

## 単機能ロボット群による物体の搬送作業

### Object Transpotation by a Group of Uni-functional Robots

○山中亘, カリッド・ムナワル, 内山勝

○Wataru Yamanaka, Khalid Munawar, Masaru Uchiyama

東北大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Tohoku University

キーワード : 協調作業 (Cooperative Operation), 単機能ロボット (Uni-functional Robot),  
持ち替え (Regrasping), 搬送 (Transpotation), 接触認識 (Contact Recognition)

連絡先 : 〒 980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻  
宇宙機システム学講座

山中亘, Tel.: (022)217-6973, Fax: (022)217-6971, E-mail: yamanaka@space.mech.tohoku.ac.jp

#### 1. はじめに

今まで, 協調作業の研究はいろいろ行われている<sup>1)2)</sup>. 協調作業は, 1 台ではできないことを複数台集めることで実現しようとするものである. この協調作業としては, 多指ハンドに関するものが多く研究されている<sup>3)</sup>. これらは, 人の手の動きを目指したものがほとんどである.

しかし, マイクロロボットなどのように, 小型化を行うために, 複雑な機能を持たせることができないものもある. そのため, 1 台のロボットでできることに限界がある. 我々は, このような単純な機能しか持たないロボットに, 台数を増やしていくことにより, 今までより複雑な作業をさせることを考えている. また, このような単純な機能のロボットの利点は, 小型化しやすいだけでなく, 組み立て, 分解が容易で修理を行いやすいこともある.

そこで, 我々は, 4 台の単機能ロボットからな

るシステムを構築し, 平面的な物体の把持, 操作の研究を行ってきた<sup>4)</sup>. また, 視覚を用いることで, ロボットの物体への接触認識や把持, 操作時に生じる滑べりの認識, 滑べりの補償の方法を提案している<sup>5)</sup>. これ以外にも視覚を用いずに滑べりを検出する方法に関して考察し, 実証している<sup>6)7)</sup>.

しかし, これらは, 限られた範囲でのみの作業であり, 移動機構をもたない単純なロボット群の

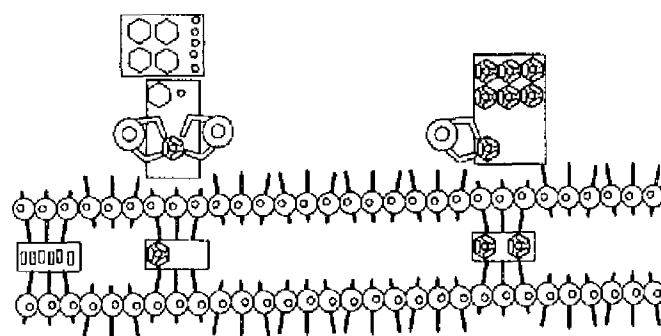


図 1 単機能ロボット群による協調作業

作業にも限界があった。そこで、本論文では、ロボットの台数を増やし、今までより複雑な作業として、物体の搬送を行わせようと考えた。この搬送は、作業範囲の限界を取り除く一つの方法と考えている。搬送をさせることができれば、図1のように、ある所で作業を行ったものを違う所に運べ、そこでまた新たな作業をすることができる。

そのため、単機能ロボット群で物体の搬送を行うための物体の搬送の方法、物体の移動、持ち替え時の制御式およびロッドの接触認識について述べていく。

## 2. 単機能ロボット ME

我々は、小型化が容易に行えるような単機能ロボットとして、図2のようなロボットを製作した。

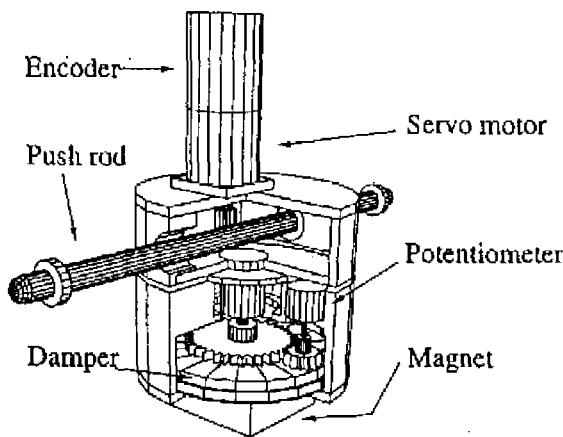


図2 実験機の外観

このロボットの特徴は、動力が一つしかないことである。しかし、1自由度では作業対象が狭められる。そこで我々は、動力を増やさずにロボットにもう1自由度を持たせることにした。ロボットは、DCサーボモータにより直線運動をする指（プッシュロッド）と、駆動力はないがある程度以上の水平方向の力が加わると回転し、回転軸に取付けられたスプリングの復元力によって、初期位置へ戻ろうとする回転運動の2自由度を有している。

この単機能ロボットを我々は、Manipulation El-

ement (ME) と呼んでいる。

## 3. 物体の搬送方法

### 3.1 MEの初期位置

MEの初期位置については、図3の配置を考えている。MEに回転方向の駆動力が無いためにこのような配置にしている。この配置だと、MEは物体を左右どちらの方向にも動かせる。また、図3で端のMEを傾けている角度が大きすぎるとロッドと物体の間の接触点で滑べりがおこりやすくなり、小さすぎると物体を動かせなくなる。この角度は後で求める。

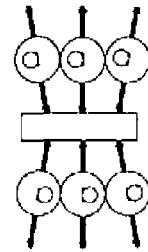


図3 MEの初期配置

### 3.2 MEの台数

これまでME6台での物体搬送のための配置について考えてきた。ここでは、MEの台数について考える。我々は、搬送作業のためにMEの台数が増えても同じような制御方法で制御していきたい。そこで、MEの配置についての考え方を示す。

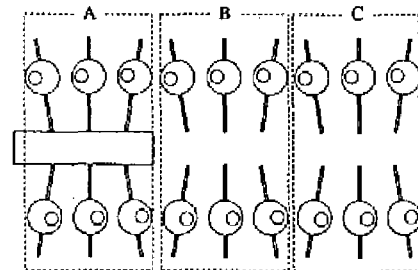


図4 グループの構成1

図4はA, B, Cが各6台ずつでグループを構成している。この図では、MEの台数  $N$  は  $6n \leq N$

( $n$  は自然数) になっている。しかし、我々の方法では、このような式で表すことは適当ではない。

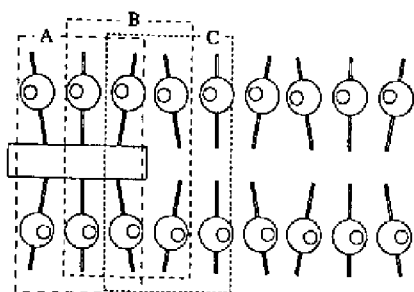


図5 グループの構成2

図5からわかるように、MEは両隣りのMEと自分と、それらの向かいのMEの6台で一つのグループを構成している。MEが安定して物体を掴むためには、初期姿勢で逆に傾いているMEの組が存在するほうがよい。図5の各グループはこの条件を満足している。つまり、1台のMEは三つのグループに属している。また、MEの台数 $N$ は、 $2n \leq N$  ( $n$ は3以上の自然数) だということがわかる。

ここではMEの物体搬送に必要な台数が $2n \leq N$  ( $n$ は3以上の自然数) だということを説明した。

### 3.3 搬送方法

MEによる物体搬送について考える。ここではMEを図6のように三つの組に分けて考える。この組で図7の流れで物体を搬送させて行く。これを図示したのが、図8である。

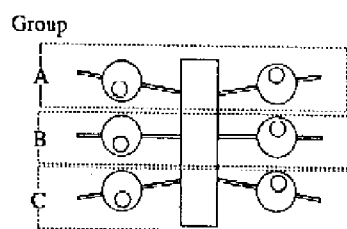


図6 グループ分け

この流れで物体が目標位置に届くまで繰り返していく。

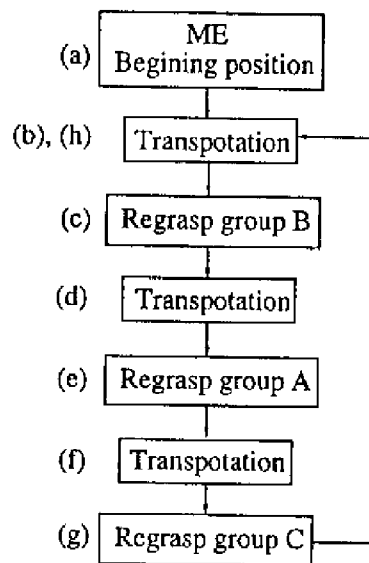


図7 流れ

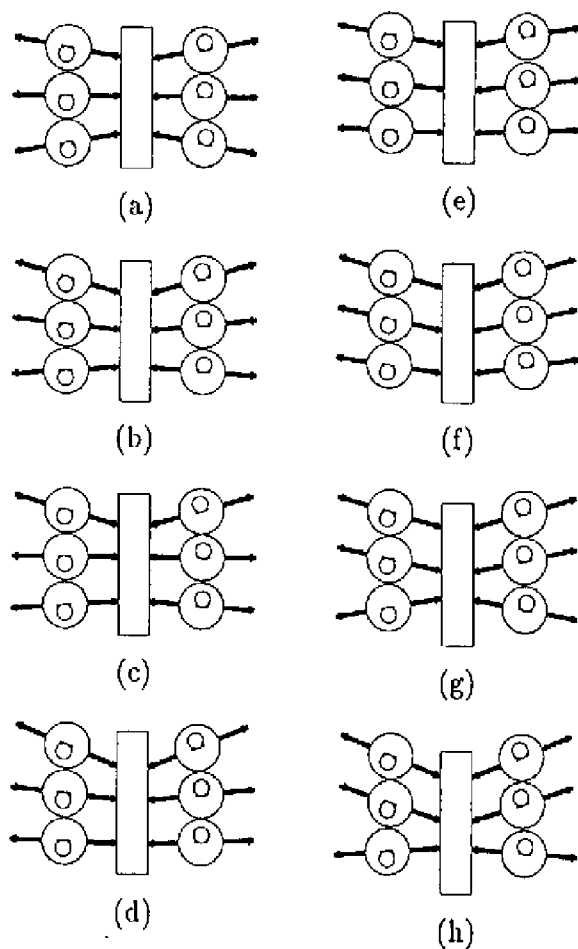


図8 搬送の流れ

## 4. 6台での物体の移動

### 4.1 システムの座標系

システムの座標系を図9に示す。

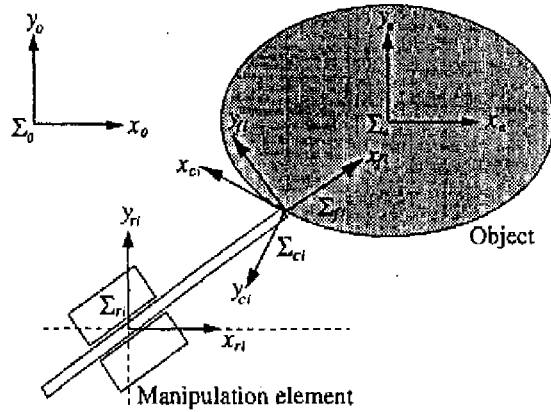


図9 システムの座標系

ここで、

- 基準座標系  $\Sigma_0$
- 物体座標系  $\Sigma_a$   
物体の重心に原点を持ち、物体の慣性主軸方向に固定された座標系。
- ロボット座標系  $\Sigma_{r,i}$   
MEの回転軸上を原点とし、回転角が零のときのロッド方向が  $x_{r,i}$  軸である座標系。
- 指先座標系  $\Sigma_{f,i}$   
MEのロッドの先端(指先)に固定され、ロッド方向に  $x_{f,i}$  軸を持つ座標系。MEは  $x_{f,i}$  軸方向にモータによる力  $F_{m,i}$  を  $y_{f,i}$  軸方向にバネによる力  $F_{s,i}$  を発生する。
- 拘束座標系  $\Sigma_{c,i}$   
MEの指先と物体の接触点(拘束点)に原点を持ち、物体の法線方向に  $y_{c,i}$  軸を持つ座標系。

である。なお、 $i$ はMEの番号( $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ )とする。これらの座標系は右手系で定義されてい

るものとし、回転の方向は $z$ 軸まわりのCCWを正とする。

また以後表記法として、各部の位置、力等を区別するために添字を、ベクトルを成分表示する座標系を明示するために左肩字を用いることにする。

### 4.2 物体操作時の6台での制御式

物体に働く力・モーメントは次の式で表される。

$${}^a f_a = W_m q_m + W_s q_s \quad (1)$$

ここで、

$${}^a f_a = [ F_a^T \quad N_{za} ]^T \quad (2)$$

$$W_m = [ W_{m1} \ W_{m2} \ W_{m3} \ W_{m4} \ W_{m5} \ W_{m6} ] \quad (3)$$

$$W_{mi} = \begin{bmatrix} \cos\phi_i \\ -\sin\phi_i \\ X_{fi} \sin\phi_i + Y_{fi} \cos\phi_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$q_m = [ F_{m1} \ F_{m2} \ F_{m3} \ F_{m4} \ F_{m5} \ F_{m6} ]^T \quad (5)$$

$$W_s = [ W_{s1} \ W_{s2} \ W_{s3} \ W_{s4} \ W_{s5} \ W_{s6} ] \quad (6)$$

$$W_{si} = \begin{bmatrix} \sin\phi_i \\ \cos\phi_i \\ -X_{fi} \cos\phi_i + Y_{fi} \sin\phi_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$q_s = [ F_{s1} \ F_{s2} \ F_{s3} \ F_{s4} \ F_{s5} \ F_{s6} ]^T \quad (8)$$

ただし、 $X_{fi}, Y_{fi}$ は、接触点から見た物体の重心の位置ベクトル  $p_{fi}$  を物体座標系  $\Sigma_a$  で表したものである。また、 $\phi_i$ は  $\Sigma_a$  と  $\Sigma_{f,i}$  の傾きである( $\Sigma_{f,i}$  から見てCCWが正)。

この(1)式の右辺の第1項目がモータの発生する力によって物体に働く外力・外モーメントであり、第2項目がバネの復元力による外力・外モーメントということになる。

(1)式を  $q_m$  について一般化逆行列を用いて解いたときの一般解は、

$$q_m = W_m^+ ({}^a f_a - W_s q_s) + (I_6 - W_m^+ W_m) k \quad (9)$$

により与えられる。

ここでは(9)式の任意のベクトル $k$ を変化させて力を求めていく。

### 4.3 6台での物体の移動実験

MEが物体を移動させるときに、端のME(図6のGroup\_A, Group\_C)を何度傾けなければならないかを考える。この角度が小さいと、物体を動かすには大きな力を必要とする。しかし、モータには出せる力の限界がある。そのため、あまり角度を小さくすることができない。また、逆に大きくすると、今度はロッドと物体の間で滑りが生じやすくなる。そのため、角度を大きくしすぎることも望ましくない。よって、物体を動かせる小さな角度を求めておく必要がある。

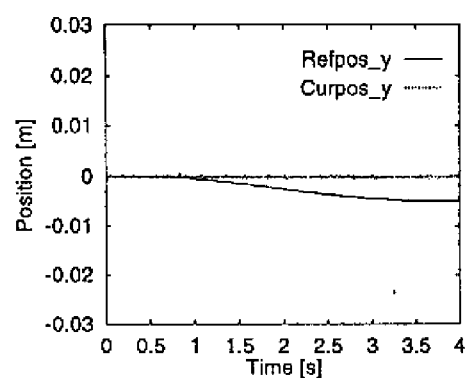
#### 4.3.1 実験方法

今回は、移動の目標値を5 mm, 7 mmとして、6台のMEで物体を移動させた。そのときの物体の追従性を調べた。また、MEのモータの上限は13 Nである。下限は0 Nにした。MEのロッドが物体から離れないためには、0 N以上の力を与え続けなければならないので下限値をこのようにした。今回は、端のMEの角度を $2.5^\circ$ ,  $5^\circ$ の場合で実験を行った。

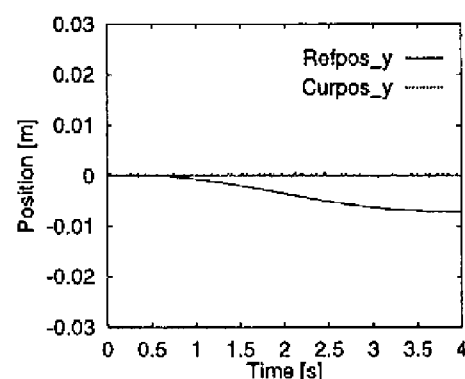
#### 4.3.2 実験結果

図10, 図11に実験結果を示す。これらからわかるように、端のMEの傾きが $2.5^\circ$ のときは、進行方向への力を出しにくいので、物体は初めの位置からほとんど動いていない。 $5^\circ$ の場合は、物体は目標位置に向かって動いている。この $5^\circ$ の場合の各MEの出す力を図12に示す。この図より、力もモータの制限内に収まっていることがわかる。

図10, 図11, 図12から、初期位置で端のMEの傾きを $5^\circ$ 以上にすることで物体を動かせる。

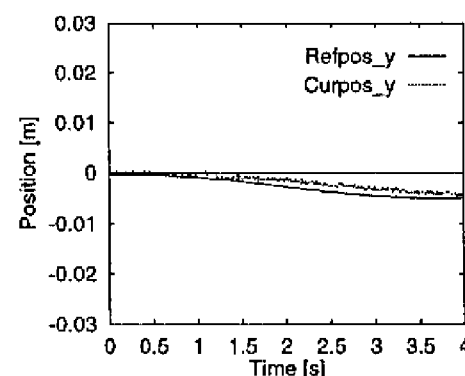


(a) 目標位置 5 mm

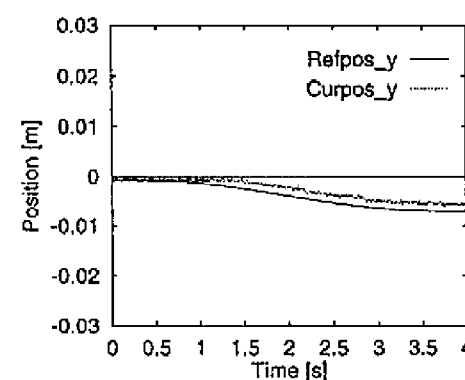


(b) 目標位置 7 mm

図10 端のMEの角度 $2.5^\circ$ の物体移動の結果

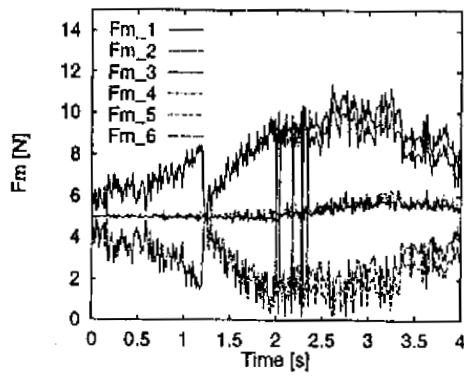


(a) 目標位置 5 mm

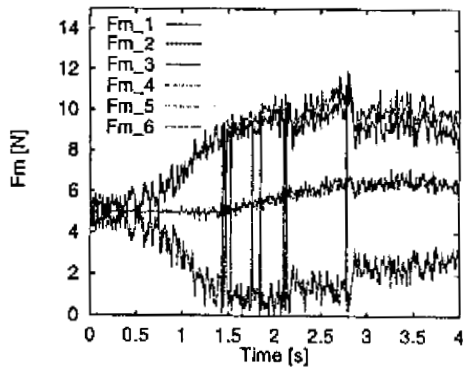


(b) 目標位置 7 mm

図11 端のMEの角度 $5^\circ$ の物体移動の結果



(a) 目標位置 5 mm



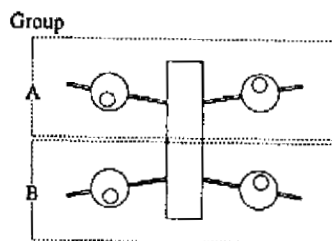
(b) 目標位置 7 mm

図 12 端の ME の角度  $5^\circ$  の物体を移動させた力

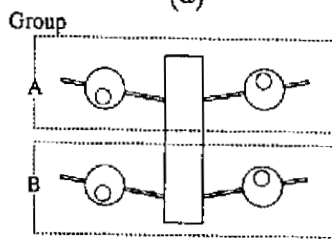
### 5. 持ち替え時の 4 台での制御式

持ち替え時の 4 台の ME の関係は、図 13 のように 2 種類考えられる。ここで、ME のモータによる力を  $F_m$ 、ばねによる復元力を  $F_s$  とする。また、Group\_A の ME を 1、Group\_B の ME を 2 とおき、それぞれを添字 1, 2 で表す。

ME の力の分割を図 14 のよう表す。力 ( $F$ ) や角



(a)



(b)

図 13 ME 4 台の配置

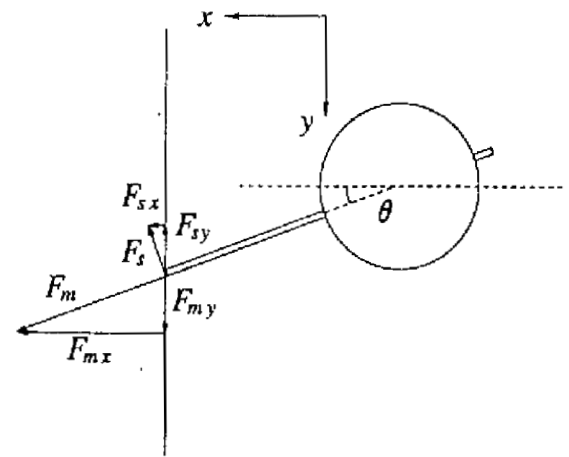


図 14 ME の力の分割

度 ( $\theta$ ) の符号は現時点では考えない。

4 台の場合は物体を動かさず把持することだけを考える。各ロッドから与えられる力を  $y$  方向と  $x$  方向に分けて考える。

ここでは、ME は左右対称になっていると仮定する。そこで同じグループの ME は同じ力を出すと考える。今回は右半分の ME で考える。そのため、物体を動かす力は実際の半分の値で考える。また、重心回りのモーメントは左右対称のため打ち消し合っている。

物体に働く  $y$  方向の力を  $F_o$ 、 $x$  方向の力を  $F_i$  とおく。ここでは、物体は動かさないで  $F_o = 0$  である。しかし、物体に  $y$  方向の外乱が加わったとき、それに反する値になる。また、 $F_i$  は同じグループの ME どうしで打ち消し合う力である。この  $F_i$  を支える力と呼ぶ。

$$F_o = F_{m1y} + F_{m2y} + F_{s1y} + F_{s2y} \quad (10)$$

$$F_i = F_{m1x} + F_{m2x} + F_{s1x} + F_{s2x} \quad (11)$$

ここで、ばねによる復元力はそのときの ME の角度により決まった値である。そのため、上式は次のように書ける。

$$F_o - (F_{s1y} + F_{s2y}) = F_{m1y} + F_{m2y} \quad (12)$$

$$F_i - (F_{s1x} + F_{s2x}) = F_{m1x} + F_{m2x} \quad (13)$$

初めに図 13 (a) のような場合で考える。(12), (13) 式は次のように書ける.

$$F_o + (F_{s1y} - F_{s2y}) = F_{out} = F_{m1y} - F_{m2y} \quad (14)$$

$$F_i - (F_{s1x} + F_{s2x}) = F_{in} = F_{m1x} + F_{m2x} \quad (15)$$

$F_{my}, F_{ms}$  を  $\theta$  を使って書き直すと,

$$F_{out} = F_{m1} \sin(\theta_1) - F_{m2} \sin(\theta_2) \quad (16)$$

$$F_{in} = F_{m1} \cos(\theta_1) + F_{m2} \cos(\theta_2) \quad (17)$$

これを,  $F_{m1}, F_{m2}$  についてまとめると,

$$F_{m1} = \frac{F_{out} \cos(\theta_2) + F_{in} \sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1) \cos(\theta_2) + \cos(\theta_1) \sin(\theta_2)} \quad (18)$$

$$F_{m2} = \frac{F_{in} \sin(\theta_1) - F_{out} \cos(\theta_1)}{\sin(\theta_1) \cos(\theta_2) + \cos(\theta_1) \sin(\theta_2)} \quad (19)$$

この (18), (19) 式の  $F_{in}$  の値を,  $F_{m1}, F_{m2}$  共に 0 ~ 13 N の値をとるように与える.

次に, 図 13 (b) のような場合で考える. この場合は, ME は各 ME のばねの復元力  $F_s$  を抑えるだけの力を出し, 支える力は指定しないことにする. このように考えると式は, 次のようになる.

$$F_{m1} = \frac{F_{s1}}{\tan(\theta_1)} \quad (20)$$

$$F_{m2} = \frac{F_{s2}}{\tan(\theta_2)} \quad (21)$$

支える力  $F_i$  は

$$F_i = F_{m1} \cos(\theta_1) + F_{m2} \cos(\theta_2) + F_{s1} \sin(\theta_1) + F_{s2} \sin(\theta_2) \quad (22)$$

以上により, 各場合の 4 台の ME の力の分配の式が導き出せた.

## 6. ロッドの接触認識

物体を移動させるには, ME のロッドを物体に接触させたままで行うと, 移動範囲が限られてしまう. そこで, ME に物体を持ち替える動作を行わせることによって, 移動範囲を広げることができると考えられる.

我々は, ME を初期位置に固定したまま研究を行っている. そのため, ME が持ち替え動作を行ったときの接触点は, 他の ME との位置関係と ME のポテンシオメータとエンコーダの測定値より計算し求めることができる. また, 物体の持ち替えで考えなければならないのは, ME のロッドが物体に接触したことを正しく認識することである. これについては, 把持していない物体の接触については視覚を用いた方法が提案されている<sup>8)</sup>.

これは, 視覚により接触時に生じる物体の位置と姿勢のずれを確認した場合に, 接触がおきたと考えるものである.

### 6.1 接触時のロッドの長さの予測

物体が初期姿勢を変えなければ, ロッドの長さは物体の形と ME の位置により容易に予測することができる. しかし, 物体が姿勢を変えている場合には, そのことを考慮してロッドの長さを予測しなければならない. ここでは, 物体を長方形と想定しロッドの長さを予測してみる.

図 15 は物体の姿勢が重心回りに  $\Omega$  だけ回転した場合を表している. 破線の長方形は姿勢が変化するまえの物体を表し, 実線部は変化した後の物体である. このとき, ロッドの長さの指令値は, 変化前より  $m$  長くした値を与えなければならないことがわかる.

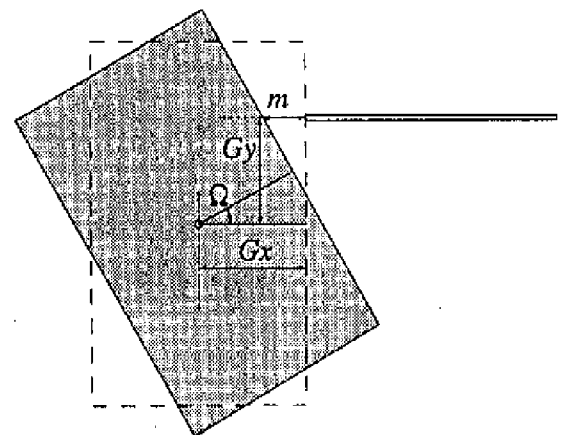


図 15 接触点の予測

このとき、 $m$  の予測式は次のように考えられる。

$$m = G_y \frac{\sin \Omega}{\sin(\frac{\pi}{2} - \Omega)} - G_x \left( \frac{\sin^2 \Omega}{\sin(\frac{\pi}{2} - \Omega)} + \cos \Omega - 1 \right) \quad (23)$$

- $m$  : 姿勢が変化する前後のロッドの長さの差
- $G_y$  : 姿勢が変化するまえのロッドの接触位置 ( $y$ )
- $G_x$  : 姿勢が変化するまえのロッドの接触位置 ( $x$ )
- $\Omega$  : 姿勢の変化量

このときの、物体の姿勢が変化するまえの物体の重心から見たロッドの接触位置 ( $G_y, G_x$ ) は、持ち替えを行った ME の位置と物体の位置の関係から求められる。また、姿勢の変化量 ( $\Omega$ ) は、ME のセンサ類もしくは視覚により求めることができる。

次に、ME の回転角が初期姿勢 ( $\theta = 0$ ) に戻らなかった場合を考える。これは、回転角  $\theta = 0$  付近ではスプリングによる復元力が弱くなるため、初期姿勢に戻れないことを考えなければならないためである。このときの、ロッドの長さの予測式は次のように求められる。

$$l' = l \frac{\sin \phi}{\sin \psi} \quad (24)$$

- $l$  : ME が初期姿勢のときのロッドの長さ
- $l'$  : ME が  $\theta$  だけ傾いているときのロッドの長さ
- $\phi$  : ME が初期姿勢のときのロッドと接触点の接線のなす角度 (ME が  $\theta$  傾いた場合のロッドの方向にとる。)
- $\psi$  : ME が  $\theta$  だけ傾いているときのロッドと接触点の接線のなす角度 ( $\phi$  に向かった方向にとる。)

また、物体の姿勢が  $\Omega$  だけ変化した場合で、ME が  $\theta$  だけ傾いているとすると、 $\Omega$  と  $\theta$  が同じ向きに回転しているときは

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \Omega \quad (25)$$

であり、 $\Omega$  と  $\theta$  が逆向きに回転しているときは

$$\phi = \frac{\pi}{2} + \Omega \quad (26)$$

である。また  $\psi$  はどちらの場合も

$$\psi = \pi - \theta - \phi \quad (27)$$

である。このとき、 $\theta$  はポテンシオメータの値から求められる。本来のロッドの接触長さに (23) 式の  $m$  を足し合わせることで  $l$  が求められる。この  $l$  を (24) 式に代入することで ME のロッドの長さの予測値  $l'$  を求めることができる。

## 6.2 ロッドの接触認識実験

ME が持ち替えを行うためには、ロッドが物体に接触したことを認識できなければならない。そのため、把持している物体に対するロッドの接触を認識する実験を行った。この実験は、4 台の ME で物体の把持を行い 1 台に接触を行わせている。

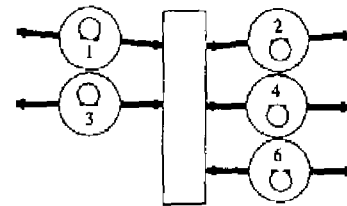


図 16 ロッドの接触認識実験

### 6.2.1 実験方法

ME の配置を図 16 のようにした。ここで一番下の ME (6) が接触を行う。物体は他の 4 台で把持している。

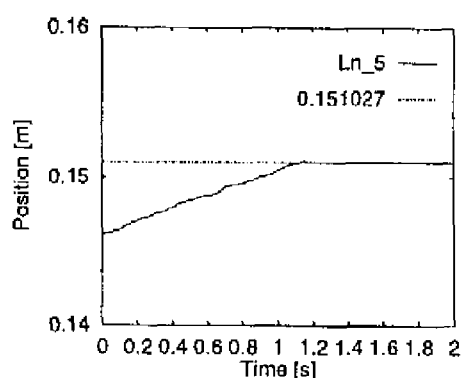
6 番の ME のロッドを初期位置から徐々に伸ばして行き、物体に接触したらロッドを止めるようにする。接触したことを確認する方法は、物体が動くかロッドの動きが止まったときに接触したとみなすようにした。

このとき、ロッドの伸ばす目標値は 2 通り用いた。一つは目標位置にロッドの長さの予測値を用いたものである。この予測値は (23), (24) 式より求めた値である。もう一つは目標値をあらかじめ決めてあるものである。

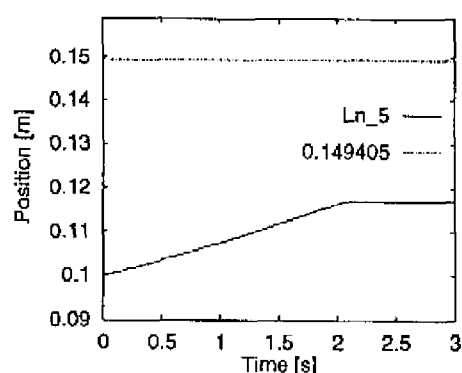


予測値を用いる方法では計算された予測値に 1 cm 足し合わせた値をロッドの目標値とした。目標値をあらかじめ決めておく方法では、物体が傾かず動いてきたときに接触する点から 5 cm 離れた地点 (物体の重心上) をロッドの目標値とした。

また、予測値を用いる方法では、物体が動くのを確認するのは、予測値の長さにロッドがきたときから行う。予測値を使わない方法では、ロッドの長さが 10 cm (約 15 cm で接触する) になったときから、物体が動くのを確認するようにした。



(a) 予測値を用いた



(b) 予測値を用いていない

図 17 接触認識の結果

### 6.2.2 実験結果

実験結果を図 17 に示す。ここで、1 点鎖線は計算された予測値の値を表している。実線は物体が動いたときにロッドが物体に接触したと認識し、一定値をとっている。

予測値を使わなかった場合は、物体に接触するまえに接触したと認識し、物体に接触するまえに

ロッドが止まっていることが図からわかる。予測値を用いたほうはロッドが接触してから止まっていることがわかる。正しく接触を認識するには、予測値を用いる方法を使うのがよいと言える。

## 7. おわりに

単純な機構しかもたないロボットによる物体の搬送方法を説明した。また、移動の実験と持ち替えに必要な接触認識の実験を行い、その結果を示した。今後は、持ち替えを行う搬送をさせていくつもりである。

また、6 台で持ち替えを行って物体の搬送ができれば、その応用としてマイクロロボットなどの移動手段としても使えると考えている。これを図 18 に示す。これは、今回の ME の持ち替え動作をするロッドを足とみなしている。レールのような固定されたものに対して持ち替えの搬送動作を行うことで、自分自身を移動させようという考えである。

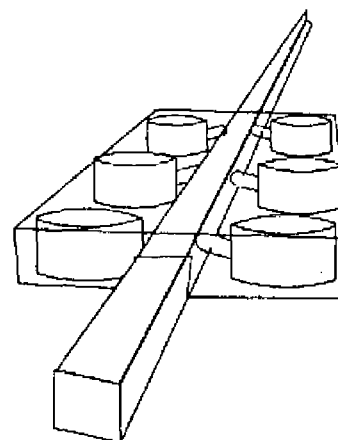


図 18 応用例

このように、この方法がさまざまな用途に応用されることを期待する。

## 参考文献

- 1) 中村 仁彦, 永井 清, 吉川 恒夫: 複数のロボット機構による協調的あやつりの力学, 日本ロ

- ロボット学会誌, Vol. 4 No. 5, 489/498(1989)
- 2) 内山 勝：複腕協調制御, 計測と制御, Vol. 30, No. 5, 389/394(1991)
  - 3) 吉川 恒夫, 永井 清：多指ハンドの操り力と握力, 計測と制御, Vol. 23, No. 11, 1206/1213(1987)
  - 4) 内山 勝, 吉村 一貴, 阿部 幸勇, 江刺 正喜：単機能マイクロロボット群による物体操作, 第 12 回ロボット学会学術講演会予稿集, 549/550(1994)
  - 5) 加納 勝, カリッド・ムナワル, 阿部 幸勇, 内山 勝：複数ロボットの協調における視覚を用いた滑べり検出と制御, 第 14 回ロボット学会学術講演会予稿集, 645/646(1996)
  - 6) K. Munawar, M. Kanou, S. Bhattacharya, M. Uchiyama : Contact-Point Slip Consideration for Cooperating Multiple Robots, 第 14 回ロボット学会学術講演会予稿集, 1011/1012(1996)
  - 7) K. Munawar, S. Bhattacharya, M. Uchiyama : Slip-Compensated Object Manipulation with Multiple Unifunctional Robots, 第 15 回ロボット学会学術講演会予稿集, 923/924(1997)
  - 8) 加納 勝：視覚を有する単機能ロボット群の協調制御, 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻修士論文 (1997)