

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560136  
 研究課題名（和文） 6自由度空間高精度ハイブリッドマニピュレータに関する機構学的研究  
 研究課題名（英文） A Kinematic Study of Precise Hybrid Manipulators with Six Degrees of Freedom  
 研究代表者  
 武田 行生（TAKEDA YUKIO）  
 東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授  
 研究者番号：20216914

## 研究成果の概要：

本研究は、3自由度回転機構と3自由度並進機構からなる6自由度空間ハイブリッドマニピュレータを対象として、高精度運動を実現するための誤差鈍感化設計の指針を具体的に示すことを目的として機構学的研究を行った。3自由度回転機構について、機構パラメータ誤差による出力リンクの回転中心位置誤差に着目した誤差鈍感化設計法を開発し、これにより大作業領域を実現する機構の開発に成功した。また、3自由度並進機構については、機構パラメータ誤差によって生じる出力姿勢角誤差の有用な評価方法および特異点に着目した実用作業領域に基づく最適設計法を開発することができた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：ロボット工学，機構学，ハイブリッドマニピュレータ，パラレルメカニズム，機構総合，精度，特異点，作業領域

## 1. 研究開始当初の背景

本研究で対象とする6自由度空間ハイブリッドマニピュレータは、出力リンクが姿勢変化を伴うことなく3次元空間内で並進運動を行う3自由度空間機構(並進機構)と、出力リンク上の特定の点の位置が変化することなく出力リンクがその点(回転中心)のまわりに任意の軸まわりに回転運動を行う3自由度空間機構(回転機構)とからなる。そして、並進機構お

よび回転機構ともに高精度運動が期待できるパラレルメカニズムを適用する。

このように出力運動を表す6つの成分を3つの並進成分と3つの回転成分に分けてそれぞれを独立に創成する2つの機構により1つのマニピュレータを構成することにより、運動学・力学計算がきわめて単純化され、機構設計・制御系設計の見通しが立てやすくなり、結果として高性能なマニピュレータが実現で

きると考えられる。このことを実現するためには、並進機構および回転機構それぞれについて適切な機構系と制御系の設計を行わなければならないが、そのための手法は十分に整備されていなかった。特に、高精度化のための設計指針については、ほとんど明らかにされていなかった。

一般にマニピュレータの出力精度を向上させるための手法として、次の3つがある。

1. 機構パラメータ(リンク長、オフセットなど)の誤差に対する出力変位誤差の感度を小さくするように最適な機構パラメータを決定する(誤差鈍感化設計)。
2. マニピュレータの出力変位誤差を実測して機構パラメータの誤差を同定するプロセス(機構キャリブレーション)を予め組込んでおき、この結果に基づいて機構パラメータを補正する。
3. マニピュレータの出力変位誤差を実測してこれを直接フィードバックする(フルクローズドループ制御)。

1は機構設計に関する手法、2および3は運用および制御系設計に関する手法である。2および3の手法を採用するか否かにかかわらず、1の誤差鈍感化設計は高精度機械設計の基本であり、本研究ではこの手法に着目する。本研究では、本マニピュレータの特徴を活かすために、回転機構については出力リンクの姿勢誤差よりもむしろ出力リンクの回転中心の位置誤差に着目し、並進機構については出力リンクの位置誤差よりもむしろ姿勢誤差に着目して、誤差鈍感化設計を行うための手法を開発する。

## 2. 研究の目的

本研究では、回転機構および並進機構として、3つの連鎖により出力リンクを支持し、各連鎖が5つの回転ジョイントにより構成される3自由度空間平行メカニズムを取り上げ、作業領域内の特異点の分布および機構

パラメータの誤差に対する出力変位誤差の関係を体系的に把握するとともに、これらの結果に基づいて高精度ハイブリッドマニピュレータを実現するための誤差鈍感化設計の指針を具体的に示すことを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 基本方針

本研究で対象とするハイブリッドマニピュレータの構成を図1に示し、高精度化のための基本方針を表1にまとめる。

回転機構および並進機構それぞれについて、具体的な形式・寸法を有する機構を取り上げて理論的および実験的に検討を加え、高精度化のための設計指針を開発することを目指した。

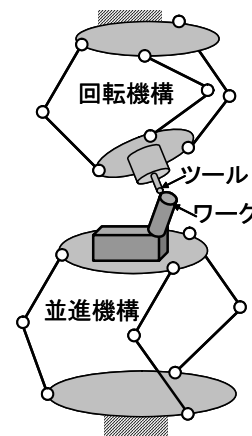


図1 ハイブリッドマニピュレータの構成

### (2) 対象機構の基本構成

回転機構および並進機構ともに、5つの回転対偶からなる3つの直列連鎖、出力リンクおよびベースからなる機構を対象とした。

### (3) 回転機構に関する研究方法

回転機構については、図2に示すように、

表1 高精度化のための方針

	ワークとツールの相対姿勢の創成と高精度化への対応	ワークとツールの相対位置の創成と高精度化への対応
回転機構	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 創成する</li> <li>・ 姿勢誤差に基づくキャリブレーションと補正</li> <li>・ 並進機構により生じる姿勢に関する構造誤差の補正</li> <li>・ 姿勢誤差のフィードバック</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 創成しない</li> <li>・ <u>回転中心位置に関する誤差鈍感化設計</u></li> <li>・ 回転中心の位置誤差に関するキャリブレーションに基づく構造誤差の推定</li> </ul>
並進機構	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 創成しない</li> <li>・ <u>姿勢に関する誤差鈍感化設計</u></li> <li>・ 姿勢誤差に関するキャリブレーションに基づく構造誤差の推定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 創成する</li> <li>・ 位置誤差に基づくキャリブレーションと補正</li> <li>・ 姿勢誤差により生じる位置に関する構造誤差の補正</li> <li>・ 位置誤差のフィードバック</li> </ul>

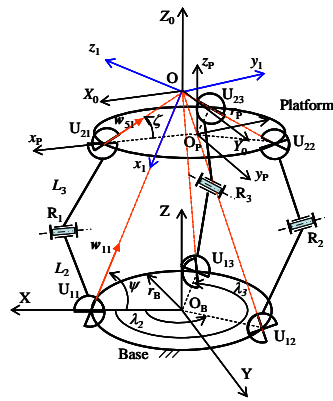
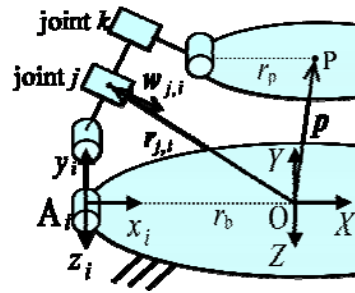
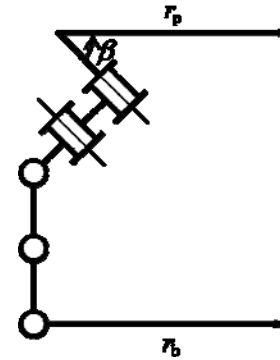


図2 3-URU 機構 (回転機構)



(a) 連鎖 A



(b) 連鎖 B

図3 並進機構の連結連鎖

ベース側および出力リンク側の回転対偶が 1 点  $O$  (出力リンクの回転中心) で交わり、これらの間の 3 つの回転対偶の軸がそれぞれの連鎖において平行であり、さらにベース側および出力リンク側の 2 つの回転対偶が直交する機構(3-URU 機構)を取り上げた。まずは特異点および作業領域に基づく機構設計法について検討を加えた。次に、機構パラメータ誤差による出力リンクの回転中心位置誤差への影響を調べるための誤差解析式を導出し、任意の出力リンク姿勢における誤差評価を可能とした。さらに、この解析式に基づき、出力リンクの傾斜角が大きく、かつ回転中心の位置誤差を最小化する機構設計のための設計チャートを作成し、これに基づき機構の設計・試作を行って実験的検討を加えた。

#### (4) 並進機構に関する研究方法

図3に示す2種類の連鎖を有する並進機構を取り上げ、特異点を考慮した作業領域(実用作業領域)の解析方法を開発するとともに、実用作業領域に基づく最適設計を行い、試作および実験による検討を加えた。図3(b)の連鎖を有する機構については、誤差鈍感化設計のための評価指標を提案し、これと実験により得られた出力リンクの姿勢誤差の測定値との比較を行い、その有効性を検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 回転機構に関する主な成果

特異点と作業領域を考慮した機構設計を行い、図4の試作機を製作した。この試作機が所期の作業領域を有することを実験的に確認することができた。しかし、機構パラメータの誤差などにより、出力リンクの回転中心位置に誤差が生じていることが観察された。

各連鎖内の隣接する対偶の軸の相対位置の誤差を4通りに分類し、これらによって生じる回転中心位置の誤差の最大値を誤差鈍

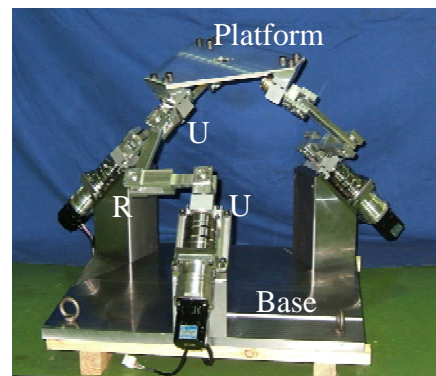


図4 回転機構の試作機 (1)

感化設計の評価指標として提案した。そして、この指標を基にして、仕様として与えられる作業領域の条件に対する機構パラメータの最適値を表す設計チャートを作成した。設計チャートの一例を図5に示す。この図は、作業領域を表す出力リンクの最大傾斜角  $\xi_{x(\max)}$  と機構パラメータの最適値および評価指標  $\Delta E_{\max}$  の関係を表している。このチャートに基づき設計・試作した回転機構を図6に示す。この試作機は、出力リンクの最大傾斜角が  $74^\circ$  の場合に対する最適設計結果を基に製作したものであり、実際に  $65^\circ$  の平行メカニズムとしては非常に大きな出力リンク傾斜角を実現することに成功した。

#### (2) 並進機構に関する主な成果

作業領域内の特異点判定特性値から特異点を含まない閉領域の大きさを計算し、これらの領域から最大の領域(実用作業領域)を抽出する手法を開発した。図3の連鎖を有する並進機構に適用し、それぞれについて実用作業領域を最大化する機構設計手順を明らかにするとともに、実用作業領域に基づく最適機構パラメータの決定を行った。両者の機構の作業領域の大きさを定量的に評価した結果、連鎖Aの機構の実用作業領域は、連鎖

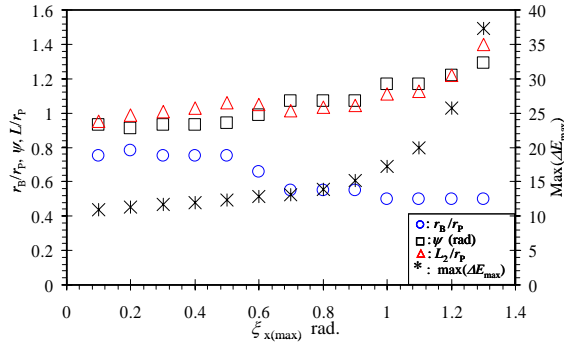


図5 回転機構の設計チャートの例

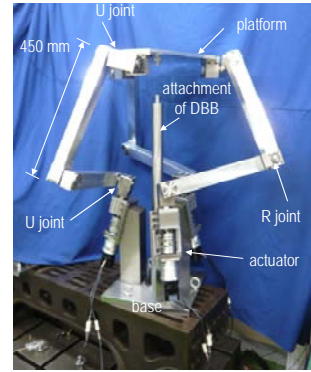


図6 回転機構の試作機(2)

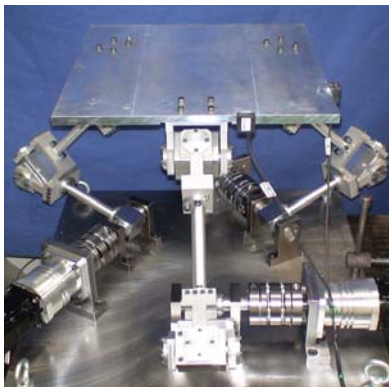


図7 並進機構の試作機

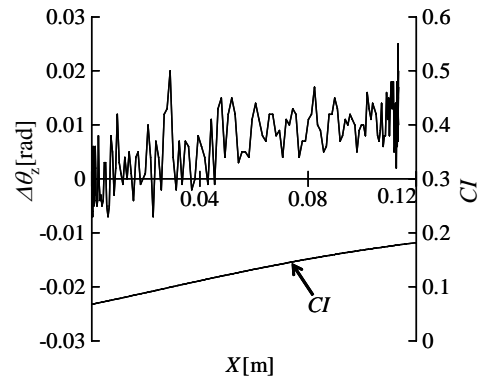


図8 並進機構の出力リンクの姿勢誤差 (実験結果) と評価指標

Bの機構に比べて大きく、さらに従来の機構に比べてもかなり大きいことがわかった。これらの結果に基づき設計・試作した並進機構を図7に示す。この試作機は所期の実作業領域を実現し、本研究で開発した設計手法の有効性が確かめられた。

連鎖Bの機構についても試作機を製作し、実験的検討を行った。実験および計算結果の一例を図8に示す。これは、出力リンクの変位  $X$  に対する出力リンクの姿勢誤差  $\Delta\theta_z$  および本研究で開発した出力リンクの姿勢誤差の評価指標  $CI$  の変化を表したものである。この図において、提案した評価指標と出力リンクの姿勢誤差の間には相関が見られる。他の位置においても同様の相関を見ることができた。以上により、提案した評価指標  $CI$  は誤差鈍感化設計のための評価指標として有用であると考えられる。

(3)まとめ

以上(1)および(2)に述べたように、回転機構、並進機構ともに、誤差鈍感化設計のための評価指標を開発することができた。また、特異点評価指標および誤差鈍感化設計のための評価指標に基づいて設計・試作した回転機構と並進機構は所期の特性を実現した。これらのことから、3自由度回転機構と3自由度並進機構からなる6自由度ハイブリッド

マニピュレータの高精度化のための基本的な設計指針を得ることができたと考えられる。今後は、キャリブレーション法の開発を進め、本研究の成果と合わせて、高精度ハイブリッドマニピュレータを実現し、産業応用に結び付けたいと考えている。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Masataka TANABE, Yukio TAKEDA and Syamsul HUDA, "Utility workspace of 3-5R translational parallel mechanism", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 2, No. 6, pp. 998-1010, 2008, 査読有り。
- ② Syamsul HUDA and Yukio TAKEDA, "Kinematic design of 3-URU pure rotational parallel mechanism with consideration of uncompensatable error", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 2, No. 5, pp. 874-886, 2008, 査読有り。

[学会発表] (計5件)

- ① Syamsul HUDA, Yukio TAKEDA and Shuta HANAGASAKI, "Kinematic design of 3-URU pure rotational parallel mechanism to

perform precise motion within a large workspace”, Second international workshop on fundamental issues and future research directions for parallel mechanisms and manipulators, 2008.9.21-22, フランス・モンペリエ市.

- ② Syamsul HUDA and Yukio TAKEDA, “Development of a 3-URU type rotational parallel mechanism with large inclination angle”, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008.8.3-7, 横浜.
- ③ Syamsul HUDA and Yukio TAKEDA, “Kinematic design of 3-URU pure rotational parallel mechanism to minimize uncompensatable error”, Seventeenth CISM-IFTToMM Symposium on ROMANSY, Robot Design, Dynamics, and Control, 2008.7.5-9, 東京.
- ④ 田邊雅隆・武田行生・フダ シヤムスル, “実用作業領域に基づく 3 自由度並進パラレルマニピュレータの開発”, 日本機械学会第 8 回機素潤滑設計部門講演会, 2008.4.21-22, 岡山県倉敷市.
- ⑤ Syamsul HUDA and Yukio TAKEDA, “Kinematic design of 3-URU pure rotational parallel mechanism with consideration of the uncompensatable error”, 第 13 回ロボティクスシンポジウム, 2008.3.17, 香川県琴平.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

武田行生 (TAKEDA YUKIO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：20216914

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし