

# 微細作業ステージの開発

## 第2報：微小運動機構の制御課題と動作領域評価

増田 峰知\* 藤原 基芳\* 谷澤 之彦\*

### Working Space Analysis of Micro Motion Parallel Mechanism

by Takanori MASUDA, Motoyoshi FUJIWARA and Yukihiro TANIZAWA

The micro motion parallel mechanism utilizing near the Under Singularity area, where some motions of mechanism are lost, has high resolution. However, this mechanism has some problems of kinematics due to its principle. In this report, we arranged the kinematics properties of the principle and show the clarified subjects. Moreover, we used that two inverse kinematics solutions existed, and showed that working space was expandable.

Key words: Micro Motion Mechanism, Parallel Mechanism, Singularity, Working Space

#### 1. 緒言

近年、マイクロ・ナノテクノロジーの研究が活発になるにつれ、顕微鏡下で物体を操作する微細作業技術<sup>1)</sup>が注目されている。著者らは、多自由度で高い分解能を要求される顕微鏡用作業ステージへの応用を想定し、パラレルメカニズム型微小運動機構<sup>2) 3)</sup>を開発している。試作機は、アクチュエータが円弧状に駆動する6自由度回転型パラレルメカニズムの劣可動特異点近傍を有効に活用する原理で、外観を図1に示す。本機構については、特許を出願<sup>4)</sup>している。

しかしながら、本機構は劣可動特異点近傍を積極的に使い高い分解能を得ようとしているため、制御上の課題がいくつか明らかになっており、これらは動作領域など機構特性に大きく影響を与えるものと考えられる。本報では、まずこれら特異点近傍を使う運動学の特徴を整理し、それらに起因する課題を整理した。また、テーブルの姿勢変化を含めた動作領域について考察し、前述の課題を有効に利用すれば、従来使われていなかった運動学解を選択することで動作領域が増やせることなどを示す。



図1 試作した微細作業ステージ

#### 2. パラレルメカニズム型微小運動機構の課題

##### 2.1 劣可動特異点での微小運動原理

まず課題整理のために、劣可動特異点近傍を使うことで微小運動が得られる原理を説明する。劣可動特異点(Under Singularity)は、リンク機構において入力運動に対し出力運動を失う状態である。これは、力が出力不能になる過可動特異点(Over Singularity)と違い、通過可能な特異点である。パラレルメカニズムは、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、微小運動関係を式(1)で表すことができる。

\* 金属研究室研究グループ

$$J_e \delta e = J_c \delta c \quad (1)$$

但し,  $\delta e$  : 出力節の微小運動

$\delta c$  : 入力節の微小運動

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

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

ここで、式(1)が劣可動特異点となるのは、1自由度「てこ」の運動関係との数学的相似性から、 $\det J_c=0$ の時であることが示されている<sup>2)</sup>。その時、平行メカニズムが採りうる代表的なリンク構成を図2に示す。図2は、試作機に採用した回転型平行メカニズムの劣可動特異点状態であり、運動を伝達するリンクの方向ベクトル  $z_1$  と駆動源の運動ベクトル  $a_1$  が直交する場合である。図2から明白な様に、劣可動特異点状態でアクチュエータ円弧の半径とリンク長さが同じになれば、出力節の一部であるエンドジョイントは、アクチュエータ制御位置によらず常に同じ位置になる。

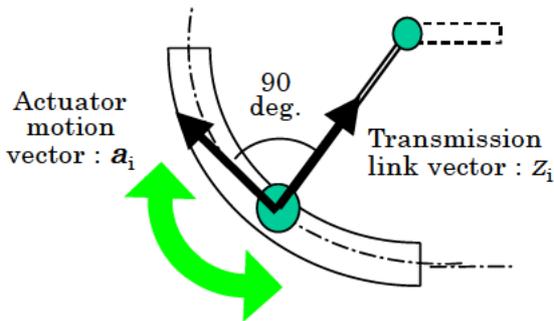


図2 特異点状態になる時のリンク構成

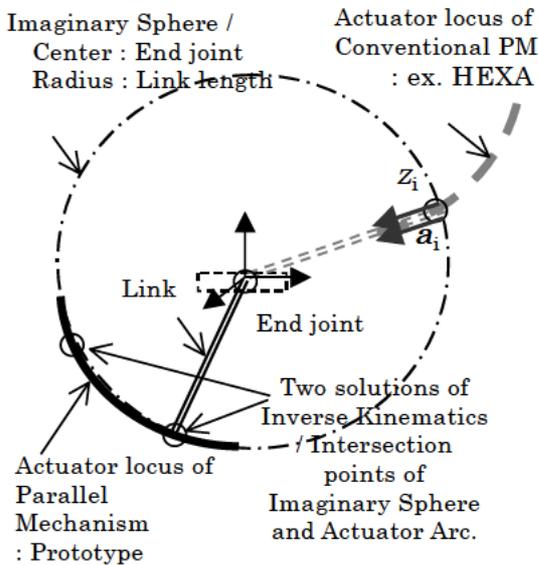


図3 運動学原理

このことから、両長さをわずかな差を与えることで劣可動特異点近傍状態を作ることができる。

## 2.2 逆運動学計算

次に、動作領域の評価に必要な逆運動学についてその特徴を整理する。ここで図3中左下部に例示するように、アクチュエータ上に配置されたジョイントが動きえる軌跡(図3中の実線で描かれた円弧、線分長さが可動範囲に相当)と、エンドジョイントを中心にリンク長さ分を半径にした仮想球(図3中の一点鎖線)を考える。

一般に平行メカニズムは、手先位置姿勢からアクチュエータ制御量を計算する逆運動学方向において、運動学解は一意に決まる。よって、エンドジョイントの位置と姿勢を与えれば、図3中の仮想球の式が決まり、更に、予め設定してあるアクチュエータ軌跡の交点を求めることで得られる解が逆運動学解となる。この計算は、空間中の球と円弧の交点を求めることと同じなので、2次式の解公式から、アクチュエータ1軸あたり0~2個の運動学解を持つことが判る。具体的には仮想球と円弧の交点がない場合、即ち運動学解が存在しない場合(解が0個)と、両曲線が1点で接触する場合(解が1個)、及び2点で交差する場合(解が2個)で整理できる。

ここで生ずる2解は、2次式の解公式の判別式の±に起因している。本報では、便宜的に、-項で計算したものをc1、+項で計算したものをc2として、以降の解析に用いる。

## 2.3 2つ生じる運動学解の従来の処理

本機構では特異展近傍を積極的に活用するため、2つの運動学解は、特異点位置(解が1個のみ生ずる位置)を挟み非常に近い位置に生ずるものと考えられる。しかしながら、このことは、従来知られている回転型平行メカニズム(例えば、HEXA<sup>5)</sup>、図3中右上部に例示する駆動曲線を採用)では、問題にはならなかった。

一般にこれら回転型平行メカニズムは、高い運動性能を目指しており、アクチュエータ側リンクの駆動軌跡は、図3中の破線で描かれた円弧のように、 $a_1$ と $z_1$ が同じ方向になるように設計されている。この場合も、計算上運動学解は2解発生するが、特異点を挟んだ近い位置に発生することはなく、実現可能な解が容易に一方に限定できたからである。

## 2. 4 課題の整理

ここまで整理した運動学の特徴や試作機の製作でみられた課題などを以下に整理する。

(1) 本機構では、 $\det J \neq 0$  を使うためヤコビ行列を用いる制御手法に困難が予想される。例えば、順運動学計算やキャリブレーションではヤコビ行列を用いた収束計算を利用することが多いので、注意が必要である。

(2) 逆運動学解は、特異点の近傍で2解が有効に成立する場合がある。この場合は、制御の連続性なども考慮して解を選択しなければならない。

(3) 本原理では、アクチュエータ側では常時直交状態に近く揺動角は小さくて済むが、エンド側では揺動角が大きくなることが想像される。実機製作においては、ジョイントの選定に注意する必要がある。

## 3. 動作領域評価

### 3. 1 動作領域の算出方法

試作機をモデルにし微細作業ステージの動作領域を検証した。試作機は各種パラメータの調整機能が付いているが、代表的なパラメータ値は表 1 であり、本報ではこの値を用いている。動作領域の計算には、パラレルメカニズム用シミュレーションソフト<sup>5)</sup>を用いた。動作領域の定義は、手先座標を適当なピッチで空間走査した時、逆運動学計算が成立し、機構干渉が発生せず、かつアクチュエータの有効ストローク内で解が存在する領域とした。

### 3. 2 動作領域形状

動作領域外観図を図 4～6 に示す。図 4 は、逆運動学解 c1 を選択した場合、図 5 は、c2 を選択した場合、図 6 は、それらを重ね合わせた場合の図である。いずれの場合も、3～6 角錐が変形したダイヤモンド状の形状を示している。一例として図 7 に  $Z=1.45\text{mm}$  時の XY 平面上の動作領域を示す。これらの図より、動作領域は XY 軸方向で  $\pm 0.06\text{mm}$  程度、Z 軸方向で  $0.1\text{mm}$  程度と非常に小さいことがわかる。なお、Z 軸の値は、シミュレーションソフトの都合上、リンクが水平状態 ( $0\text{deg.}$ ) になった時のエンドプレートの高さを  $0\text{mm}$  として表した絶対位置である。

### 3. 3 解選択による動作領域の拡大

図 6 からわかるように、逆運動学解が 2 つ得

表 1 主要仕様

Link Length	60 mm
Actuator Arc Radius	58 mm
End Joint Circle Radius	44.71 mm
Base joint Circle Radius	45.98 mm
Valid Actuator Angle	30-60 deg.

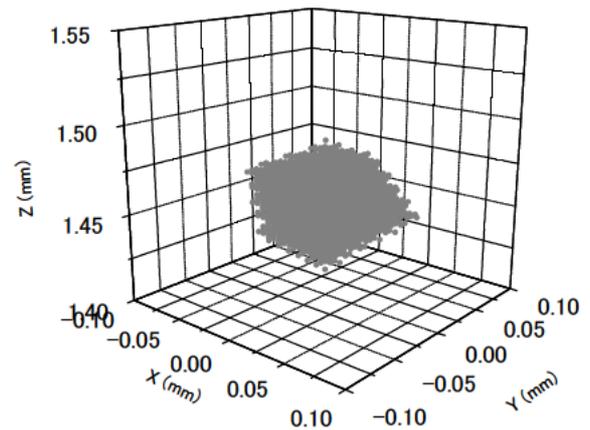


図 4 解 c1 の動作領域図

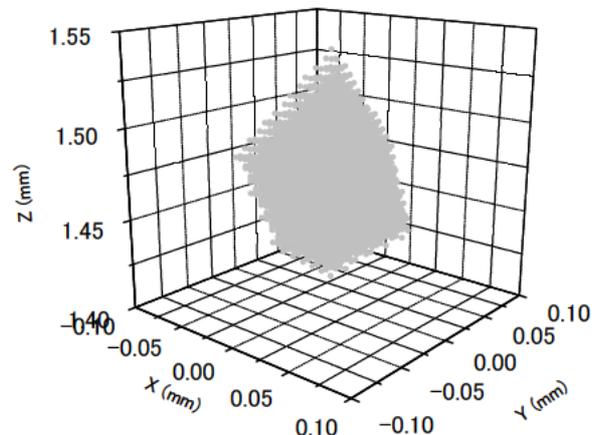


図 5 解 c2 の動作領域図

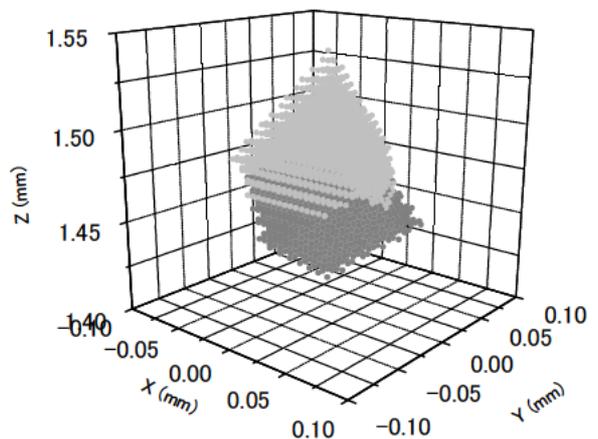


図 6 c1,c2 を重ねた動作領域

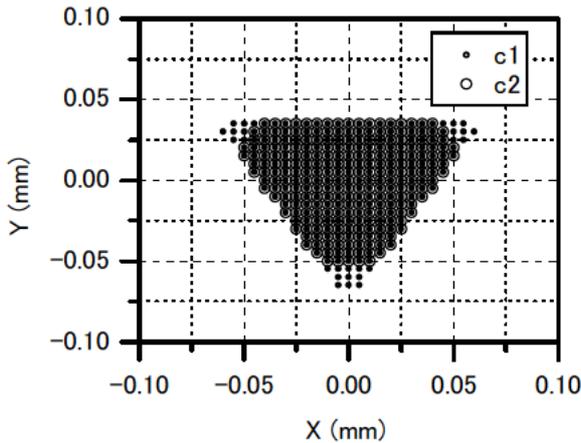


図7 Z=1.45mm 時の動作領域断面図

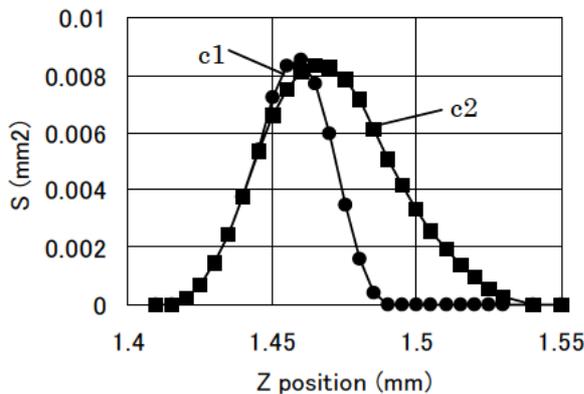


図8 運動学解の選択による動作領域の違い

られることを利用すれば、動作領域を増やすことが可能になる。図8は、Z位置の違いにより、動作領域のXY平面上の面積Sの変化を示したものである。Z=1.46mm付近までは、c1を選択した方が可動範囲を広くとれ、それ以上のz値の時は、c2を選択した方が動作領域を広くとれることがわかる。このことから、c1とc2を適切に選択することによって動作領域を広げられることがわかった。但し、これらは全軸を同時にc1またはc2を選択した場合である。各軸ごとに2解を組み合わせて2°通りの組み合わせがある。各軸ごとにどちらを適切すればよいか、またそのときの選択指標が何かは今後の課題である。

### 3.4 リンク長さの影響

一般に、平行メカニズムの動作領域を増やすには、リンク長さを延長することが効果的と知られている。図9は、リンク長さを、60, 64, 68, 72mmに変更した場合の動作領域を、Z位置を絶対値表示で整理したものである。図9より、リンク長さにより動作領域が変化するため、必要な領域サイズにより適切なリンク長さを選択すべきであ

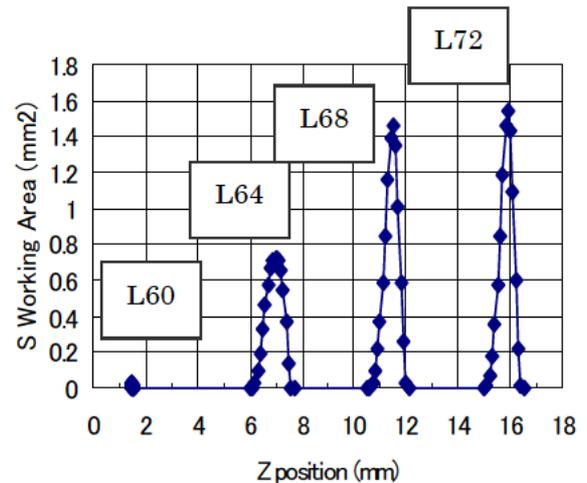


図9 リンク長さの違いによる動作領域の変化 (Z位置は絶対値表示)

ることが分かる。しかしながら、動作領域を拡大すれば、分解能は低下するため、その選択には注意が必要である。

## 4. 結言

平行メカニズム型微小運動機構について、運動学上の課題を整理し、動作領域特性を示した。

また、2種生じる逆運動学解を適切に選択すれば、動作領域を増加できることを示した。今後は、整理された課題について、更に検討を進めたい。

## 参考文献

- (1) 新井健生：“マイクロマニピュレーション”. パイオメカニズム学会誌, 22(4), p146-151 (1998)
- (2) 増田峰知ほか：“平行メカニズムの特異点に着目した微細ステージ”. 第20回日本ロボット学会学術講演会'02, CD-ROM, 1K32 (2002)
- (3) 増田峰知ほか：“劣可動特異点を活用した平行メカニズム型微小運動機構”. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門講演会'03, CD-ROM (2003)
- (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”. 特許公開 2004-122271 (2004)
- (5) 内山勝ほか：“6自由度高速平行ロボットHEXAの開発”. 日本ロボット学会誌, 12(3), p451-458 (1994)
- (6) 西ノ平志子ほか：“平行メカニズムシミュレータの開発”. 計測自動制御学会中部支部平成11年度計測自動制御研究講演会論文集, p9-11 (1999)