

## 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究\* (第19報, 2本ガイドを有する新型セルの組立作業)

薛 国 慶\*<sup>1</sup>, 福田敏男\*<sup>2</sup>, 新井史人\*<sup>2</sup>  
浅 間 一\*<sup>3</sup>, 嘉悦早人\*<sup>3</sup>, 遠藤 勲\*<sup>3</sup>

### Dynamically Reconfigurable Robotic System (19th Report, Assembly Work of New Cells with Two Guides)

Guoqing XUE, Toshio FUKUDA, Fumihito ARAI,  
Hajime ASAMA, Hayato KAETSU and Isao ENDO

In this paper, we first introduce a new type of cell of the self organizing manipulator which was developed by the authors, then present a method for assembling this type of cell using manipulators. Since the new type of cell has two guides for connection, it can also be considered as a dual-peg-in-hole configuration. To obtain effective assembly sequence of cells, we observe the sequence of work as well as force data and psychological data of the people performing the same work. By analyzing the result of the experiment, we obtained a reasonable sequence for performing such work. We apply this result to the assembly work of cells using a camera coordinated with a force/torque sensor. The analysis of the force relation in the dual-peg-in-hole configuration, and result of experiment are also presented.

**Key Words:** Mechatronics and Robotics, Manipulator, Mechanism, Measurement, Image Processing, Self Organizing Manipulator, Assembly, Active Sensing, Human Engineering, Dual-Peg-in-Hole

#### 1. はじめに

最近, 多種多様な作業に柔軟に対応することのできる動的再構成可能なモジュールロボットが求められ, 多くの研究者から注目を浴びている。著者らは CEBOT (Cellular Robotic Systems) という概念を提案し, モジュールロボットを研究してきた<sup>(1)(2)</sup>。また, それの一形態として, 自己組織化マニピュレータを提案した<sup>(3)(4)</sup>。

自己組織化マニピュレータシステムは, そのシステム内の他のマニピュレータにより組立てられ, 必要に応じて作業に適するさまざまな異なる形態のマニピュレータを形成し, 各種作業を行うことが可能なシステムである。図1に自己組織化マニピュレータの概念図を示す。

これまでに我々はこのシステムについて, 与えられたタスクに対し, セルーマニピュレータの構造の自動生成, 複数マニピュレータによるセルーマニピュレータの組立作業のオフラインプランニング<sup>(5)</sup>, およ

び力センサ, カメラの協調作業によるセルの組立作業の誤差修正<sup>(6)</sup> などについて研究してきた。

今までに我々は自己組織化マニピュレータについて3種類のセルを試作してきた。最初のセルは電源と信号線をセルの外に出し<sup>(7)</sup>, 次のセルは電源と信号線をセル本体に納まったが, 市販コネクタを使ったため, それぞれの組立作業は困難であった<sup>(7)</sup>。そこで, これらの欠点を克服した2本ガイドつきの新形セルを試作した<sup>(8)</sup>。

本報はまずこの新形セルの機構を説明し, 次はこの新形セルの組立作業問題を Dual-peg-in-hole 問題にモデル化し, 人間による作業を考察することにより,

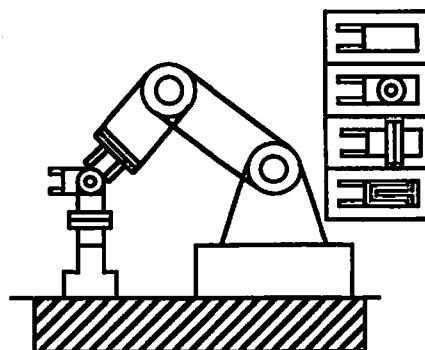


図1 自己組織化マニピュレータの概念

\* 原稿受付 平成6年2月18日。

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院。

<sup>2</sup> 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町1)。

<sup>3</sup> 正員, 理化学研究所 (〒351-01 和光市項広沢2-1)。

このような作業を行うときの作業手順を抽出する。さらにこのような手順をマニピュレータで実現するために、必要な力学的条件と幾何学条件を解析する。最後に力センサとカメラを利用したマニピュレータセルの組立作業の実験結果を示す。

## 2. 新形セルの機構と構造

今回開発したセルは、これまでのセルの欠点を克服し、性能、精度が大幅にアップした。まず、これまでに自由度に貢献しない結合用のモータを省略し、受動的な結合機構を設計した<sup>(8)</sup>。セル間の通信は、接触式のコネクタから非接触式の光通信に変更した<sup>(9)</sup>。図2にはセルの写真、図3にはセルの構造を示す。

これまでのセルは、各セルの制御は外部のコンピュータおよびアンプ回路によって集中的に行われており、システムの柔軟性、頑健性に問題があった。また、

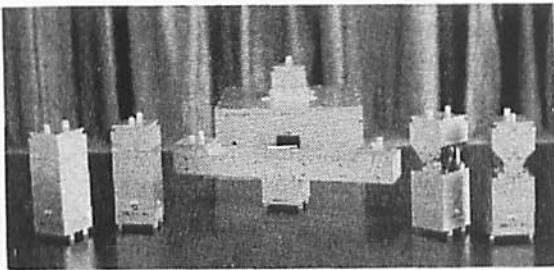


図2 新形セル(左から、回転セル、分岐セル、屈曲セル、後方はベースセル)

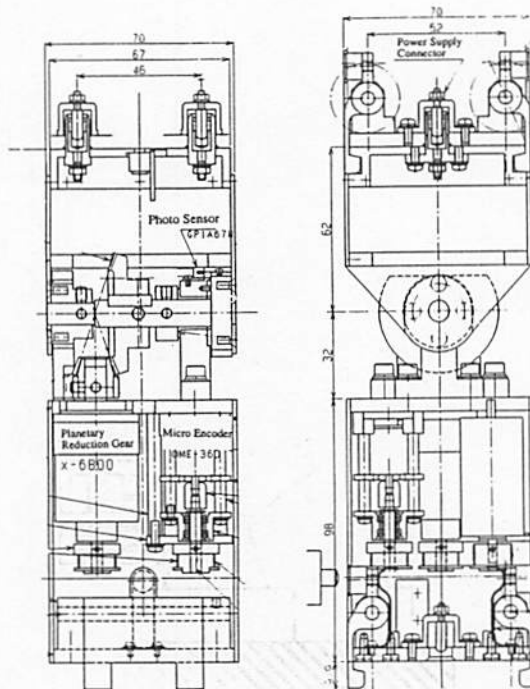


図3 新形セルの機構(屈曲セル)

制御方式の関係上、複数のセルを同時に動作させることが不可能であった。そこで、新形セルはシステムの柔軟性を向上させることを目的として、機構の分散化だけでなく、同時に制御系の分散化も行うことにした<sup>(9)</sup>。そのために、個々のセルにCPUを内蔵させ、各セルの制御はそのCPUを用いて行うことにした。

また、セルの結合精度を高めるため、2本のガイドピンを設けた。ガイドピンには電極を内蔵しており、同時にベースセルからの電源供給としても使っている。

## 3. Dual-peg-in-hole問題

新形セルの組立作業のポイントは2本のガイドがついているため、Dual-peg-in-hole問題となっている。Peg-in-hole問題は古くからたくさんの研究者により研究されてきた<sup>(10)~(16)</sup>。WhitneyはRCCという概念を提案し、二次元的に幾何学条件と力学条件を詳しく解析した<sup>(15)</sup>。これに基づいたRCCハンドも作られた<sup>(16)</sup>。Sturgesは長方体のpegとholeを三次元的で幾何学と力学条件を詳しく解析した<sup>(14)</sup>。平井らは接触状態を力学的に解析し、接触状態の推測アルゴリズムを提案した<sup>(10)</sup>。横小路らは接触状態を分類し、それに基づき組立の手順を生成する方法を提案した<sup>(11)</sup>。内山らはpeg-in-holeの力学モデルを立て、シミュレーションでこのような作業を行うときの力学条件を解析した<sup>(12)</sup>。また、人工技能という概念を提案し、peg-in-hole作業をスキルでとらえることを試みた<sup>(13)</sup>。

本研究はまずDual-peg-in-hole問題をモデル化し、Single-peg-in-holeに相当するクリアランスを解析する。次にDual-peg-in-holeの拘束とSingle-peg-in-holeの拘束を考察し、その関係を示す。組立の手順は人間の作業の観測により得られ、それを実現するため、力センサとカメラの協調を利用した。幾何学と力学の解析は円柱の三次元モデルを使い、それを二次元に変換し、解析結果を得た。

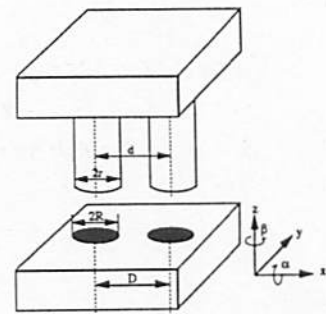


図4 Dual-peg-in-holeのモデル

3.1 Dual-peg-in-hole のモデル化 図4には本研究で用いた Dual-peg-in-hole のモデルとパラメータを示す。

3.2 Dual-peg-in-hole の場合の実質的なクリアランス 単本ペグ(円柱)の場合、クリアランスは各方向に同じであるが、ペグが2本ある場合方向によりクリアランスが違って来る。図4の Y 方向のクリアランスが単本ペグの場合と一緒にあるが、X 方向の場合は違う。

図5の(I)の場合、両ペグのクリアランスが違う場合、全体のクリアランスは小さいほうのペグのクリアランスになる。(II)の場合、内側のクリアランスが小さくて、外側はいくらあいても、全体のクリアランスは内側のクリアランスになる。同じく(III)の場合全体のクリアランスは外側のクリアランスになる。

以上をまとめて、このような場合の並進クリアランスは式(1)となる。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= D + 2R - d - 2r \geq 0 \\ C_2 &= d - 2r - D + 2R \geq 0 \\ C_3 &= 2R - 2r \geq 0 \\ C_4 &= \min(C_1, C_2, C_3) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $C_1, C_2, C_3$  はそれぞれ(I), (II), (III)により決めたパラメータで、 $C$  は全体のクリアランス。同じく角度に対するクリアランスは図6, 7により、それぞれ式(2), (3)で表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} e_x^2 + e_y^2 &\leq \epsilon^2 \\ (D - d \cos \beta + e_x)^2 + (d \sin \beta + e_y)^2 &\leq \epsilon^2 \dots\dots\dots(2) \end{aligned} \right\}$$

$$\alpha \leq \sec^{-1} \left( \frac{R}{r} \right) \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 $\epsilon$  は並進クリアランス、 $e_x, e_y$  はそれぞれペグの中心がホールを中心からずれた距離、 $\beta$  はペグの中心線とホールを中心線との角度、 $D, d$  はそれぞれホール間とペグ間の距離、 $\alpha$  はペグの中心面とホールを中心面間の角度、 $2R, 2r$  はそれぞれホールとペグの直径。

3.3 セルのクリアランスの測定 以上に従って、実際のセルのクリアランスを測定した。図8にその結果を示す。この場合の並進クリアランスは式(1)によ

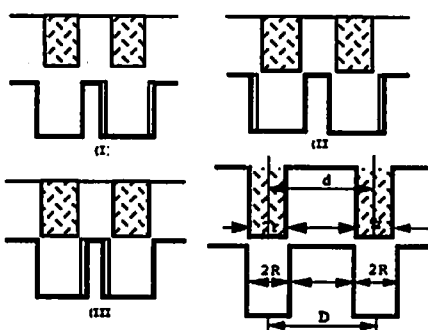


図5 Dual-peg-in-hole の場合の実質クリアランス

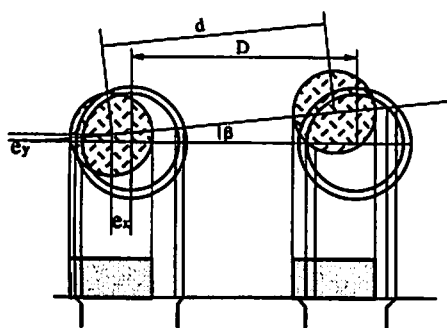


図6 角度 beta に対するクリアランス

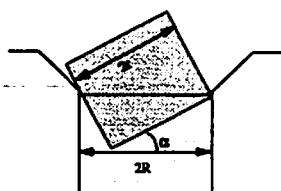


図7 角度 alpha に対するクリアランス

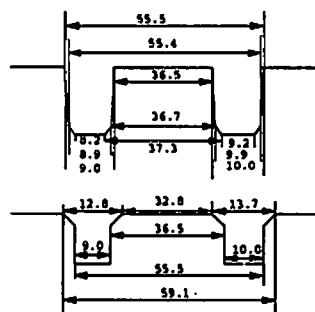


図8 セルのクリアランスの測定結果

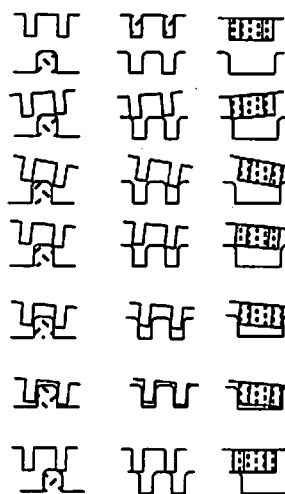


図9 Dual-peg-in-hole と Single-peg-in-hole の関係

り,  $C=0.09$  という結果が得られた。

**3.4 Dual-peg-in-hole 問題と単本 peg-in-hole 問題との関係** 図9の真ん中の列では, Dual-peg-in-hole の各接触状態を表しているが, 左列では両ホールの中の部分を一つの仮想ペグとして同じ接触状態を表し, 右列では両ペグおよびペグの間の空間を一つのペグとして考え, 同じ接触状態を表す。この図から容易にわかるように真ん中の列の拘束条件は, 左右両列の拘束条件の和である。実際に左の仮想ペグの受けている拘束の集合を  $R_1$  とし, 右の仮想ペグの受けている拘束の場合を  $R_2$  とし, このとき Dual-peg の受けている拘束の集合を  $R$  とすると,

$$R = R_1 \cup R_2 \dots \dots \dots (4)$$

すなわち, Dual-peg-in-hole 問題は, 二つの仮想 Single-peg-in-hole 問題に分解することが可能である。前述のクリアランスの違いを考慮に入れれば, 単本の peg-in-hole 問題に帰結できる。

4. 人間による作業の観察

本研究では, このような Dual-peg-in-hole の問題に対して, より柔軟性のある作業手順を得るため, まず人間による Dual-peg-in-hole 作業を観察し, 作業手順を抽出する。抽出した手順を力学的に解析し, 同じ作業をロボットで実現するための力学条件を求めるという方法を試みた。

図10に示したのは実験装置, 図11に示しているのは実験の様子である。基盤の上に力センサを載せて,

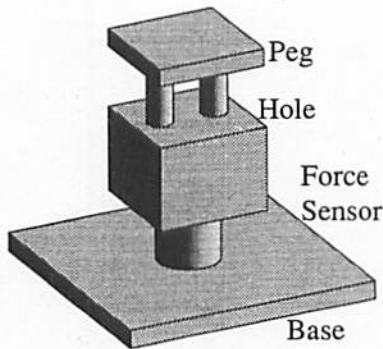


図10 実験装置

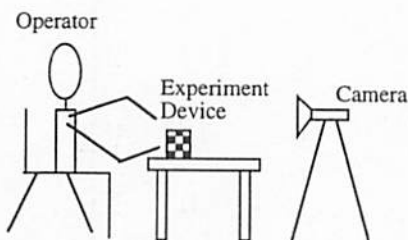


図11 人による実験の様子

その上にホールとペグがある。ホールとペグのクリアランスは  $0.1 \text{ mm}$ , 実験者の向こう正面にカメラを設置している。

実験方法: 以下の3部分に分けて実験を行い, データを取った。

- (1) ビデオカメラですべての人の挿入過程を録画する。→作業手順と個人個人の挿入戦略の情報の収集。
- (2) 製作した実験装置でそのときの力を記録する。→挿入するときの力情報の収集。
- (3) 挿入実験をするときの気が付くこと, 感想などをアンケートで取る。→挿入作業を行うときの心理的情報収集。

データの処理: 16人の被験者のデータのサンプリングを行った。

ビデオ情報処理: 試験者全員の作業過程をビデオで考

表1 被験者の挿入戦略とその特徴

|            | Method  | Characteristic                     | Common   |
|------------|---|------------------------------------|--|
| Hand First | Roughly approach guided by eye, precisely move using hand | long time, little moment and force | <ul style="list-style-type: none"> <li>• High speed, soft insertion can be achieved by using both hand and eye</li> <li>• Almost every testee diagonally search the hole at same angle, and then stand peg up</li> </ul> |
| Eye First  | Roughly approach and precisely move guided by eye         | Short time, large moment, force    |  |

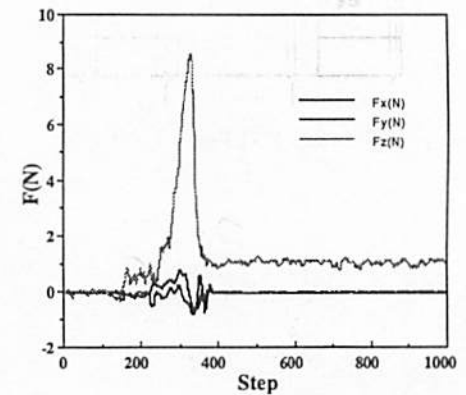
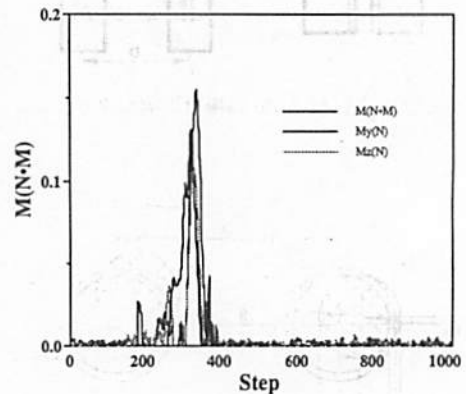


図12 人間による作業の力データの一例

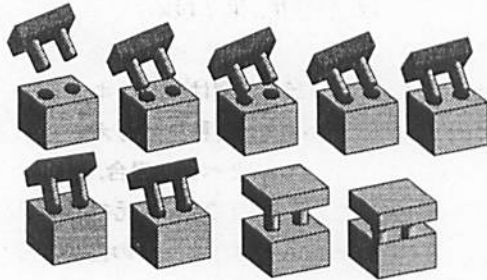


図13 抽出した被験者の作業手順

察する。挿入開始からホールに入るまでは一コマづつスローモーションで見ると、主に三つの挿入方法を検出できた。

- (1) 先に一つのペグを目で一つのホールに合わせ、それからもう一つのペグを穴に合わせる。合わせてから、手の器用さで方向を調整して挿入する(4人)。
- (2) 先に二つのペグを目で合わせてから(方向は斜め)、方向を修正し、挿入する(10人)。
- (3) 接触してから、滑らせながら、ホールに合わせ、挿入する(2人)。

力データ処理：実験データ(6軸)をすべてグラフで表した。図12に示したのはその一つである(サンプリングタイムは約8ms)

以上の結果とアンケートより得られた結果をまとめて、表1に示す。

挿入戦略をおおむねに分類すると、(1) 手を重要視 (2) 目を重要視に分けることができる。それぞれの特徴と共通の特徴も表1に示す。

ここで注目すべきは“先に斜めで合わせる”という結果である。それを解釈すると二つの理由が考えられる。

- (1) 目を見やすくするために、ペグを斜めにして合わせる。
- (2) 斜めにすると先端が細いのを利用し、横の拘束力を利用しやすい。

以上の結果をまとめると、このような作業の手順は以下ようになる。

- (1) 目を見やすくするようにある位置までもっていく。
- (2) 斜めでペグの先端をホールに合わせる。
- (3) 全体を縦に立て直す。
- (4) 挿入する。

この手順を図13に示す。本研究はこの手順を用いる。

### 5. マニピュレータによるセルの組立作業

4章で得られた作業手順を分析すると、それを2段階に分けることができる。

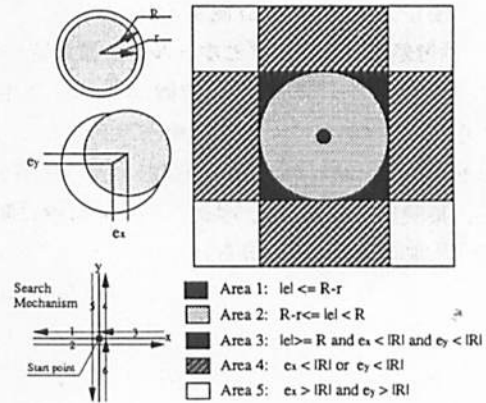


図14 ペグとホールの関係

段階1：ペグを斜めにして、目と力感覚で、ホールに合わせる。

段階2：ペグを斜めにホールと接触しながら立て直す。

5.1 カセンサとカメラを用いてペグをホールに合わせる 図14のようにペグの中心点をホールとの相対位置を5個の領域に分割した。ホールは一つしか表示していないが、3章で述べたようにこのような問題の解析はSingle-peg-in-hole問題でとらえることができるので、簡単のためここで一つのホールで表現した。4章で得られた作業手順に従って、それに近いマニピュレータの作業手順はこのようになる。

作業手順：

Step 1. そのままz軸(図4参照)の力が一定の値を達するまで挿入する。誤差がArea 1であれば、挿入は成功する。

Step 2. z軸の力が一定の値に達しても、挿入できない場合は、セルを斜めに片向けさせ(頂点は元中心と一致させ)、もう1回z軸方向に押し、一定の力に達すると、押しながら、x方向かy方向に動かし(図14参照)、誤差範囲はArea 2であればすぐ横の拘束力が働く。この拘束力を利用し、中心に合わせる。

Step 3. Step 2の手順で、横にずらしてもすぐに拘束力が発生しないが、どちらの方向に少し動くだけですぐ拘束力が働く場合、誤差範囲はArea 3にある可能性が大きい、拘束力がかかりはじめてから、拘束力を利用し、中心に合わせる。

Step 4. 横の方向に(±r)だけ動かしても拘束力がかからないが、垂直方向に動かすと、拘束力かかっていれば、誤差範囲はArea 4にある。拘束力がかかりはじめてから、それを利用し、中心に合わせる。

Step 5. いくらx, y方向に動かしても、拘束力がかからない場合は、誤差範囲はArea 5にある。この場合

カメラを用いて穴の位置を計測する。

5.2 画像処理によるペグとホールとの位置測定

5.1節でペグとホールとの相対位置はArea 5と判断された場合、画像処理による位置検出が必要となる。画像計測の精度と難易さは視点の選択に大いにかかっている。接触している場合、ペグとホールは陰に隠れて、画像処理可能な画像は得られない。しかし、カメラとセルの位置と方向を変化することにより、処理可能な画像が得ることが可能である。著者らは視点の選択の評価基準として、平均可視率を提案した<sup>(6)</sup>。この考えに従って、カメラレンズの中心軸とセルの底面(ホールのある面)と垂直にするよう、セルとカメラを動かす、画像計測を行い、ペグとホールとの位置が測定できた。

画像処理はペグの位置測定とホールとの位置測定2部分に分けて行う。

ペグの抽出過程：ノイズ処理、微分、二値化、細線化、ラベリング、重心の計算、直線近似

ホール抽出過程：ノイズ処理、微分、二値化、細線化、ラベリング、重心の計算、円抽出。

処理の結果はそれぞれ図15、16に示す。

画像処理は解像度、処理誤差、それにカメラとセルの移動誤差により、得られた処理結果の誤差(この場合は1.2~2.0mm)はクリアランスを超えてしまう可能性が大きい。前述のように、Area 1~4に入っていれば、次の処理は可能となる。

5.3 立て直すときの力解析 5.2節の方法でペ

グをホールに合わせた後、第2段階の立て直すに移す。

これまでに、ほとんどの研究はペグとホールを二次元で解析しているが、円柱と対称性を考えると問題の解決に支障はない。しかし、2ペグの場合、ペグ中心に対する対称性がなくなったので、三次元で解析が必要となってくる。本研究はペグとホールとの接触の最も基本のケース(3点接触)について解析する。

図17に示したようにこの場合ペグとホールはそれぞれ3点接触となっている(全6点)。幾何学条件から図18のように二次元相当のホール直径が式(5)のように得られる。

$$H = R + \frac{R - 2r \cos \beta + R \cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} \dots\dots\dots (5)$$

滑らかな動きを実現するには、接触条件を維持する必要がある。すなわち、図18中のOを瞬間回転中心にする必要がある。これを実現するには式(6)の力学条件を満たすべきである。

$$\left. \begin{aligned} f_2 + \frac{f_1}{\mu} + F \cdot \sin(\beta + \theta) + p \cdot \cos \beta &= 0 \\ f_1 + \frac{f_2}{\mu} + F \cdot \cos(\beta + \theta) + p \cdot \sin \beta &= 0 \\ p \cdot PO + F \cdot DO + f_2 \cdot H \cdot \cos \beta + f_1 \cdot H \cdot \sin \beta &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ただしμは摩擦係数で、f<sub>1</sub>、f<sub>2</sub>は接触点の摩擦力、Fは外力、pはペグの重力である。PO、DOはそれぞれ重力と外力の作業距離で、式(7)の幾何学条件から得られる。

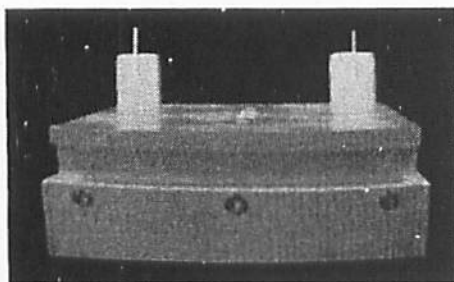


図15 ペグの画像処理結果

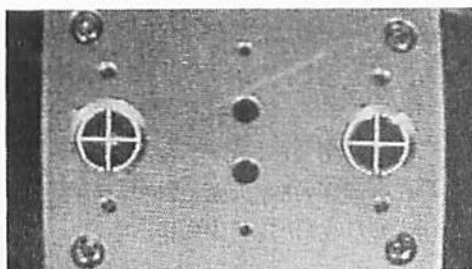


図16 ホールの画像処理結果

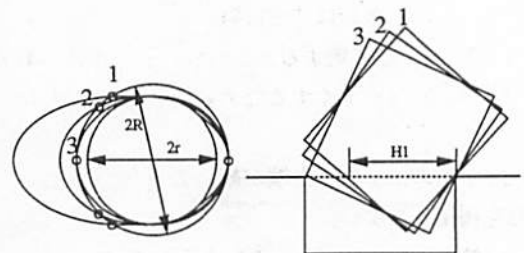


図17 円柱の3点接触

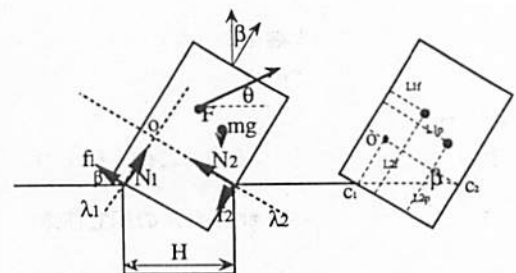


図18 接触中心面

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= H \cdot \sin^2 \beta, y_0 = H \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \\ x_d &= L_2 f \cdot \sin \beta + (H \cdot \cos \beta - r + L_1 f) \cos \beta \\ y_d &= L_2 f \cdot \cos \beta - (H \cdot \cos \beta - r + L_1 f) \sin \beta \\ x_p &= L_2 p \cdot \sin \beta + (H \cdot \cos \beta - L_1 p) \cos \beta \\ y_p &= L_2 p \cdot \cos \beta - (H \cdot \cos \beta - L_1 p) \sin \beta \\ PO &= x_p - x_0 \\ DO &= (x_0 - x_d) \sin \theta - (y_0 - y_d) \cos \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

この連立方程式から  $F$  を解いた結果を式(8)に示す.

$$F = \frac{p\{PO\mu^2 - PO - H\mu^2 + H\mu \sin(2\beta)\}}{DO - DO\mu^2 - H\mu \cos(\theta) + H\mu^2 \sin(2\beta + \theta)} \dots\dots\dots (8)$$

以上の式から合外力  $F$  と  $\beta$ ,  $\theta$  との関係を考察してみた. 表2はパラメータ表で, 図19, 20にその結果を示す. 図19は高さで加えるべき力の大きさと  $\beta$ ,  $\theta$  の関係を示したもので, 図20は深さで同じ関係を示したものである. 図20の中の穴A, B, C, Dの区域は無限大の力を必要とすることを意味している. 点線

表2 パラメータ表

| $\mu$ | p(g) | R(mm) | r(mm) | L1p(mm) | L1f(mm) | L2p(mm) | L2f(mm) |
|-------|------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|
| 0.1   | 200  | 10.0  | 9.95  | 4       | 200     | 5       | 200     |

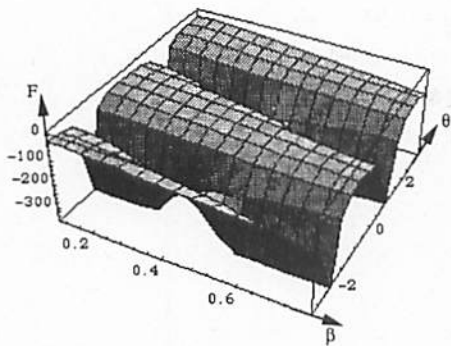


図19 合外力  $F$  とベグ角度  $\beta$ , 外力方向  $\theta$  の関係

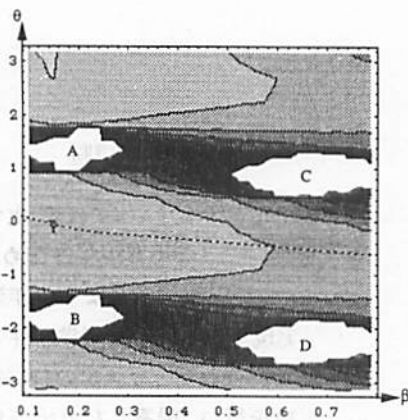


図20 合外力  $F$  とベグ角度  $\beta$ , 外力方向  $\theta$  の関係

はベグの方向に対して与える力のベスト方向を示している.

5.4 マニピュレータの先端の軌跡 ムーブマスタのような位置制御しかできないはん用ロボットでは, 前述の力関係を実現するには, マニピュレータの先端の軌跡を求める必要がある.

図21から幾何学条件により以下の式が得られる.

$$\left. \begin{aligned} C_2 t &= r - L \\ Mt &= L_2 f - H \cdot \sin \beta \\ MC_2 &= \sqrt{C_2 t^2 + Mt^2} \\ \gamma &= \text{Arc tan} \left( \frac{Mt}{C_2 t} \right) \\ x &= -MC_2 \cdot \cos(\gamma + \beta) \\ y &= MC_2 \cdot \sin(\gamma + \beta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$(x, y)$  は接触条件を満たす外力の作用点  $M$  の軌跡である.  $C_2$  を原点とし, 5.3節と同じパラメータを使い図22のように  $M$  の軌跡が得られた.

しかし, 力解析の結果でわかるように, 位置だけをコントロールしても, 力条件を満たさないと, 接触条

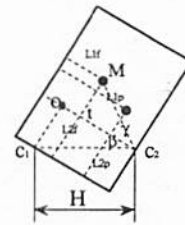


図21 幾何学条件図

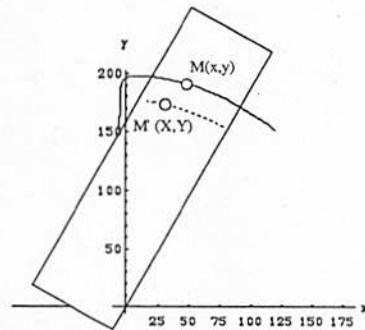


図22 マニピュレータの先端の軌跡

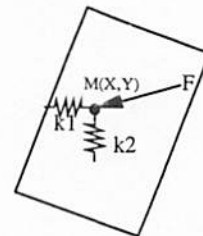


図23 弾性機構

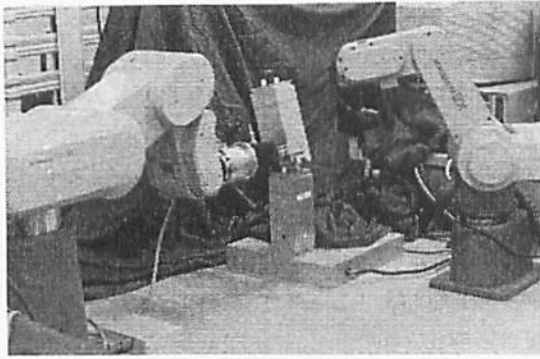


図 24 システムハードウェアの構成

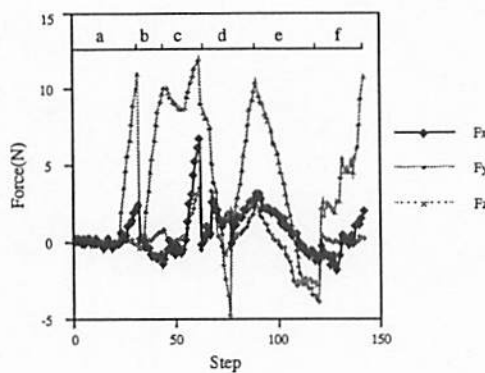


図 25 実験結果

件は維持できない。ここでマニピュレータの先端に図 23 のような弾性系 ( $x$  軸方向  $k_1$ ,  $y$  軸方向  $k_2$ ) を入れると、式(10)のような関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} P_x &= \frac{F \cos \theta}{k_1} \\ P_y &= \frac{F \sin \theta}{k_2} \\ X &= X + P_x \\ Y &= Y + P_y \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $P_x$ ,  $P_y$  は弾性系の  $x$ ,  $y$  方向の変位、 $X$ ,  $Y$  は弾性系を含めたマニピュレータ先端の位置、 $x$ ,  $y$  の軌跡は前述の方法で求めたので、 $X$ ,  $Y$  の軌跡(図 22 中の  $M'$ ) も得られる。

このようにマニピュレータの先端の位置だけをコントロールすることにより、作業に必要な力と力の方向も得られる。したがって、接触しながら立て直す作業も実現も可能である。

## 6. 実 験

**6.1 システムの構成** 図 24 に示したのは実験システムの構成である。本実験では 2 台の 5 自由度マニピュレータ (MoveMaster) のうち 1 台はセルの組立用で、

もう 1 台は移動カメラを持つ。マニピュレータは RS 232C でパーソナルコンピュータとつなぎ、パーソナルコンピュータと WorkStation の間では、Ether-net でつないでいる。

**6.2 実験結果と検討** マニピュレータによる作業実験は(1)画像処理による測定、(2)力センサによる中心あわせ、(3)接触しながら立て直すの 3 部分に分けて行った。今回の実験では、5.3 節で述べた弾性系はまだ実装していないが、マニピュレータのハンドに柔らかいゴム(厚さ 8 mm,  $k_1=8.23$  N/cm,  $k_2=8.35$  N/cm)を張付け、それに近い性能を持たせ、実験を行った。

(1)の画像処理結果は図 15, 16 に示した。単純な画像処理の誤差が 0.1~0.2 mm であるが、セルの移動誤差、特にカメラの移動誤差の影響でトータル誤差が最大 2 mm ぐらいになってしまう可能性がある。

(2)最初に  $x$ ,  $y$  方向にともに 2 mm をずらしてから 5.1 節の手順に従い、実験を行った。図 25 にその全過程の力データを示す。a は垂直に挿入、b は斜めにしからの挿入、c は押しながら  $x$  方向にずらすとき、d は押しながら  $y$  方向にずらすときの力データ。

(3)e は接触しながら立て直すとき、f は垂直に挿入するときの力データ。

実験結果の検討：RCC ハンドを含めて、ほとんどの Peg-in-hole の研究は初期誤差が一定範囲にあるという前提条件が必要である。これに対して、本研究は画像処理と力センサを併用し、人間の作業シーケンスの参考により、初期誤差がクリアランスより大幅に越えている場合でも、この方法を用いて、対処可能となる。

実験の結果と人間の作業データ(図 12)と比べ、まだほど遠いが、その原因として主に：

- (1) 力センサの感度の差
- (2) サンプリングタイムの差
- (3) 人間の手の柔らかさとマニピュレータの関節の柔らかさの差

が考えられる。これらを克服するのは、今後の課題である。

## 7. まとめと今後の課題

本研究では 2 本ガイドを有する自己組織化マニピュレータの新形セルの組立作業を実現するために、人間の作業を観察することにより、このような作業の手順を抽出し、それを実現するための幾何学条件と力学条件を解析した。また力センサとカメラの共同作業により、セルの組立実験を行い、提案した方法の有効性を示した。



今後は組立てたセルラーマニピュレータを用いて、実際の作業を行い、システムの有効性を考察する予定である。

### 文 献

- (1) 福田・中川, セル構造を有する自己組織化ロボット—その基本概念とセル間の粗接近制御および形態決定法について, 電学論, 107-11 (1987), 1019-1026.
- (2) 福田・小野・ほか6名, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第5報, ロボットの自己組織化エンドエフェクタの概念とその機構と制御に関する研究), 機論, 57-536, C (1991), 228-235.
- (3) 福田・薛・ほか2名, 双腕マニピュレータによる自己組織化マニピュレータの組立作業, 電学論, 113-5, D (1993), 647-654.
- (4) Fukuda, T., Xue, G., A Study on Dynamically Reconfigurable Robotic Systems (Assembling, Disassembling and Reconfiguration of Cellular Manipulator by Cooperation of Two Robot Manipulators), *IEEE/RSJ, IROS'91*, 3-5 (1991), 1184-1189, Osaka, Japan.
- (5) 福田・薛, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91講演論文集, (1991), 205-206.
- (6) 福田・薛, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第14報, 視覚と力のアクティブセンシングを用いた自己組織化マニピュレータの組立作業誤差修正), 機論, 59-565, C (1993), 196-203.
- (7) 福田・薛, 第9回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, (1991), 215-216.
- (8) 嘉悦・浅間, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第65報, 自己組織化マニピュレータの受動的合体機構の開発), 1993年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1993), 543-544.
- (9) 琴坂・浅間, 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第64報, 受動的機構を持つ自己組織化マニピュレータの設計), 日本機械学会 [No. 930-60], 第3回FANシンポジウム, (1993), 259-262, 旭川.
- (10) Hirai, S., Analysis and Planning of Manipulation Using the Theory of Polyhedral Convex Cones, *Ph.D. Thesis*, (1991), Kyoto University.
- (11) 横小路, 接触状態の分類と組立手順, ロボット学会誌, 11-2 (1993), 185-191.
- (12) 内山, 接触状態のシミュレーション, ロボット学会誌, 11-2 (1993), 201-205.
- (13) 村川・内山, 組立作業用技能システムの一構成法, 日本ロボット学会誌, 9-1 (1991), 11-17.
- (14) R. H. Sturges, Jr., A Three-Dimensional Assembly Task Quantification with Application to Machine Dexterity, *Int. J. Robotics Research*, 7-4 (1988), 34-78.
- (15) Whitney, D. E., Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts, *J. Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 104 (1982), 65-77.
- (16) 樋口・津田・ほか1名, 磁力支持方式精密自動組立用ハンドの開発, 日本ロボット学会誌, 7-2 (1989), 136-143.