.2[sec]程度で-50[N]の押し付け力に達し、安定した。次に、低速に設定して( $V_d=5.0$ [mm],  $B=2.0$ , 静止時-2.5[N]の力を発生)、ローパスフィルタ無しで押し付け実験を行ったが、エンドエフェクタが鉛直方向に上下振動し、鉛直下方にスムーズに移動できなかった。式(1)より、ノイズが $\pm 1$ [N]の場合、V

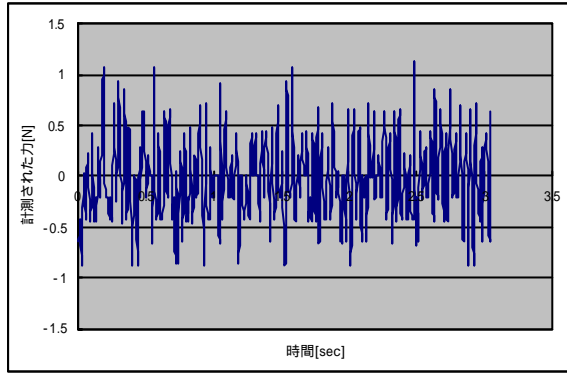


図7 無負荷状態の力覚センサデータ - ローパスフィルタ無し

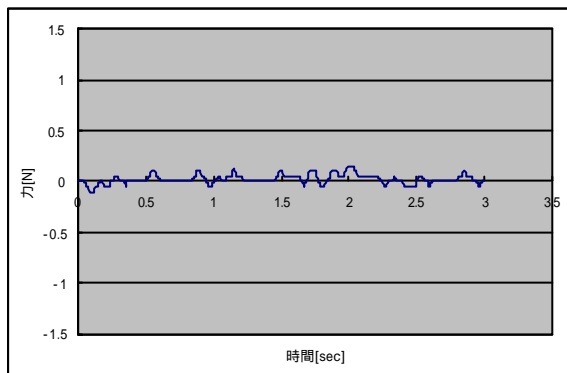


図8 無負荷状態の力覚センサデータ - ローパスフィルタあり(遮断周波数 7.8Hz, 遅延時間 128msec)

が3~7[mm/s]で変動する。したがって、 $V_d$ と $B \times$  (力覚センサのノイズ)の値が近い場合、エンドエフェクタはスムーズに移動できないと考えられる。

同じ条件で、図8で用いたローパスフィルタを使用して実験を行った。結果を図10に示す。自由空間中ではスムーズに動作したが、外部物体に接触したときに振動して収束しなかった。原因は、使用したローパスフィルタの遅延時間が大きいためであると考えられる。

ローパスフィルタを用いて、鉛直下方への移動速度  $V_d=5.0$ [mm/s],  $B=0.25$ (静止時-20.0[N]の力を発生)で押し付け実験を行った。実験結果を図11に示す。力覚センサに計測される力、エンドエフェクタの変位・速度ともに振動しながら設定値に収束する。

また、作業台をなぞる動作も試みた。つまり、樹脂先端を作業台に鉛直下方に押しつけながら、エンドエフェクタを水平方向に動かす試みである。運動は成功したが、制御に用いたプログラムが不

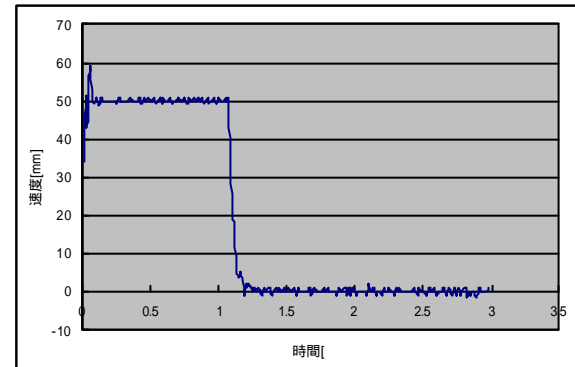
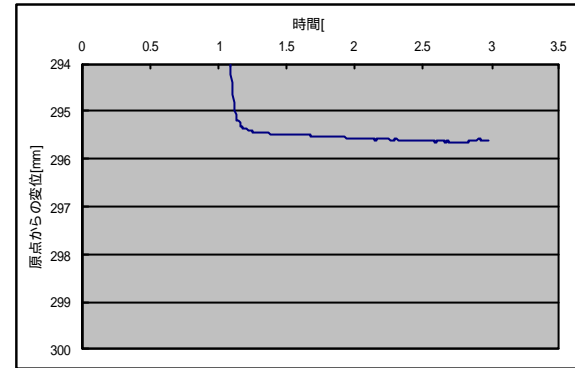
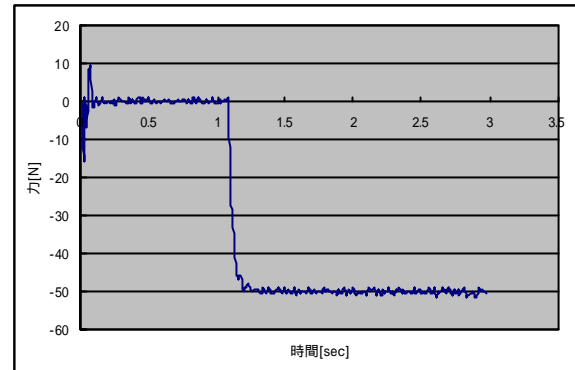


図9 力、変位及び速度の時間変化

$V_d=50.0$ [mm/s],  $B=1.0$ (押しつけ力=-50.0[N]), ローパスフィルタ無し

安定なため、十分な解析は不可能であった。

## 5. まとめ

力覚センサを用いて平行メカニズムのダンピング制御/速度制御のハイブリッド制御系を構築した。

また、構築した制御系を用いて平行メカニズムのエンドエフェクタに把持した樹脂の押しつけ実験と、なぞり動作の実験を行った。ただし、制御用プログラムが不安定なため、なぞり動作のデータは取れなかった。プログラムの安定化が、今後の課題である。

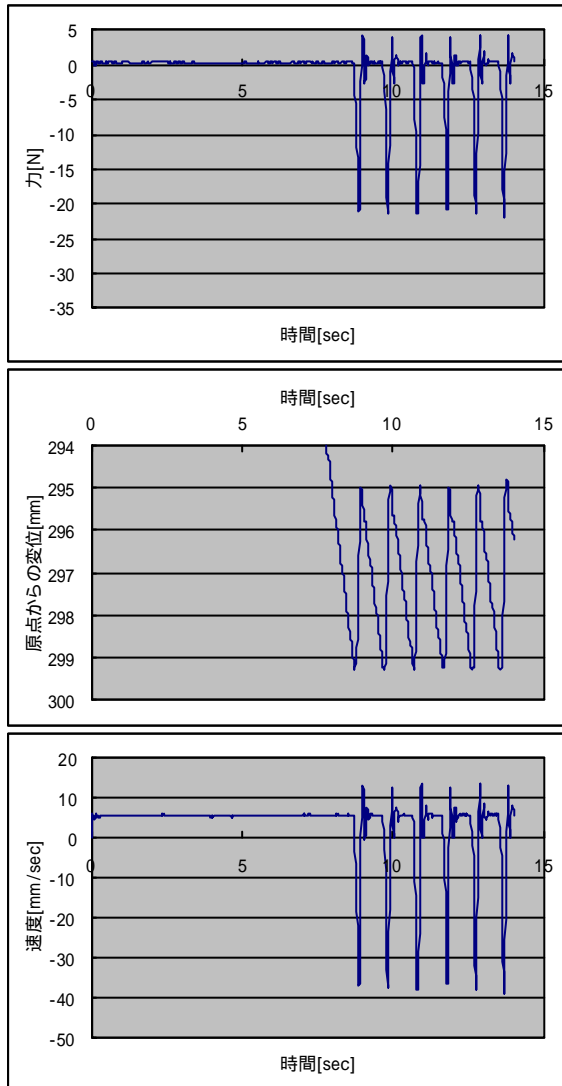


図 10 力，変位及び速度の時間変化

$V_d=5.0$  [mm/s],  $B=2.0$  (押しつけ力=-2.5 [N]), ローパスフィルタあり

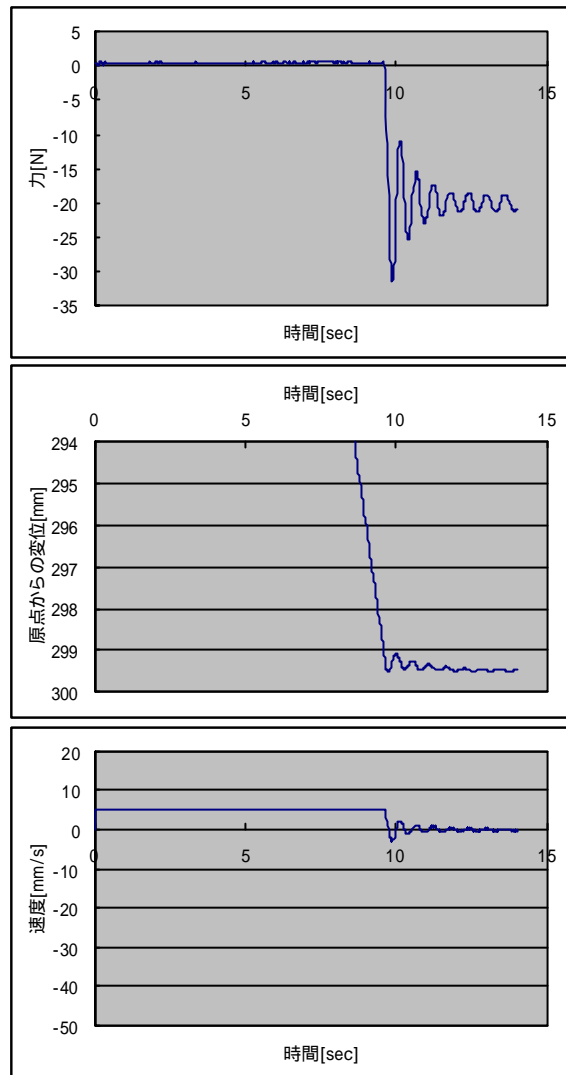


図 11 力，変位及び速度の時間変化

$V_d=5.0$  [mm/s],  $B=0.25$  (押しつけ力=-20.0 [N]), ローパスフィルタあり

### 参考文献

- 1) 小菅一弘他：“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).

- 2) 吉川恒夫：“ロボット制御基礎論”. コロナ社, p. 61-65(1988).
- 3) 近藤文治編：“基礎制御工学”. 森北出版株式会社, p. 32-39(1977).