

## 平面精密位置決め装置の分解能の解析

藤原基芳\*

### A Simulation of the Positioning Device which Moves on the Plane

Motoyoshi FUJIWARA

The positioning device which moves on the plane is used for many purposes. In general, the orthogonal manipulator is used for the positioning device. However, there is the possibility of manufacturing the device with high precision, high rigidity utilizing the parallel mechanism. This report proposes a positioning device utilizing parallel mechanism. A simulator of the device is developed and resolution of the device is analyzed. The results show that end effector of the device is more than 10 times finer than the actuator of the device.

Key words: Simulator, Positioning Device, High Precision, High Rigidity, Parallel Mechanism

#### 1. はじめに

微細加工，半導体ウエハー位置決め，精密部品組立・加工，顕微鏡観察，光学部品の位置決め，光通信部品のアライメント，MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)，生物試料の位置決め等の作業において平面上を動作する2自由度または3自由度の精密位置決め装置が用いられている<sup>1)</sup>。

こういった装置には一般には高分解能のアクチュエータを用いた直交型マニピュレータが用いられている。しかし，精密位置決め装置に平行メカニズム機構<sup>2)</sup>を用いることにより安価なアクチュエータを用いて高分解能，高剛性の位置決め装置を製作できる可能性がある。

そこで，本報では高分解能の位置決め作業を行うための平面精密位置決め装置の機構を提案する。この機構には平行メカニズム機構を用いた。また，この機構の解析を行うためのシミュレーションプログラムを開発したので，このシミュレーションプログラムを用いて提案する機構の分解能

の解析を行う。

#### 2. 提案する機構と分解能の解析方法

##### 2. 1 提案する機構の概要

本報で提案する機構を図1に示す。この機構は平行メカニズム機構であり，直動型のアクチュエータ2本を用いている。図のアクチュエータ1によりジョイントC，Dを，アクチュエータ2によりジョイントFを矢印の方向に動かすことにより，エンドエフェクタ(位置決め作業を行う部分)を矢印の方向に動作させる。ジョイントA，B，Eはエンドエフェクタに固定し，ジョイントC，D，Fはアクチュエータにより動作させる。ジョイント間の長さCDはABの長さと同じになるように固定し，またリンクACとBDの長さは同じとする。この状態でアクチュエータを動かすと四角形ABDCの形は変化するが，常に $AB=CD$ ， $AC=BD$ となるので，四角形ABDCは常に平行四辺形となる。したがって，直線ABは常にアクチュエータ1の動作方向と平行になる。エンドエフェクタ上でジョイントA，Bは固定されており，前述の通り直線ABは常にアクチュエータ1の動

\* 金属研究室研究担当

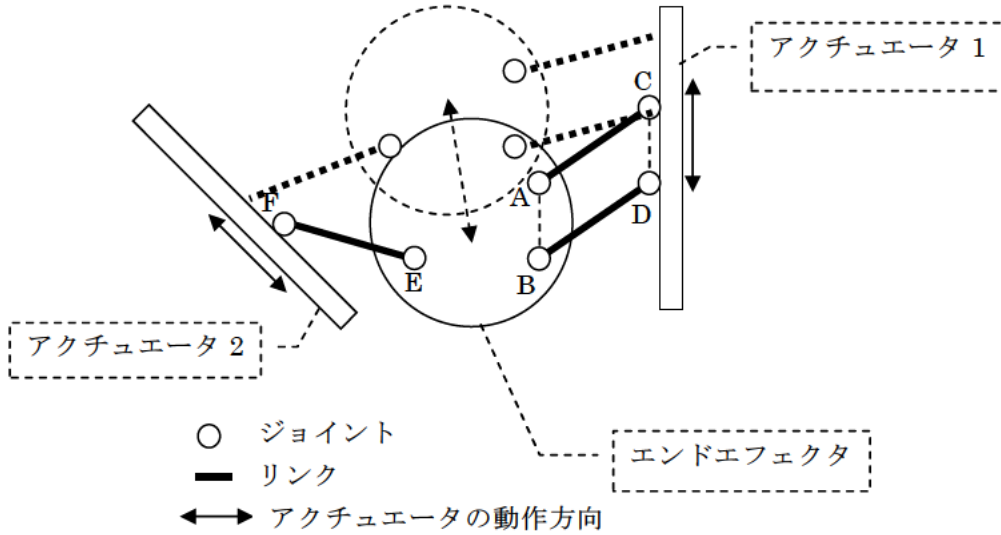


図1 解析する機構

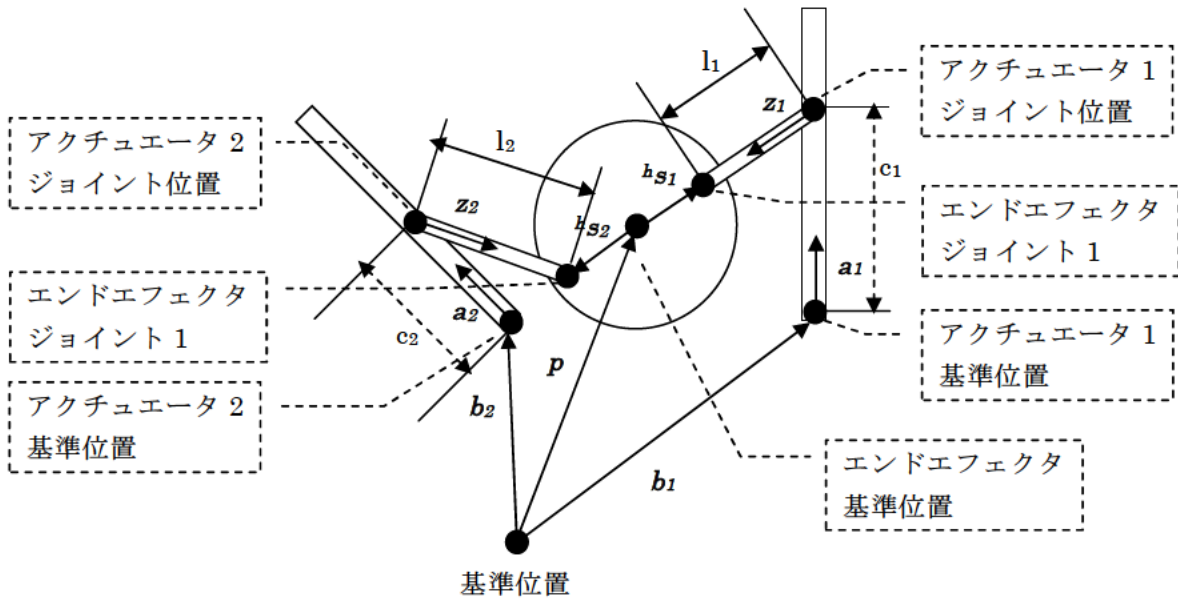


図2 解析する機構の幾何学的配置

表1 図2の記号の説明

$p$	基準点からエンドエフェクタ基準点への位置ベクトル
$h_{s_i}$	エンドエフェクタ基準点からエンドジョイント $i$ への位置ベクトル ( $i=1, 2$ )
$b_i$	基準点からアクチュエータ基準点への位置ベクトル
$c_i$	アクチュエータ制御量
$a_i$	アクチュエータ動作方向への単位方向ベクトル
$l_i$	リンク $i$ の長さ
$z_i$	リンク $i$ の単位方向ベクトル

作方向と平行になるので、アクチュエータをどのように動作させてもエンドエフェクタの姿勢は変化しない機構となっている。

## 2.2 機構の運動学式

図2に機構の幾何学的配置を示す。表1にその記号の説明を行う。増田の方法<sup>2)</sup>を参考に機構の

運動学式を導出する。

まず機構の運動学式を導出する。なお、図1の機構においてはジョイントAとジョイントB、およびジョイントCとジョイントDの位置関係は固定されているので、リンクACの位置と方向がわかればリンクBDの位置と方向は一位に定まる。したがって、以下の考察ではリンクBDの位置と方向については考慮しない。

図2より、

$$\mathbf{p} + {}^h\mathbf{s}_i - \mathbf{b}_i = c_i \mathbf{a}_i + l_i \mathbf{z}_i \quad (1)$$

ただし、 $i=1,2$

これより

$$c_i = \frac{\mathbf{a}_i \cdot (\mathbf{p} + {}^h\mathbf{s}_i - \mathbf{b}_i)}{\pm \sqrt{\{\mathbf{a}_i \cdot (\mathbf{p} + {}^h\mathbf{s}_i - \mathbf{b}_i)\}^2 - (\mathbf{p} + {}^h\mathbf{s}_i - \mathbf{b}_i)^2 + l_i^2}} \quad (2)$$

次に微小運動学式を導出する。式(1)の両辺を微分して

$$\delta \mathbf{p} = \delta c_i \mathbf{a}_i + l_i \delta \mathbf{z}_i$$

この両辺に  $\mathbf{z}_i$  で内積を取り、整理する。

$$\mathbf{J}_1 \delta \mathbf{p} = \mathbf{J}_2 \delta \mathbf{c} \quad (3)$$

ただし

$$\mathbf{J}_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{z}_1^T \\ \mathbf{z}_2^T \end{pmatrix}, \mathbf{J}_2 = \begin{pmatrix} \mathbf{z}_1^T \cdot \mathbf{a}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{z}_2^T \cdot \mathbf{a}_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(3)、(4)より、この機構の分解能が良好になる(アクチュエータの動きに対してエンドエフェクタの動きが小さくなる)条件は、下記の通りである。

- a.  $\mathbf{J}_1$ の行列式の絶対値をできるだけ大きくする。
- b.  $\mathbf{J}_2$ の行列式の絶対値をできるだけ小さくする。

$\mathbf{z}_i$ は単位行列なので、 $\mathbf{J}_1$ の行列式の絶対値は $\mathbf{z}_1$ と $\mathbf{z}_2$ が直交するときに、最大値1になる。

$\mathbf{J}_2$ の行列式は $\mathbf{z}_1^T \cdot \mathbf{a}_1$ と $\mathbf{z}_2^T \cdot \mathbf{a}_2$ の積なので、

これらの絶対値が小さくなるほど $\mathbf{J}_2$ の行列式の絶対値が小さくなる<sup>4)</sup>。 $\mathbf{J}_2$ の行列式の絶対値が最小値0に近くなる条件は、 $\mathbf{z}_1$ と $\mathbf{a}_1$ が直角に近く、かつ $\mathbf{z}_2$ と $\mathbf{a}_2$ が直角に近いことである。

以上より、分解能の良好な機構を製作するには、次の2つの条件を満たせばよいと考えられる。

1. リンク1の向きとリンク2の向きが直角に近いこと。

2. リンク1の向きとアクチュエータ1の動作方向が直角に近く、かつリンク2の向きとアクチュエータ2の動作方向が直角に近いこと。

ただし、本機構を動作させるとリンクの方向が変化する。リンクの方向が変化してもその影響をできるだけ小さくして良好な分解能を維持するためには、以下の条件を満たすのがよいと考えられる。

3. リンク1とリンク2をできるだけ長くすること。

ただし、リンクを長くするとリンクの剛性が低くなり機構の精度に悪影響を及ぼすので、この点も考慮してリンク長さを決定する必要があるが、リンクの剛性評価については今後の検討課題である。

## 2. 3 機構のエンドエフェクタ分解能の計算方法

手先最小変位の計算方法<sup>3)</sup>をもとに、エンドエフェクタ分解能を計算する。

対象とするマニピュレータの全てのアクチュエータ分解能を $\mathbf{R}_a$ とする。このマニピュレータのある動作範囲M内の全ての動作点において、全てのアクチュエータが $\pm \mathbf{R}_a$ 動いても、手先の動作量が $\mathbf{R}_{eT}$ 以内であるとする。このとき、このマニピュレータの動作範囲Mにおける手先最小変位を $\mathbf{R}_{eT}$ と定義する。この $\mathbf{R}_{eT}$ の計算方法を以下に示す。

式(3)、(4)より

$$\delta \mathbf{c} = \mathbf{J} \delta \mathbf{p} \quad (5)$$

$$\text{ただし、} \mathbf{J} = \mathbf{J}_2^{-1} \mathbf{J}_1 \quad (6)$$

このヤコビ行列Jの特異値分解を $\mathbf{J} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T$ とする。 $\Sigma$ は下式のようなになる。

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

ただし、 $\sigma_1 > \sigma_2$ 。

なお、 $\sigma_2 = 0$ の場合は過可動特異点となるので本報告では考慮しない。

この時、前述の定義文中にある「手先の動作量 $\mathbf{R}_{eT}$ 」は、 $\delta e$ 空間中で原点を中心とした半径 $\mathbf{R}_{eT}$

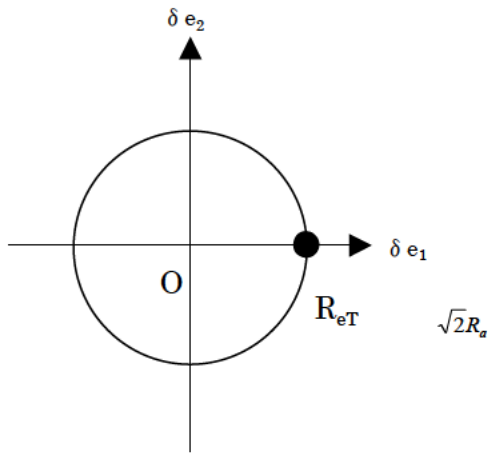


図 3 手先の微小変位

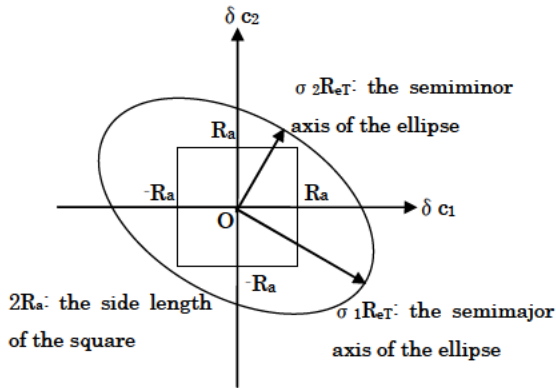


図 4 アクチュエータの微小変位

の円を表す(図 3 参照)。

$\delta c = J \delta e = U \Sigma V^T \delta e$ なので、図 3 の円は  $\delta c$  空間中では図 4 の楕円に写像される。定義文中の「全てのアクチュエータが  $\pm R_a$  動く」とは、図 4 の正方形の頂点を表す。したがって、手先最小変位が  $R_{eT}$  以下であるためには、図 4 の楕円形が正方形の外部にあればよいことになる。

原点から正方形の頂点までの距離は、楕円の短径は  $\sigma_2 R_{eT}$  なので、楕円が正方形の外部にある、すなわちマニピュレータが手先最小変位  $R_{eT}$  を満たす十分条件は下式のとおりである。

したがって、手先のある動作領域内のすべての動作可能な点においてヤコビ行列の特異値を計算し、最小の  $\sigma_2$  (これを  $\sigma_{2min}$  とする)を求めれば、この動作領域内における  $R_{eT}$  は  $\sqrt{2}R_a / \sigma_{2min}$  なる。

この機構のアクチュエータの分解能を  $R_a$  とすると、エンドエフェクタの分解能  $R_{eT}$  は下式のようにになる。

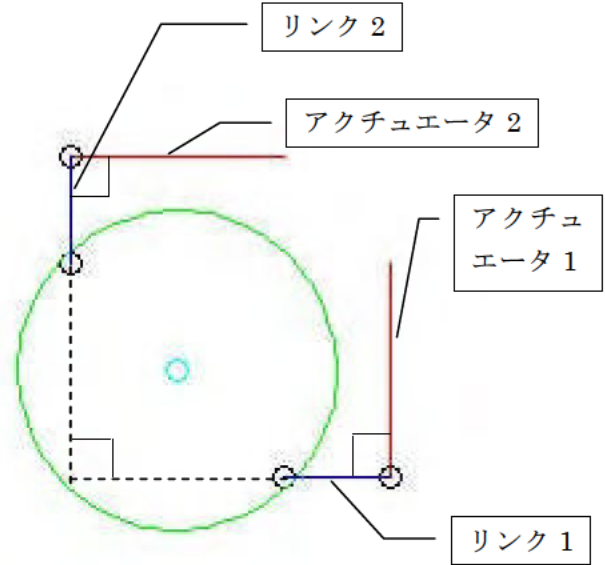


図 6 解析を行う機構

$$R_{eT} \geq \sqrt{2}R_a / \sigma_2 \quad (8)$$

したがって、手先のある動作領域内のすべての動作可能な点においてヤコビ行列の特異値を計算し、最小の  $\sigma_2$  (これを  $\sigma_{2min}$  とする)を求めれば、この動作領域内における  $R_{eT}$  は  $\sqrt{2}R_a / \sigma_{2min}$  となる。

## 2. 4 シミュレーションプログラムについて

図 5 に、開発したシミュレーションプログラムを示す。プログラムの簡素化のために、図 5 の画面では図 1 の BD にあたる部分を省略している。

このプログラムでエンドエフェクタの位置または動作量を入力すると、アクチュエータも動作し、実際の動きを見ることができる。また、様々なアクチュエータの基準位置・方向やリンク長さ等のリンクパラメータを入力して動作させることにより、機構のリンクパラメータを変更した場合の動作を見ることができる。また、2. 3 節で示したヤコビ行列、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  の値も常時計算し表示する。

## 3. 解析結果

2. 2 節の考察をもとに、図 6 のような機構のシミュレーションを行った。2 本のリンクが直交し、さらにそれぞれのリンクとアクチュエータが直交するように機構配置を行った。この状態から、エンドエフェクタを  $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$  の範囲で動作させて、最も分解能の悪い(細かく動けない)

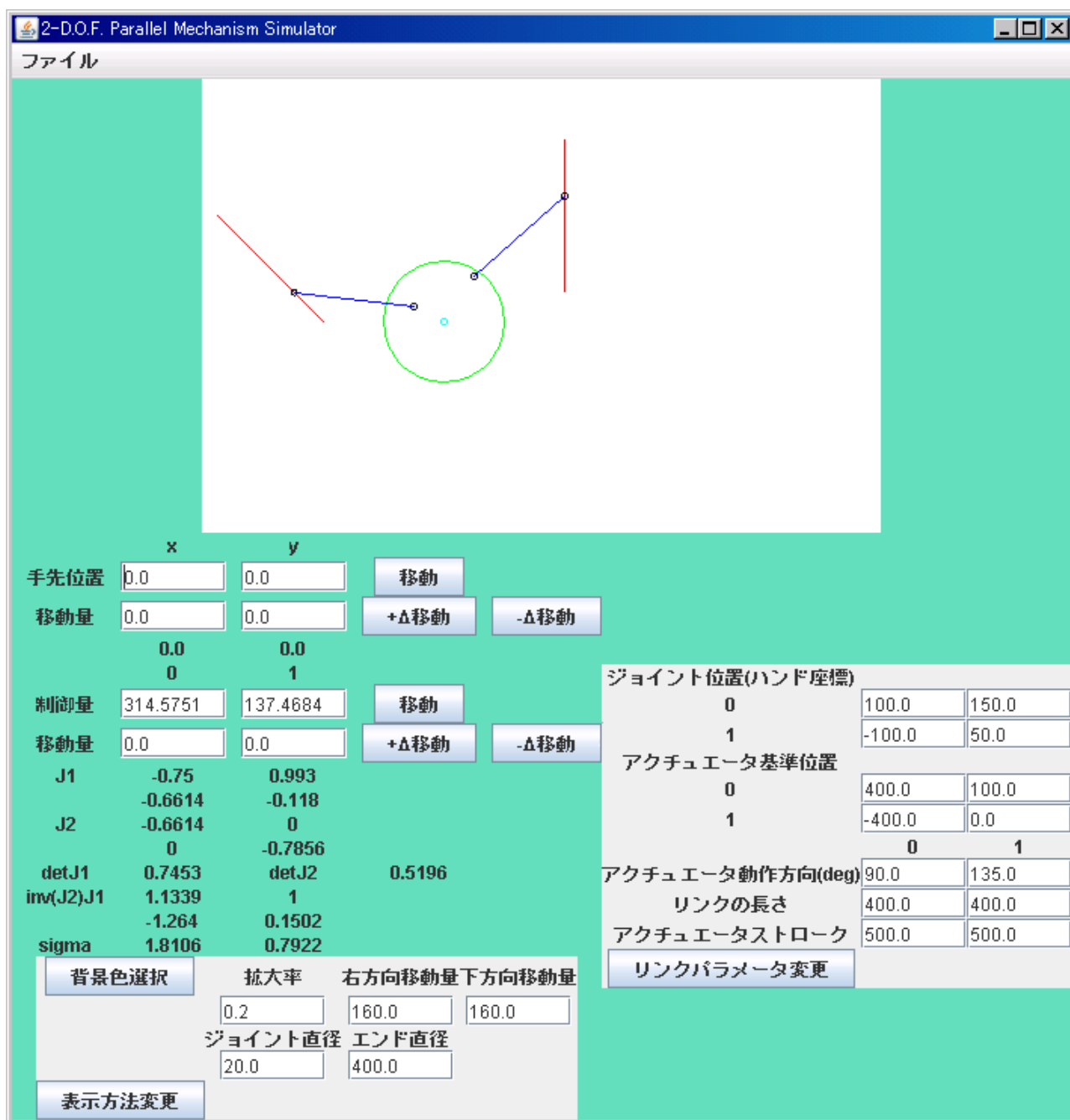


図5 シミュレーションプログラムの画面

場合の値を調べた。

表2 リンク長さの変化に伴う分解能の変化

リンク長さ [mm]	必要ストローク [mm]	$\sigma_2$	分解能 [ $\mu\text{m}$ ]
50	4.6677	10.1468	0.035
100	6.5214	14.7877	0.024
150	7.9434	18.3455	0.019
200	9.1420	21.3439	0.017
250	10.1980	23.9850	0.015

シミュレーションプログラムを用いてリンク長さの変化に伴う分解能の変化を調べた。使用するアクチュエータは、一般に市販されていて容易に入手可能な分解能  $0.25\mu\text{m}$ 、ストローク 10mm という仕様を想定した。

結果を表2に示す。2.2節で考察したとおり、リンクを長くするほど分解能の悪化が少なかった。ただし、リンクの長さが長くなるほど、エンドエフェクタを少し動かすためにアクチュエータは大きく動くようになる。リンク長さが 100mm 以上

になると、エンドエフェクタ分解能はアクチュエータ分解能の 1/10 以下の数値になる。ただし、リンク長さが 250mm になると、エンドエフェクタが (200[ $\mu$ m],200[ $\mu$ m]) の位置に移動したときアクチュエータが原点から 10mm 以上動くことになり、想定しているストローク 10mm のアクチュエータでは動作不可能となる。

#### 4. まとめ

高分解能の位置決め作業を行うための平面精密位置決め装置の機構を提案した。この機構にはパラレルメカニズム機構を用いた。また、この機構の解析を行うためのシミュレーションプログラムを開発し、このシミュレーションプログラムを用いて提案する機構の分解能の解析を行った。本報告で提案した機構では、リンク長さを長くするほどエンドエフェクタ分解能が小さくなり、アクチ

ュエータに必要なストロークが長くなることがわかった。

#### 参考文献

- 1) <http://www.pi-japan.jp/mecha.html>
- 2) 増田峰知：“直動型パラレルメカニズムの解析と応用”。大阪大学大学院学位論文(2003)
- 3) 藤原基芳ほか：“多自由度マニピュレータの分解能指標を用いたパラレルメカニズムのリンクパラメータセット探索プログラム”。三重県科学技術振興センター工業研究部研究報告書, 31, p36-42(2007)
- 4) 増田峰知ほか：“微小運動制御方法および微小運動ステージ”。特許 406204(2008)
- 5) 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, p699-704(1992)