

# 微細作業ステージの開発

## 第1報：劣可動特異点近傍を活用した微小運動機構原理

増田峰知\* 谷澤之彦\*

### Development of the Micro Motion Stage

The principle of micro motion mechanism using around the Under Singularity

by Takanori MASUDA and Yukihiro TANIZAWA

Recently, the micro/nano-technology for new material and biotechnology is researched actively. In this report, we discussed the micro motion parallel mechanism using around the Under Singularity. At first we explained about the singular action of the motion transmission mechanism by 1DOF lever model. And we studied the link structure of the various multiple DOF parallel mechanisms that can be high resolution in neighborhood of the Under Singularity since its actuator motion is decreased to some directions in its end-effector motion. Finally, we made the prototype of the micro motion parallel mechanism with a circular motion actuator as a concrete example.

Key Words: Micro Motion, Micro Manipulation, Parallel Mechanism, Singularity, Multiple DOF

### 1. はじめに

近年、新素材やバイオ技術を扱うマイクロ・ナノテクノロジー分野の研究が活発である。これらの分野では、顕微鏡下の微細ワークを観察するだけでなく、微小物体を操作する微細作業技術が望まれている<sup>1)-5)</sup>。例えば、図1は代表的な顕微鏡下作業の様子である。このような作業は、受精卵



図1 代表的な顕微鏡下作業の様子

操作などのバイオ研究に利用され、畜産業や医薬品産業の大きな発展に欠かせないものとなっている。現在は液圧式マニピュレータを用いて、熟練者の手作業で行われているが、このような作業を産業化するには、安定して大量にこの作業を処理できる装置が必要である。

本研究では、微細作業技術への適応を目的として、精細な位置や姿勢の制御分解能を持つ多自由度微細作業ステージを開発する。具体的には、パラレルメカニズムの劣可動特異点近傍領域を積極的に利用する多自由度微小運動機構を提案する。まず、一般的な運動伝達機構の劣可動特異点近傍での挙動について、1自由度のてこモデルを用いて簡易に説明する。次に、この原理を各種の多自由度パラレルメカニズムに適応し、それぞれ劣可動特異点近傍になるリンク構成を具体的に検討する。最後に、得られた知見に基づき2種類の多自由度パラレルメカニズム型微小運動機構を試作した。本報（第1報）では、本機構原理の解説及び試作した結果について報告する。

\* 金属研究室 研究グループ

## 2. 微小運動機構の現状と課題

既に、2～3自由度の微細作業を実現するために、一本針式マイクロマニピュレータや精密微動テーブル装置などの開発が知られている<sup>4)</sup>が、より多自由度な微細作業を行うためには、多自由度運動であるロボット技術を応用した微小運動機構の適応が望ましいと思われる。

微小運動機構の研究課題は、大きく分けてアクチュエータの研究と機構原理の研究に整理できる。

アクチュエータの研究では、精密加工ボールねじと回転式モータを組合せたものが多く用いられている。超精密XYステージ機構（例えば、ステップ）では、リニアモータと空気静圧軸受が採用されている。他にも、駆動源の要素技術として、圧電素子、超音波モータ、磁歪素子などが利用されている。本報では、これらの利用を前提とした機構についての研究であり、要素自体の高分解能化については言及しない。

機構原理の研究では、一般には直交座標型が多く使われている。例えば、XYテーブルのように直動アクチュエータを複数組合せた直交座標型<sup>6)</sup>の機構である。通常、このような機構ではアクチュエータの運動方向とテーブル機構の移動方向は一致し、入力節と出力節の運動（移動量）の変換比率は1:1である。よって、テーブル機構の制御分解能は、アクチュエータの制御分解能が限界となる。また、アクチュエータを積み重ねる方式では、最もベース側のアクチュエータは、それ以降手先側のアクチュエータの質量をすべて負担するため、可動ワーク質量に比べてかなり大きなアクチュエータを選択しなければならない。このことは、自由度が増すにつれ、精度的にもコスト的にも不利な条件である。

本研究では、この課題に対して、平行メカニズムによる運動縮小機構原理を提案する。特に運動伝達機構の特異点を積極的に活用することで、微細な多自由度運動を生成することを試みる。

## 3. 運動伝達機構の特異点での挙動

機構の特異点は、運動伝達機構において力学的な性質が大きく変化する位置や姿勢であり、その解析や回避のための機構系・制御系の設計など、既に多くの研究<sup>7)-9)</sup>がなされている。

知られている運動伝達機構の特異点は、無限大

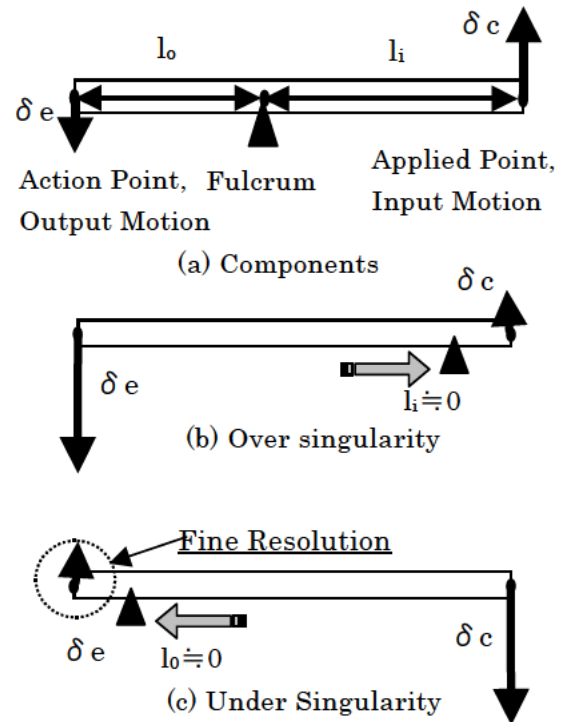


図2 てこモデルによる特異点の説明

の入力が要求され出力が制御できなくなる過可動特異点 (Over Singularity) と、出力運動を失う劣可動特異点 (Under Singularity) の2種に分けて整理できる。

本報では、まず2種の特異点の挙動を簡単に説明するため、1自由度の「てこモデル」を導入する。図2-(a)で示すように、長さ成分のみを持つ剛体の「てこ」を考える。てこの入出力節の運動関係は、支点を中心とする1自由度の回転運動であるが、その運動を時間微分した微小運動関係は、出力節の位置ベクトルに垂直な直線運動の速度ベクトルで表すことができる。その速度ベクトルをそれぞれ $\delta c$ 、 $\delta e$ とし、入出力節点から支点までの距離をそれぞれ、 $l_i$ 、 $l_o$ とすると、入出力節の運動関係は、式(1)で表すことができる。

$$l_i \delta e = l_o \delta c \quad (1)$$

ここで、図2-(b)のように、支点と力点の間を近づけた時、即ち $l_i$ が0に近づいた場合を考える。この時、入力に対する出力運動は次第に大きくなる。更に、 $l_i$ が0と一致するところでは、作用点の運動を制御しようとした場合、入りに無限大の速度が要求される。この状態が過可動特異点となる。実際の機構では、この位置姿勢を通過する軌

道は、アクチュエータに無限大のトルクが要求され機器破損の恐れがある。よって、過可動特異点は、機構設計上必ず避けなければならないとされている。

また、図2-(c)のように、支点と作用点の間を近づけた時、即ち  $l_0$  が0に近づいた場合を考える。この時、入力に対する出力運動は次第に小さくなる。更に、 $l_0$  が0と一致するところでは、作用点での運動が失われる。この状態が劣可動特異点となる。この特異点近傍では、入力節を大きく動かしても、出力節では小さな運動しか得られない。このため、出力節の分解能は、入力節の持つ制御分解能を更に縮小したものとなり、これは運動縮小機構と考えられる。

#### 4. パラレルメカニズム型微小運動機構

##### 4.1 パラレルメカニズムの微小運動機構への適応の可能性

パラレルメカニズムは、直交座標型ロボットに比べ自由度が増えても構造をコンパクトにまとめることができる。そのため、多自由度微細作業機構への適応が期待でき、いくつかの微細作業機構に適用<sup>10)11)</sup>されている。

一般に、パラレルメカニズムは機構パラメータを調整することで、入力節と出力節の運動を変換する比率を調整することができる。そのため、入力節の制御量に比べて、出力節の運動変位が小さくなるように機構パラメータを設定すれば、微小運動を得ることができる。このような機構では、アクチュエータ単体の分解能より小さい制御分解能を機械的に得ることができる。本研究では、パラレルメカニズムの劣可動特異点の近傍を積極的に活用して、出力節の運動を縮小することで多自由度微小運動機構を検討する。なお、このような原理による多自由度微小運動機構は、過去に見当たらない。

一方、谷川らによる機構<sup>10)</sup>は、圧電素子をアクチュエータに用い、非常に微小な運動をある程度拡大することで、適当な制御分解能と動作領域を得ている。これもパラレルメカニズムを使い、多自由度の運動を変換する事例である。

##### 4.2 運動学と特異点近傍での挙動

本項では、入出力節間の変換(拡大/縮小)率が小さくなる機構原理を、パラレルメカニズムの運

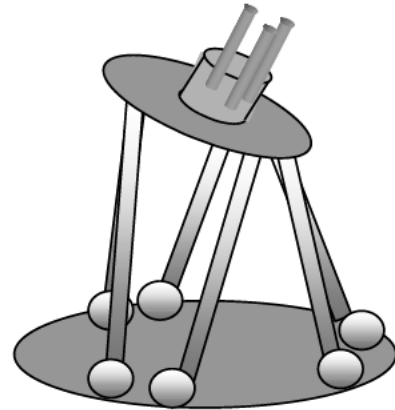
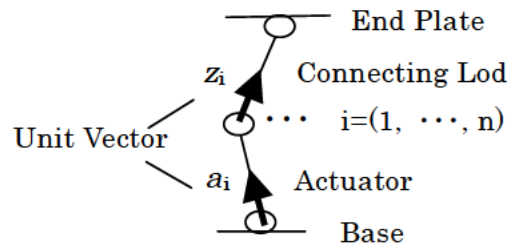


図3 パラレルメカニズム



$z_i$ : 入出力節連結リンクの方向単位ベクトル

$a_i$ : 駆動源の動作方向の方向単位ベクトル

図4 リンク構成

動学に基づき検討する。図3で示すような多自由度パラレルメカニズムの微小運動関係は、出力節の位置姿勢  $e$  と入力節の制御量  $c$  の幾何関係を  $f(e, c)=0$  とすると、式(2)で表すことができる。

$$J_e \delta e = J_c \delta c \quad (2)$$

但し、 $\delta e$ : 出力節の微小運動

$\delta c$ : 入力節の微小運動

$$J_e: \partial f / \partial e$$

$$J_c: \partial f / \partial c$$

多自由度パラレルメカニズムの劣可動特異点は、 $\text{rank} J_c < \dim J_c$  になる場合であり、 $\det J_c = 0$  の状態である。

式(1)の  $l_0$  と式(2)の  $\det J_c$  は共にスカラー量であるから、式(1)と式(2)は、自由度は違うが相似な関係になっている。よって、式(1)に従い定性的に解釈をすれば、 $\det J_c = 0$  になる劣可動特異点の近傍領域では、入力節の運動を大きく入力しても、出力節で得られる運動は小さくしか得られないはずで、これは多自由度運動縮小機構と考えることができる。

パラレルメカニズムの1リンクの構成を図4と

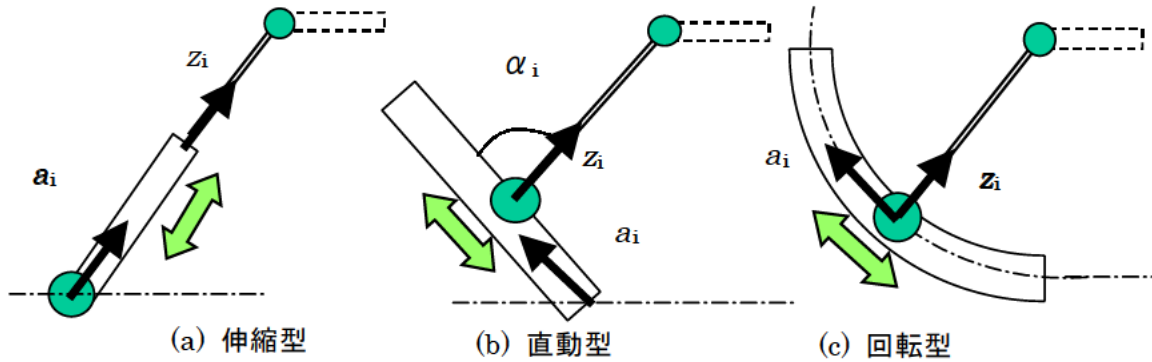


図5 3種の平行メカニズムにおける特異点近傍状態（伸縮型を除く）

すると、 $J_c$ は式(3)で表される。

$$J_c = \text{diag}(z_1^T a_1 \cdots z_n^T a_n) \quad (3)$$

式(3)より、 $\det J_c$ が特異になるには、いずれか1つ以上の行が0になる状態、即ち  $z_i \cdot a_i$  の内積が0になる状態が考えられる。この状態は、ベース側リンクとエンド側リンクのそれぞれの運動伝達方向を示すベクトルが直交する状態である。但し、これ以外の条件で  $\text{rank } J_c < \dim J_c$  の場合も考えられるが、本報では考慮しない。

この考察に基づき、既知の3種類（伸縮型、直動型、回転型）の平行メカニズムについて、それらが劣可動特異点になる条件を4. 3項で具体的に示し、4. 4項で試作により検討する。なお、試作では、構造の形態を複数試みるため、駆動方法（手動または電動）、リンク構成（並進の3自由度または並進及び回転の6自由度）、ジョイント方式（磁気式または予圧式のボールジョイント）を適当に組合せるものとする。

#### 4. 3 具体的な機構形態への展開

##### (1) 伸縮型平行メカニズム

伸縮式のアクチュエータで駆動するこのタイプでは、図5-(a)に示すように、 $z_i$ と $a_i$ の方向は同じで、その内積は常に1である。よって、上記条件に該当しない。

##### (2) 直動型平行メカニズム

直動式のアクチュエータで駆動するこのタイプでは、図5-(b)に示すように、直動アクチュエータにエンド側リンクが垂直に立った状態の時、劣可動特異点となる。ただし、アクチュエータの制御位置によっては、特異点近傍状態から離れるため、運動縮小効果が小さくなると思われる。

##### (3) 回転型平行メカニズム

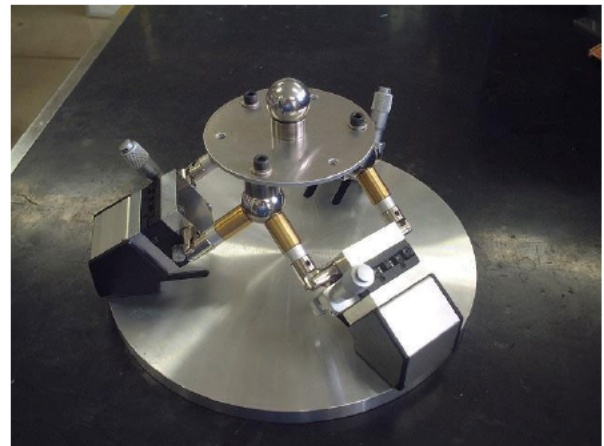


図6 3自由度手動マイクロステージ（直動型平行メカニズム方式）

回転式のアクチュエータで駆動するこのタイプでは、図5-(c)に示すように、ベース側リンクの回転中心とアクチュエータ側リンクのエンド側端点一致する時、劣可動特異点となる。アクチュエータの軌跡が円弧状であるため、制御量に関わらず劣可動特異点近傍状態が維持できると考えられ、3種の機構の中で最も効果的と考えられる。

#### 4. 4 試作

##### 4. 4. 1 手動式3自由度直動型平行メカニズムの試作

図6に直動型平行メカニズムの原理を用いた3自由度微小運動機構を示す。機構は、DELTA<sup>12)</sup>を参考に、3つの平行リンクで構成した3自由度直動型平行メカニズムとし、アクチュエータとリンクのなす角 $\alpha$ が90 (deg.)近くになるように各パラメータを設定した。入力節は市販の光学用手動ステージとし、関節はボールジョイントで球対偶を構成した。

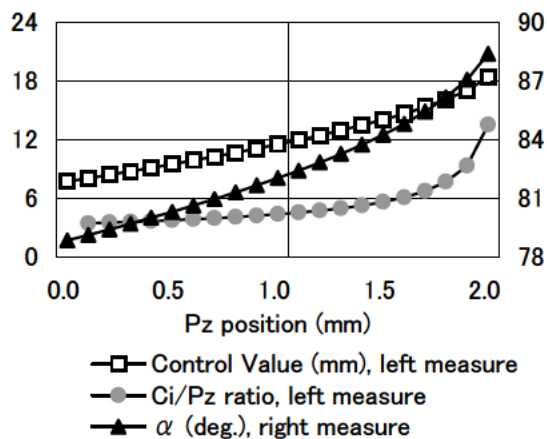


図7 シミュレーション結果

図7は、表1の条件で出力節のZ位置を0~2 (mm)まで変化 (X, Y = 0で一定)させた時の駆動源の制御量, 入出力の比率及びリンクとアクチュエータがなす角のシミュレーション計算結果である。この図より, 特異点近傍 (Pz = 2.0 (mm)付近)では,  $\alpha$ が90 (deg.)度に近づき, 入出力比率が大きくなっている, 即ち出力値に対し大きい入力値が要求されている。このことから, 本微動機構は, アクチュエータの分解能より高い分解能を持つ機構であることが判る。

表1 シミュレーション条件

Parameters	Unit	Value
Table Joint Radius	mm	20
Base Joint Radius	mm	62
Link Length	mm	58
Actuator Angle	deg.	60

#### 4. 4. 2 電動式6自由度回転型平行メカニズムの試作

図8は, 回転型平行メカニズムの原理を用いた6自由度微小運動機構の試作機の製作例である。アクチュエータには, 光学実験用のステップモータで駆動されるゴニオステージを6台用い, その回転中心の近くにエンド側リンクのエンド側端点を配置することで, 劣可動特異点近傍状態を実現している。ジョイントには, 与圧式の小型ボールジョイントを用いた。なお, 試作機は, 動作領域を直径2mm以上の球状, 手先中心部分解能を並進成分で100nm以下を目標としたが, 写真下部に見える調整用ステージによって, アクチュエータ位置と傾きを任意に設定できるもので

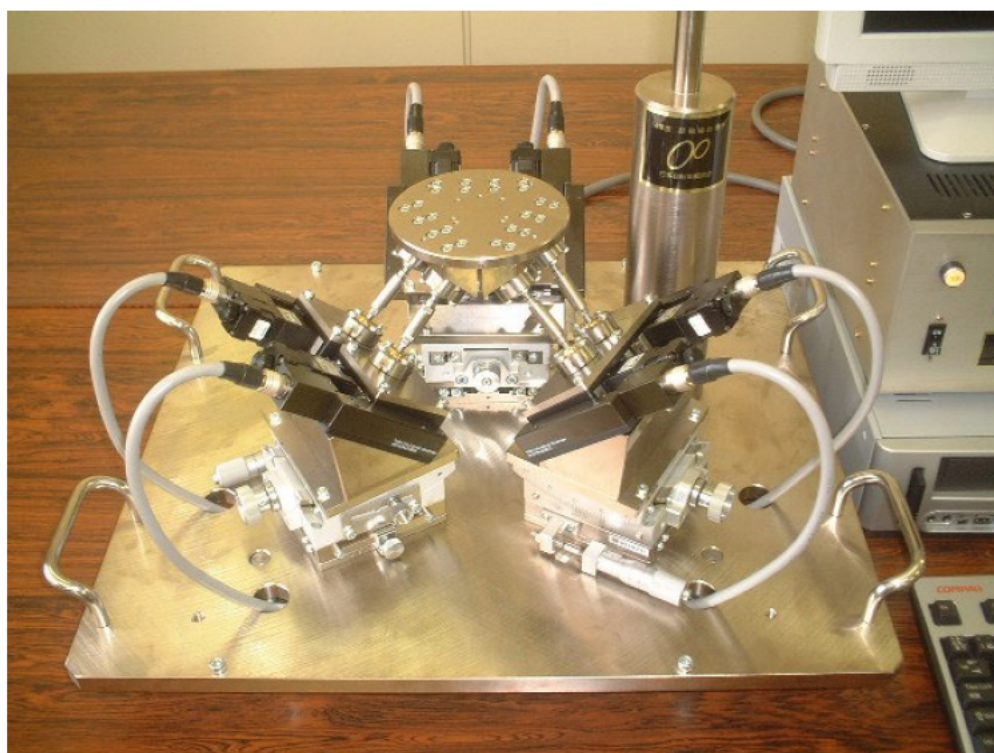


図8 6自由度自動マイクロステージ (回転型平行メカニズム方式)

ある。本装置は、シーケンサによるシーケンシャル運転とパーソナルコンピュータによる任意運転ができる構造となっている。

## 5. 結果と考察

本研究においては、まず運動伝達機構に見られる2種の特異点の挙動を、1自由度でこの原理で簡便に解説した。次に、この原理から、運動伝達機構の劣可動特異点近傍においては、高い出力分解能が得られることを示した。次に、この原理を多自由度運動機構にも適応するために、パラレルメカニズムでの応用を検討した。劣可動特異点近傍になる条件は、運動学で得られるヤコビ行列の特徴に基づき検討され、駆動形態別の機構条件として具体的に示された。

得られた知見から直動型及び、回転型パラレルメカニズム方式による微小運動機構を試作した。今後は、6自由度回転型パラレルメカニズムの試作機を中心に特性評価を実施する予定である。

## 参考文献

- 1) 新井健生：“マイクロマニピュレーション”。バイオメカニズム学会誌，22(4)，p146-151 (1998)
- 2) 中尾政之：“微細構造物の最先端組立技術”。機械の研究，50(6)，p619-626 (1998)
- 3) 渡嘉敷浩樹：“位置・姿勢非干渉形微細作業用マイクロマニピュレータの開発”。日本機械学会論文集C，66 (649)，p3069-3076 (2000)
- 4) 大塚二郎ほか：“精密・超精密位置決めの実状と将来予想”。精密工学会誌，67(2)，p173-178 (2002)
- 5) 新井史人：“マイクロ・ナノマニピュレーション技術の将来展望”。精密工学会誌，68(11)，p1389-1392 (2002)
- 6) 株式会社三友製作所ほか：特開平 11-266666
- 7) 内山 勝：“パラレルマニピュレータの機構と特性”。日本ロボット学会誌，10(6)，p721-726 (1992)
- 8) C. Gosselin et al.：“Singularity analysis of closed -loop Kinematics chains”。IEEE Transaction on Robotics and Automation，6(3)，p281-290 (1990)
- 9) 杉本浩一：“機構の特異点に関する考察”。日本ロボット学会誌，11(4)，p550-556 (1993)
- 10) 谷川民生ほか：“二本指マイクロハンドの設計と微細作業”。日本ロボット学会誌，15(2)，p122-127 (1997)
- 11) ヒーハイト精工株式会社製品カタログ。
- 12) Clavel, R.：“DELTA, a fast robot with parallel geometry, Proc. Int. Sympto. Ind. Robots”。p91-100 (1988)



本研究は競輪の補助を受けて実施したものです