

## 多関節型ロボットとパラレルメカニズムの協調による組立作業

藤原 基芳\*, 増田 峰知\*\*, 北垣 高成\*\*\*, 中北 賢司\*

### An Assembly Task with Cooperation of Multijoint Robot and Parallel Mechanism

by Motoyoshi FUJIWARA, Takanori MASUDA, Kosei KITAGAKI,  
Kenji NAKAKITA

It is said that the assembly of many kinds and small lots is difficult in the manufacturing industry. Large lots assembly can be automated with automated machine. When we assemble many kinds and small lots, we assemble many kinds one after the other. When we use automated machine for this task, we must change setup when the lot changes. So we can assemble them faster with hand than with automated machine. In recent years, automation prevails in the manufacturing industry, but assembly of many kinds and small lots is not automated. Solution of it is expected. So we studied automation with robot. In this report, we introduce the system for many kinds and small lots assembly. It consists of parallel kinematic machine, articulated robot, force and moment sensors, grippers, and computers. Then we explain the principle of the joystick for high degrees of freedom.

**Key words:** assembly, automation, parallel kinematic machine, articulated robot

#### 1. はじめに

製造業において、少量生産品の組み立て作業の自動化は難しいと言われている。

大量生産品の組立作業は、専用の組立機を作ることにより自動化できる。少量生産品では、ある種の製品を組み立てた後すぐ、別の種類の製品を組み立てる。機械でこの作業を行う場合、そのたびに段取り替えが必要になる。したがって、組立機で組み立てるより手作業で組み立てた方が早く組み立てることができる。

近年製造業の自動化が進んだが、少量生産品の組立作業は自動化されておらず、これを解決する技術開発が望まれている。

そこで、ロボットを用いて少量生産品の組立作業を自動化するための研究を行った。

本報告では、第2章において本年度購入したシステムについて説明し、第3章でシステムの操作に用いるジョイスティックについての研究報告を行う。第4章はまとめである。

#### 2. 多品種少量生産品組立用システム

本研究には、力の強いパラレルメカニズムと、動作範囲の広い多関節型ロボットを用いる。それらの手先に取り付けた力覚センサを用いて組み立て対象物の状態をセンシングすることにより、パラレルメカニズムと多関節型ロボットに高度な技量を持たせ、少量生産品の組立作業を自動化するための研究を行う。

研究に用いる多品種少量生産品組立用ロボットシステムの外観を図1に示す。構成は下記のとおり

\* 機械電子グループ

\*\* 金属センター研究グループ

\*\*\* 工業技術院電子技術総合研究所



図1 多品種少量生産品組立用システム

りである。

〈既存の機器〉

- ・ 6自由度パラレルメカニズム<sup>1)</sup>  
最大過般重量30kg
- 〈平成12年度新規購入した機器〉
- ・ 多関節型ロボット  
最大過般重量 10kg. 手先には力覚センサ, グリッパ付属.
- ・ パラレルメカニズム用小型エンドプレート  
グリッパ付属.
- ・ 制御用パソコン 2台  
Pentium III 850MHz, AM 128MB, HDD10GB.  
ARCNETによりリアルタイム通信可能.
- ・ エアコンプレッサ  
ロボットグリッパの動力源.

### 3. ジョイスティック

#### 3. 1 研究の目的

今までに様々なジョイスティックが開発されてきた。それにより6自由度以下のシステムを操作することができる。検出する物理量よりそれらを2つの種類に分けることができる。一つは人間の手により動かされた握り棒の位置または角度を検出する物<sup>2)</sup>, もう一つは握り棒に加えられた力またはモーメントを検出する物である。前者は構造

が複雑である。後者は構造が単純である。後者は力覚センサと握り棒より構成される。しかし操作者が力だけをかけようとしたのかモーメントだけをかけようとしたのか力とモーメントの両方をかけようとしたのかを力覚センサデータから区別するのは難しい。人間の手は力とモーメントを独立に制御できないからである。解決方法の一つとしてDLR controll ball<sup>3)</sup>が開発された。これは力覚センサ座標の原点が球状の握り棒の中心にある。これによる6自由度システム操作は他の力覚センサを用いたジョイスティックより容易である。しかし7自由度以上のシステムは操作できない。

本章では接触点検出手法を用いたジョイスティック<sup>4)</sup>を示す。これには2つの利点がある。一つは多自由度システムを操作できる点である。このジョイスティックで4自由度を同時に操作できる。そして握り棒を握る位置を変えることにより6自由度以上を操作することができる。もう一つの利点は構造が簡単なことである。このジョイスティックは6軸力覚センサと握り棒より構成される。

このジョイスティックの原理を3. 2節で示す。握り棒が握られている位置を検出する手法を3. 3節で示す。接触点検出手法の実験を3.4節に示す。3. 5節で本章をまとめる。

#### 3. 2 ジョイスティックの原理

##### 3. 2. 1 操作対象となる軸の決定原理

ジョイスティックを図2に示す。

ジョイスティックにより操作されるシステムに $a_n, b_n, c, d$ 軸があると仮定する。人間が $z=z_p$  ( $p=1, \dots, N$ )の位置を握り、 $f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z$ の力とモーメントが検出されたとき、操作対象の目標値は以下のように決定される。

$$a_p = k_{ap} \times f_x, \quad b_p = k_{bp} \times f_y$$

$$c = k_c \times m_z, \quad d = k_d \times m_z$$

$$a_n = b_n = 0 \quad (n \neq p)$$

この原理により

1. 同時に4軸の操作ができる。
2. 人の指が触れている位置を変えることにより2N+2軸の操作ができる。

#### 3. 3 力覚センサによる接触点検出

##### 3. 3. 1 一点接触の場合の接触点検出<sup>5), 6)</sup>

図3に示すように握り棒と指が力学的に平衡状

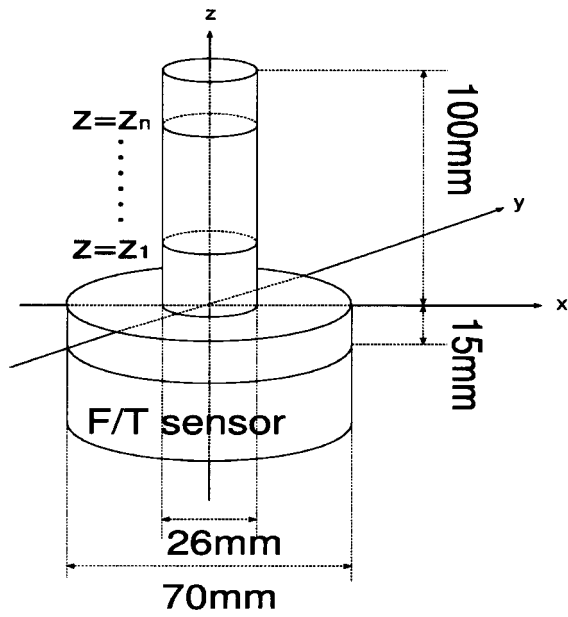


図2 ジョイスティック

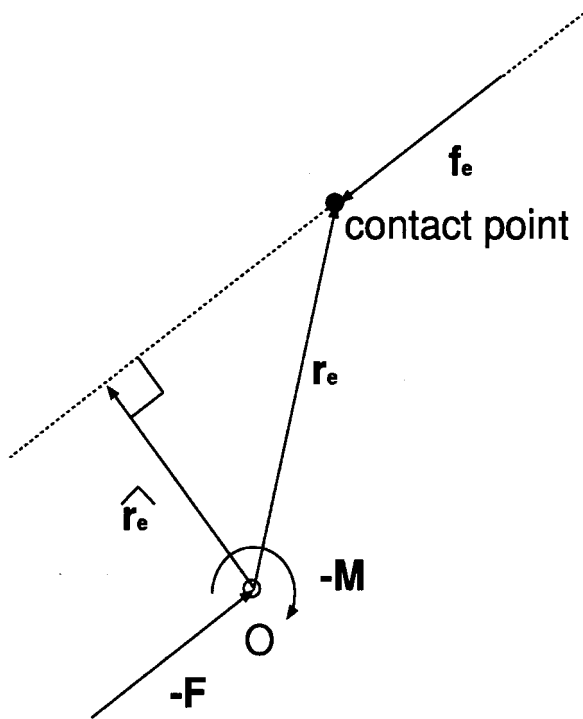


図3 力覚センサに検出された力・モーメントと握り棒に加えられた力・モーメントの関係

態にあるとする。接触点にはモーメントは加えられていない。接触点位置ベクトル、指からの外力、計測される力とモーメントが  $r_e, f_e, F, M$  で与えられるとすると、次の関係が得られる。

$$F = f_e \quad (1)$$

$$M = r_e \times f_e \quad (2)$$

式(1)と(2)をまとめると以下のようになる。

$$M = r_e \times F \quad (3)$$

式(3)より幾何学的関係を用いて下記のように  $r_e$  が得られる。

$$r_e = \hat{r}_e + k \frac{F}{|F|} \quad (4)$$

$$\hat{r}_e = \frac{F \times M}{|F|^2} \quad (5)$$

$|F|$  は  $F$  のノルムである。  $k$  はスカラーである。式(4)は接触点の存在する線を表している。一般的にこの式からは接触点を一意に決定することはできない。接触点を一意に決定するためにいくつかの手法が提案されている。

### 3. 3. 2 ジョイスティックのための接触点検出法

本稿の条件では接触点の  $z$  座標のみがわかればよい。しかし一点接触のための接触点検出手法を用いた場合、接触点の正確な  $z$  座標を検出できない。握り棒は複数の指で握られるからである。そこで、下記の4つの手法について検討した。

- 1 幾何学モデルを用いる方法
- 2  $z$  軸を参照物体とする疑似接触点モニタリング
- 3  $z$  軸方向の力を用いないで式(5)を計算する方法
- 4  $x, y$  方向の力とモーメントの関係を用いる方法

### 3. 3. 3 解析モデル

図4のモデルに基づいて手法を考えた。

2本の指が  $r_1$  と  $r_2$  において握り棒に力を加えるとする。人間は2本の指の間にできるだけ  $x, y$  軸周りのモーメントを加えないものとする。図中の  $r_1, r_2, F_1$  と  $F_2$  は下記のように定義される。

$$r_1 = (r \ 0 \ z)^T \quad (6)$$

$$r_2 = (-r \cos \theta \ -\sin \theta \ z+d)^T \quad (7)$$

$$F_1 = (F_{1x} \ F_{1y} \ F_{1z})^T \quad (8)$$

$$F_2 = (F_{2x} \ F_{2y} \ F_{2z})^T \quad (9)$$

握り棒の半径は  $r$  とする。力覚センサに検出される力とモーメントは下記のように計算される。

$$F_1 = (F_x \ F_y \ F_z)^T = F_1 + F_2 \quad (10)$$

$$M = (M_x \ M_y \ M_z)^T = r_1 \times F_1 + r_2 \times F_2 \quad (11)$$

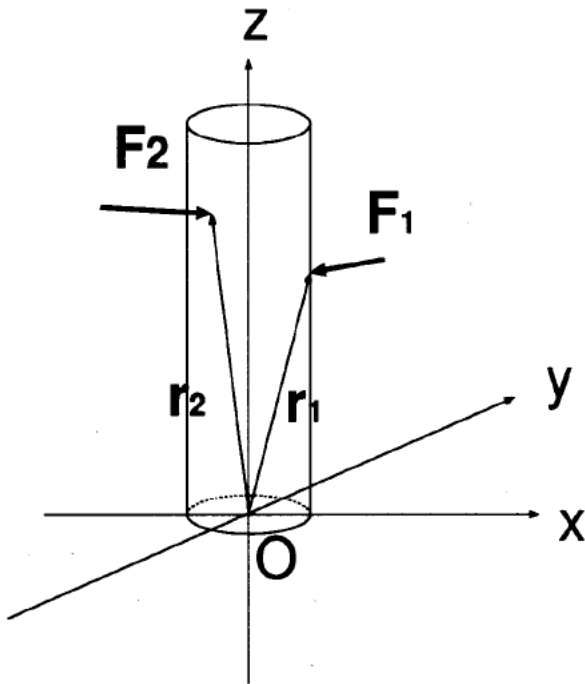


図4 2点接触の場合のモデル

### 3. 3. 4 幾何学モデルを用いる手法

式(4)中の  $r_e$ ,  $r_e^{\wedge}$ ,  $F/|F|$  を下記のように定義する.

$$r_e = (x \ y \ z)^T, \quad r_e^{\wedge} = (\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{z})^T, \quad \frac{F}{|F|} = (F_{nx} \ F_{ny} \ F_{nz}) \quad (12)$$

下記の式を解くと力の作用線と握り棒の交点を計算することができる.

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (13)$$

解は下記の通りである.

$$k = \frac{-(xF_{nx} + yF_{ny}) \pm \sqrt{D}}{F_{nx}^2 + F_{ny}^2} \quad (14)$$

$$D = (\hat{x}F_{nx} + \hat{y}F_{ny})^2 - (F_{nx}^2 + F_{ny}^2)(\hat{x}^2 + \hat{y}^2 - r^2) \quad (15)$$

一点接触の場合、力ベクトルの方向より小さい方の  $k$  が解である。これを式(4)に代入すると接触点を求めることができる。しかし、2点接触の場合、 $F_{1z}, F_{2z} \ll \sqrt{(F_{1x} + F_{2x})^2 + (F_{1y} + F_{2y})^2}$  の場合以外、接触点の  $z$  座標を正確に求めることができない。また、 $z$  軸周りのモーメントが大きい場合  $D < 0$  となり、解がない。

### 3. 3. 5 $z$ 軸を参照物体とする疑似接触点モニタリング

疑似接触点は定義された参照物体に対する力の作用線上の最近点である<sup>7)</sup>。

参照物体が  $z$  軸の場合  $x^2 + y^2$  を最小にする  $k$  を求めればよい。解は下記の通りである。

$$k = \frac{-(\hat{x}F_{nx} + \hat{y}F_{ny})}{F_{nx}^2 + F_{ny}^2} \quad (16)$$

これは式(14)の2つの解の平均でもある。 $F_z$  が変化した場合 3.3.4 項の手法により求められた  $z$  よりこの手法で求められた  $z$  の変化の方が小さい。

### 3. 3. 6 $z$ 軸方向の力を用いないで式(5)を求める方法

$F_z = 0$  とした式(5)を式(6)~(11)に代入する

$$\hat{z} = z + \frac{(F_{1x} + F_{2x})(dF_{2x} + F_{2y} - rF_{1z} + r \cos \theta F_{2z})(F_{1y} + F_{2y})r \sin \theta}{(F_{x1} + F_{x2})^2 + (F_{1y} + F_{2y})^2} \quad (17)$$

$r \ll z, d \ll z$  のとき、 $\hat{z} \doteq z$  となる。

### 3. 3. 7 $x, y$ 軸方向の力とモーメントの関係を用いる方法

式(6)~(11)より次の式が得られる。

$$M_x^2 + M_y^2 = z^2 \{ (F_{1x} + F_{2x})^2 + (F_{1y} + F_{2y})^2 \} + 2z \{ r (\cos \theta F_{2z} - F_{1z}) + d F_{2x} \} + \{ r (\cos \theta F_{2z} - F_{1z}) + d F_{2x} \}^2 + 2z (F_{1y} + F_{2y}) (r \sin \theta F_{2z} + d F_{2y}) + (r \sin \theta F_{2z} + d F_{2y})^2$$

$r \ll z, d \ll z$  のとき、 $\sqrt{\frac{M_x^2 + M_y^2}{F_x^2 + F_y^2}} \doteq z$  となる。

## 3. 4 実験

3.3節の手法を用いて接触点検出の実験を行った。力覚センサのノイズの標準偏差は  $(F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z) = (0.02[\text{N}] \ 0.02[\text{N}] \ 0.03[\text{N}] \ 1.4[\text{N}\cdot\text{mm}] \ 1.0[\text{N}\cdot\text{mm}] \ 1.0[\text{N}\cdot\text{mm}])$  であった。ジョイスティックの寸法は図1のとおりである。ジョイスティックの  $z=20[\text{mm}]$  の位置と  $z=90[\text{mm}]$

(図1の座標系において、力覚センサ座標系ではそれぞれ  $z=47[\text{mm}]$ ,  $z=117[\text{mm}]$  の位置) を2本指で持って8回ずつ上方、下方、水平方向の力をかけた。そして2.3節の手法を用いて接触点の  $z$  座標を検出した。

図5に結果を示す。3.3.4項の手法では  $z=20[\text{mm}]$ ,  $90[\text{mm}]$  のどちらを握ったかを区別できなかった。しかし他の手法では区別できた。

上の実験と同様にして、 $z$  軸周りのモーメント

を加えた実験を行った。結果を図6に示す。解がない場合があったので3.3.4項の手法はグラフから除いた。すべての手法において-z方向の力をかけたときに $z=20$ [mm],  $90$ [mm]のどちらを握ったかを判別できなかった。これについて本稿では解析を行っていないので今後の課題とする。

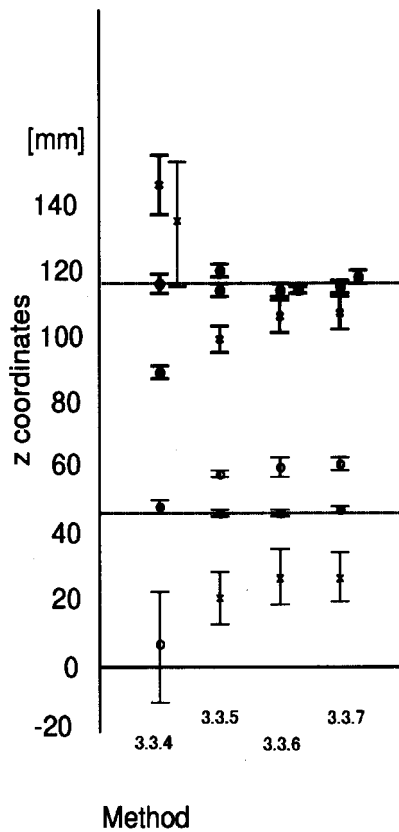
#### 4. まとめ

- ・多品種少量生産品組立システムを紹介した。
- ・力覚センサデータより接触点を検出するジョイスティックを示し、このジョイスティック用の接触点検出手法を示した。実験結果により幾何学モデルを用いた接触点検出手法はこのジョイ

スティックに向かないことがわかった。

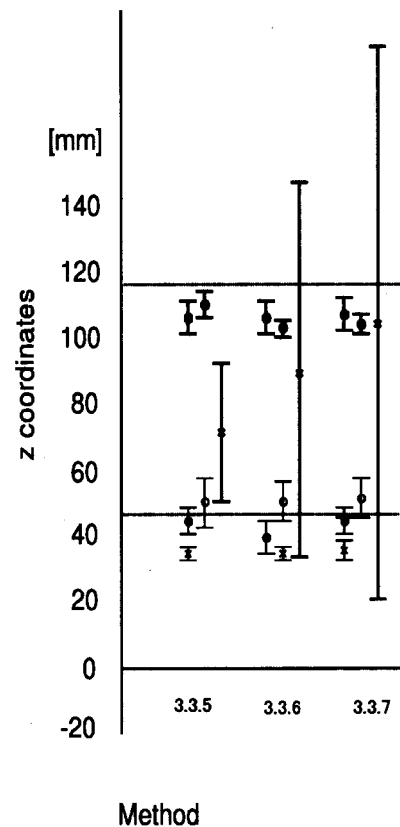
#### 参考文献

- 1) 増田峰知, 藤原基芳, 新井健生: "垂直直動型パラレルメカニズムの運動学解析と試作". 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 65, No. 638, p. 4076-4083 (1999)
- 2) 例えば特開平7-281779号
- 3) G. Hirzinger: "Intuitive Robot Motion Control- The SPACE MOUSE Story". 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 2, p. 175-179 (1999)
- 4) 藤原基芳, 増田峰知, 北垣高成: "接触点検出手法を用いた多軸ジョイスティック". ロボ



- Force is exerted in the horizontal direction
  - Force is exerted in the +z direction
  - Force is exerted in the -z direction
- Bold line:** The position  $z=117$  [mm] is grasped  
**Thin line:** The position  $z=47$  [mm] is grasped  
**I**  $2\sigma$

図5 接触点検出実験結果 (z軸周りのモーメントをかけない)



- Force is exerted in the horizontal direction
  - Force is exerted in the +z direction
  - Force is exerted in the -z direction
- Bold line:** The position  $z=117$  [mm] is grasped  
**Thin line:** The position  $z=47$  [mm] is grasped  
**I**  $2\sigma$

図6 接触点検出実験結果 (z軸周りのモーメントをかける)

- ティクス・メカトロニクス講演会'00講演論文集CD-ROM. 1P1-69-109 (2000)
- 5) J. K. Salisbury, Jr.: "Interpretation of Contact Geometries from Force Measurement". Proc. 1st. Int. Symp. on Robotics Research (MIT Press), p. 565-577 (1984)
- 6) T. Tsujimura and T. Yabuta: "Object Detection by Tactile Sensing Method Employing Force/Torque Information". IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 5, No. 4,

p.444-450 (1989)

- 7) 北垣高成, 末広尚士, 藤原基芳: "疑似接触点を用いた力覚センシングスキル", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol. 3, p.1295-1296 (1998)

The logo for Keirin, featuring the word "KEIRIN" in a bold, sans-serif font.

この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。