

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560143

研究課題名（和文） 大作業領域と高精度運動を同時実現するハイブリッドマニピュレータの開発

研究課題名（英文） Development of hybrid manipulators which achieve precise motions within a large workspace

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（和文）：本研究は、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)のまわりに回転運動を行う空間機構(回転機構)とからなるハイブリッドマニピュレータを対象として、高精度運動と大作業領域を同時に実現するための機構設計法およびキャリブレーション法の開発を目的として、理論的および実験的検討を行った。

研究成果の概要（英文）：Hybrid manipulator which is composed of a translational parallel mechanism and a pure-rotational parallel mechanism has been proposed. Methods for mechanism design and kinematic calibration of such hybrid manipulator have been investigated for achieving precise motion within a large workspace.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：機構学，ロボット工学，パラレルメカニズム，ハイブリッドマニピュレータ，機構総合，キャリブレーション

1. 研究開始当初の背景

本研究で提案するハイブリッドマニピュレータは、空間3軸方向の並進運動を主たる出力運動とする並進機構と空間3軸まわりの回転運動を主たる出力運動とする回転機構より構成される。並進機構と回転機構によって6自由度マニピュレータを構成すること自体はオーソドックスな考え方であるが、

各要素機構をパラレルメカニズムで実現した例はほとんど無い。3軸方向の並進/回転運動を実現させる機構の構造を明らかにすることに関する研究は多く行われていたが、その先の応用ならびに作業領域拡大のための基礎研究があまり行われていなかった。

また、研究代表者らのこれまでの研究により、要素機構（具体的には3自由度並進機構

および回転機構)において生じる, 主入力では制御できない出力誤差(補償不能誤差成分)を最小化するための機構設計法が開発された。しかし, 試作実験を行った結果, 高精度運動を実現するためにはこの機構設計法をベースとし, さらに機構構造に工夫を加えるとともに装置の製作後に補償不能誤差成分を補償することが必要であるが, 高精度運動実現のために補償入力を設置した並進機構および回転機構は提案されていなかった。

要素機構の高精度化のためには, 補償不能誤差成分に対する誤差鈍感化設計と, 剛性に着目した機構および各リンク・軸受部の設計が重要であることが知られていた。前者は研究代表者らによる研究があり, 後者については6自由度空間機構について多くの研究例があるが本研究対象のように3自由度の空間パラレルメカニズムにおいては各リンク・軸受に作用する負荷が複雑であるため, 機構設計に寄与できる統一的な手法開発が望まれていた。

さらに, 6自由度空間機構を対象としたキャリブレーション法は多く提案されかつ実績もあるが, 広い作業領域を対象とした場合にはまだ十分な成果が得られていなかった。そして, 本研究における要素機構のように補償不能誤差成分を有する機構についてはこの誤差成分の統一的な取り扱い方法が明らかでなかった。

2. 研究の目的

本研究では, ハイブリッドマニピュレータを構成する各要素機構の各主入力では補償できない誤差成分(補償不能誤差成分)に着目し, 各要素機構に各主入力とは独立の補償入力を追加して各要素機構単体で上記の補償不能誤差成分を補償することを基本的な考え方とするハイブリッドマニピュレータの構成法を提案し(図1および表1), 大作業領域と高精度運動を同時実現するハイブリッドマニピュレータの機構設計法とキャリブレーション法を提案することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は, A. 要素機構の構造の総合, B. 要素機構の高精度運動実現のための誤差・剛性に基づく機構設計, C. 誤差補償およびキャリブレーション法に分けて, 理論の構築および実験検証を行った。

まず, A. 要素機構の構造の総合については, 並進機構と回転機構それぞれについては, 表1の基本方針に従った機構構造を明らかにした。ハイブリッドマニピュレータの適用対象として, 切削加工機を想定し, 並進機構については3自由度機構, 回転機構については2自由度機構を総合対象とした。

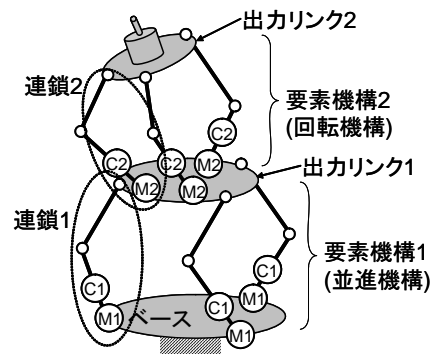
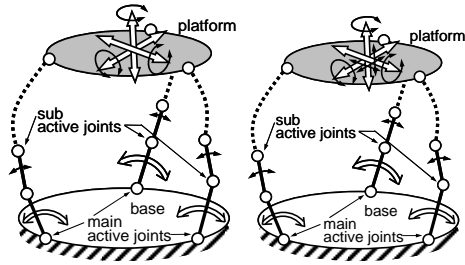


図1 ハイブリッドマニピュレータの構成
表1 ハイブリッドマニピュレータの各要素機構の構造と機能

	要素機構1 (並進機構)	要素機構2 (回転機構)
構造と機能	<ul style="list-style-type: none"> ・ベース, 出力リンク1, 3本の同一構造の連鎖1よりなる. ・ベース上の能動入力M1(主入力1)により, 出力リンク1の並進運動(主出力運動1)を創成する. ・M1とは独立の能動入力C1(補償入力1)により, 要素機構1の製作誤差等によって生じる出力リンク1の姿勢誤差を補償する. 	<ul style="list-style-type: none"> ・出力リンク1(ベース), 出力リンク2, 同一構造の連鎖2よりなる. ・出力リンク1(要素機構2のベース)に置かれた能動入力M2(主入力2)により, 出力リンク2の出力リンク1に対する回転運動(主出力運動2)を創成する. ・M2とは独立の能動入力C2(補償入力2)により, 要素機構2の製作誤差等によって生じる出力リンク2の出力リンク1に対する位置誤差を補償する.

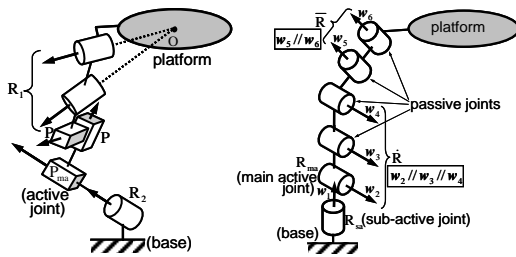
次に, B. 要素機構の高精度運動実現のための誤差・剛性に基づく機構設計については, Aで構造を明らかにした要素機構の中で, 実用的と考えられる機構を採用し, 補償入力による誤差補償特性を表す評価指標を提案し, 機構の各寸法の決定を行った。また, 仮想ねじ対偶を用いた剛性解析手法を提案し, 要素機構の剛性に基づく設計を行った。

さらに, C. 誤差補償およびキャリブレーション法については, 要素機構内の受動ジョイントに変位センサを搭載してこれに基づき誤差補償を行う手法, 機構の誤差モデルに基



(a) 完全分離形機構 (b) 部分分離形機構

図 2 並進機構の構造



(a) 完全分離形機構 (b) 部分分離形機構

図 3 総合された並進機構の構造の例

づき出力運動の誤差の測定値をもとに機構各部のパラメータの値を同定するキャリブレーション法とともに誤差の残差をデータベースとして直接補償する手法の開発を行った。

4. 研究成果

A. 要素機構の構造の総合

並進機構については、メインの出力運動が並進運動、サブの出力運動が補償用の回転運動である機構構造を明らかにするために、機構の構造の総合を行った。具体的には、3本の連結連鎖により構成される並進平行メカニズムおよび回転平行メカニズムの構造をベースとして、出力運動の並進成分と回転成分が完全に分離可能な完全分離形機構(図 2(a))、および並進成分については分離されているものの回転成分については従属的な並進成分が生じる部分分離形機構(図 2(b))を対象として、適用可能な具体的な機構構造を網羅的に明らかにした。その結果、完全分離形機構として 15 構造、部分分離形機構として 116 構造を得た。その一例を図 3 に示す。

次に回転機構については、2 軸まわりの回転運動を主たる出力運動とし、回転中心の位置誤差のうちこれらの回転軸に平行な方向の成分を補償することが可能な機構を対象として、出力リンクの運動を拘束するための拘束連鎖 1 本と回転運動創成用および位置誤

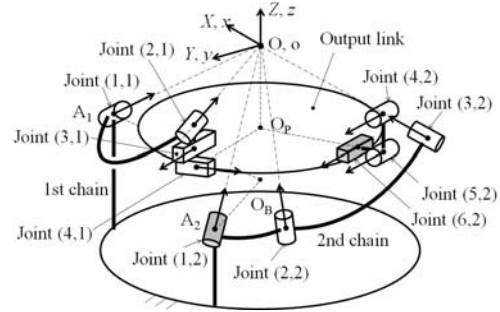


図 4 総合された回転機構の構造

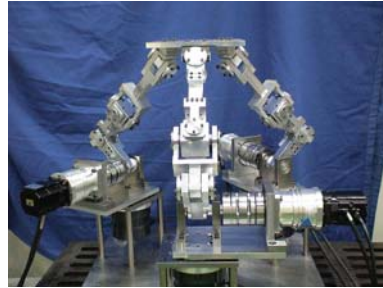


図 5 並進機構の試作機

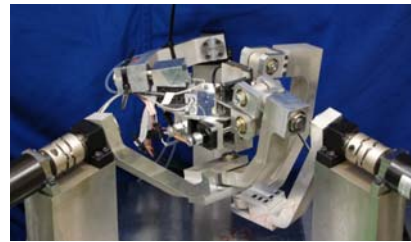


図 6 回転機構の試作機

差補償用の能動ジョイントをそれぞれ 1 つずつ有する駆動連鎖 2 本からなる機構の構造を明らかにした。得られた機構を図 4 に示す。なお、図には 1 つの駆動連鎖を示していない。灰色に塗ったのが能動ジョイントである。

B. 要素機構の高精度運動実現のための誤差・剛性に基づく機構設計

A で得られた図 3 (b) の並進機構を対象として、次式で定義される実用作業領域の大きさ NVI 、姿勢補償指数 OAC 、運動従属指数 CI を用いて、機構寸法の最適化を行った。

$$NVI = V / 2\pi L^3 / 3$$

OAC : 次式の行列 B_{PD} の最大特異値

$$\Delta\theta = B_{PD}\Delta q_s$$

CI : 次式の行列 $C_{PD} B_{PD}^{-1}$ の最大特異値

$$\Delta p = C_{PD}\Delta q_s = C_{PD}B_{PD}^{-1}\Delta\theta$$

なお、 L : 代表長さ $L = d_1 + \sum a_{i,i+1}$ 、 V : 実用作業領域の体積、 Δq_s : サブ能動対偶の微小入力変位、 Δp : 出力リンクの並進変位量、 $\Delta\theta$: 出力リンク姿勢の微小角変位である。

その結果をもとに、機構設計を行い、装置

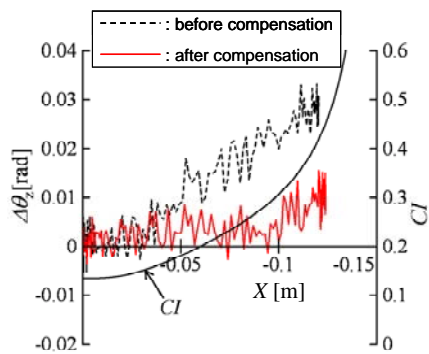


図7 補償制御の結果(並進機構)

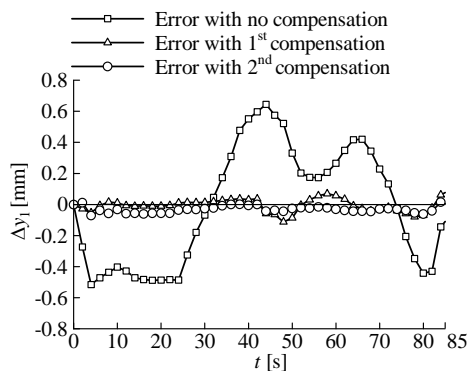


図8 補償制御の結果(回転機構の回転中心の1方向の位置誤差, 傾斜角が60°の場合)

を試作した. その写真を図5に示す.

回転機構については, 並進機構と同様に, 実用作業領域の大きさおよび誤差補償特性を考慮して機構寸法の最適化を行った. さらに, スクリュー理論および仮想ねじ対偶に基づく剛性解析法を適用して, リンク各部の剛性設計を行った. その結果をもとに設計, 試作した装置の写真を図6に示す.

C. 誤差補償およびキャリブレーション法

図5の並進機構の試作機について, 誤差モデルを構築して機構キャリブレーションを行うとともに, 誤差の残差を実測して補償制御を行い, 出力リンクの姿勢を一定に保って直線運動を行う制御を行った. その結果を図7に示す. 同図のように, 本研究で開発した補償入力を有する並進機構により, 出力リンクの姿勢誤差を小さく保ったまま並進運動を実現することができた. さらに, 試作機をペグインホール作業に適用し, 位置決め誤差, 軸と穴のすきま, 許容接触力を考慮したインピーダンス制御系の設計を行って実験的検討を行ったところ, 所定の範囲の位置誤差に対しては所期の接触力範囲で作業が実現できることが確認された.

図6の回転機構の試作機については, 拘束連鎖の直進対偶部に変位センサを組み込み, 補償用アクチュエータを固定した状態で回転運動を行わせたときの直進対偶変位を出力誤差とみなして, これをデータベースとして補償制御を行った. その結果を図8に示す. 同図に示すように, 提案した回転機構により, 出力リンクの回転中心の位置を高精度に保持して大きな姿勢変化を実現することができた.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- (1) 岡村潤, 花ヶ崎秀太, 武田行生, 出力の回転中心を直接支持する要素を持たない高精度2自由度回転平行メカニズムの総合, 日本機械学会論文集C編, 77巻, 2011, 2537-2552.
- (2) 田邊雅隆, 武田行生, 姿勢補償性を有する並進平行マニピュレータ, 日本機械学会論文集C編, 76巻, 2010, 727-733.
- (3) Masataka Tanabe and Yukio Takeda, Kinematic Design of a Translational Parallel Manipulator with Fine Adjustment of Platform Orientation, *Advances in Mechanical Engineering*, 2010, Article ID: 485358.

[学会発表] (計7件)

- (1) J.Okamura, S. Hanagasaki and Y. Takeda, Kinematic Synthesis of Two-DOF Rotational Parallel Mechanism With Compensation for Position Error, Proc. 2nd IFToMM International Symposium on Robotics and Mechatronics, 2011.11.4
- (2) 岡村潤, 武田行生, 出力の回転中心を直接支持する要素を持たない高精度2自由度回転平行メカニズムの開発, 日本機械学会2011年度年次大会講演論文集, 2011. 9.13
- (3) 岡村潤, 武田行生, 仮想ねじ対偶を用いた平行機構の剛性解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'11講演論文集, 2011. 5.28
- (4) 岡村潤, 花ヶ崎秀太, 武田行生, 出力の回転中心を直接支持する要素を持たない高精度2自由度回転平行メカニズムの総合, 第16回ロボティクス・シンポジウム講演論文集, 2011. 3.14
- (5) 岡村潤, 花ヶ崎秀太, 武田行生, 誤差の検出・補償機能を有する2自由度回転平行メカニズムの総合, 日本IFTToMM会議シンポジウム(第16回)予稿集, 2010. 11.6
- (6) 小俣正輝, 武田行生, ユンホーツォイ,

インピーダンス制御系を用いた位置・姿勢分離形パラレルマニピュレータによるペグインホール作業実験, 日本機械学会第10回機素潤滑設計部門講演会講演論文集, 2010. 4.20

- (7) G. Carbone, Y. Takeda, M. Ceccarelli and S.Huda, Error and Stiffness Analysis of 3-URU Pure Rotational Parallel Mechanism, Proc. 1st International Symposium on Robotics and Mechatronics, 2009.9.22

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.titech.ac.jp/~msd/>

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