

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05918

研究課題名 (和文) 運動学的冗長性と駆動冗長性を合わせ持つ2アーム6自由度パラレルロボットの開発

研究課題名 (英文) Development of two limbs six-dof parallel robot with kinematic and actuation redundancies

研究代表者

原田 孝 (Harada, Takashi)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：80434851

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要 (和文) : 運動学的冗長性と駆動冗長性を有する新しい2アーム6自由度8アクチュエータ駆動であるフルパラレルロボットを開発した。機構解析に基づいた設計試作と、冗長性を利用した制御方法を確立し、数値解析と試作機によりその有効性を検証した。駆動冗長性を有する第1サブシステムと運動学的冗長性を有する第2サブシステムに分ける機構解析を行った。第1サブシステムでは機構内力によりロボット対偶部のガタを取り除き機構剛性を大きくし、第2サブシステムでは衝突回避や特異姿勢回避などにより動作領域を拡張する。研究遂行中の新たな知見として、新形状の差動ネジ駆動システムおよび差動ベルト駆動パラレルロボットを提案した。

研究成果の概要 (英文) : A novel two-limb six-degrees-of-freedom (dof) parallel robot redundantly driven by eight actuators is proposed. The mechanism of the robot has a two-layer structure in which the eight-dof actuators control the six-dof hand via the seven-dof internal mechanism. The first part of the hierarchy from the eight-dof actuators to the seven-dof internal mechanism has actuation redundancy, and the second part of the hierarchy from the seven-dof internal mechanism to the six-dof hand has kinematic redundancy. The kinematic redundancy contributes to singularity avoidance, while the actuation redundancy contributes to backlash removal by acting on the internal forces of the mechanism. The validity was verified by numerical calculations and the prototyping. A novel differential screw drive systems and differential belt drive systems are also developed as related researches of this project.

研究分野：ロボット機構学

キーワード：知能機械 パラレルメカニズム 冗長ロボット 機構解析 機械設計 最適化

1. 研究開始当初の背景

パラレルロボットは機械的干渉や複雑に存在する特異姿勢が動作の妨げとなり、動作範囲が小さい6自由度機構や、組立用として自由度を3~4に限定したロボットが市販されているのみであり、動作範囲が広い6自由度パラレルロボットは実用化されていない。

2. 研究の目的

本研究は、筆者らがこれまでに取組んできた冗長駆動パラレルロボットの研究と新たに着手している2アーム4自由度パラレルロボットの研究を発展させて、ハンドの旋回と回転角度が大きい6自由度パラレルロボットを開発することが目的である。

本研究は、世界的に例のない運動学的冗長性と駆動冗長性を合わせ持つ新しいパラレルメカニズムの研究分野を開拓するものとして学術的な意義が大きい。本研究はこれまでのパラレルロボットが不得意としていたハンドの旋回と回転角度が格段に大きい汎用メカニズムを開発するものであり、その実用先は高速組立てロボットや力覚提示デバイスなど多岐にわたり波及効果大きい。

3. 研究の方法

(1) パラレルロボットの機構解析と制御方法の開発：ロボットの位置・速度・力に関する特性を明らかにし、冗長性を利用した制御方法を考案する。

(2) ロボットの設計と試作：機構解析に基づきロボットの設計と試作を行う。小型汎用ロボット相当の並進300mm、旋回角±90度、回転角360度以上の動作範囲を試作目標とする。

(3) ロボットの動作評価：試作した2アーム6自由度パラレルロボットの位置精度と力精度の動作評価を行う。

4. 研究成果

(1) パラレルロボットの機構解析と制御方法の開発

図1に示す本研究のパラレルロボットは、6自由度運動を行う手先部を8個のアクチュエータにて冗長駆動する。8個のアクチュエータで7自由度ロボットを駆動する駆動冗長性を有する第1サブシステムと、7自由度ロボットで6自由度ハンドを駆動する運動学的冗長性を有する第2サブシステムに分けて機構解析を行った。パラレルロボットのアクチュエータ位置と手先の位置姿勢の変位関係を与えるベクトルループ方程式と、その方程式の解である順逆運動学解を導出した。ベクトルループ方程式の微分関係を式変形しパラレルロボットのヤコビ行列を導出した。8個のアクチュエータで7自由度ロボットを駆動する第1サブシステムでは、駆動冗長性により機構内力を発生させる。機構内力によりロボット対偶部のガタを取り除き機構剛性を大きくすることができる。ヤコビ行列の零空間を数式的に導出し、目標とする機構内力

を与えるアクチュエータの推力を求めることが出来るようになった。

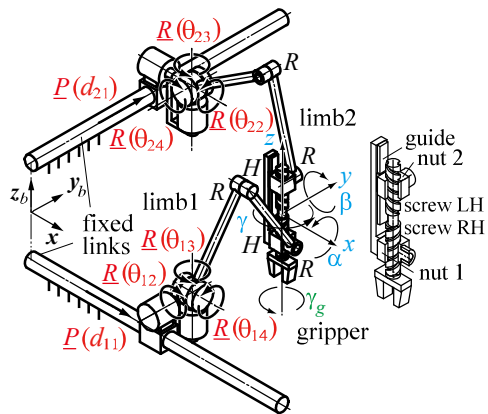


図1 6自由度パラレルロボット

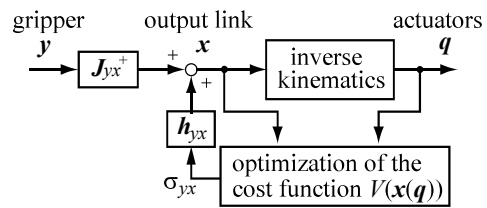
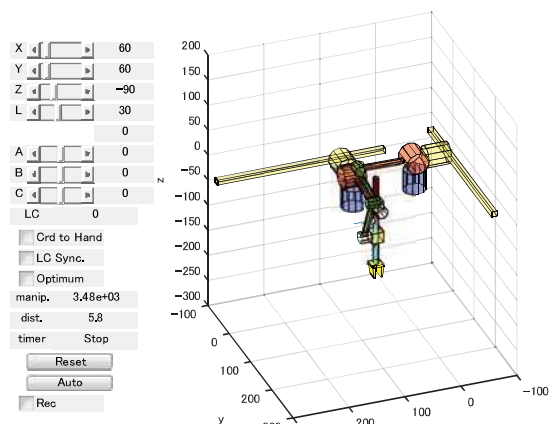
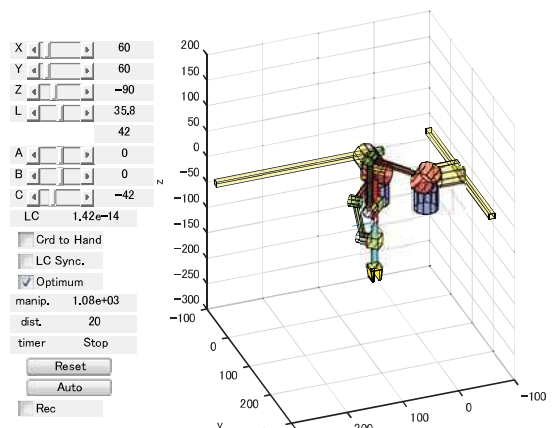


図2 6制御アルゴリズム



(a) 衝突回避前：アーム間距離 5.8mm



(b) 衝突回避後：アーム間距離 20mm

図3 アーム間干渉回避制御

7自由度ロボットで6自由度ハンドを駆動する第2サブシステムでは、運動学的冗長性により特異姿勢回避や干渉回避を行う。ロボットの特異性の指標である可操作度とアーム間の最短距離を評価関数とする最適化計算により、ハンドの位置姿勢を固定して、7自由度ロボットの特異姿勢回避とアーム干渉回避を同時に実現する図2の制御アルゴリズムを確立した。数値計算および数式計算ソフトウェアを作成し、各アルゴリズムの正当性を確認した。図3に運動学的冗長性を利用して、ハンドの位置と姿勢を固定してもアームの姿勢を変化させてアーム間の干渉回避を行う様子を示す。

## (2) ロボットの設計と試作

先ず、本ロボットにおいて特徴的な差動ネジ組込み出力節の設計試作を行った。図4に3D CADを用いた設計と試作した出力節を示す。

機構解析に関する研究結果に基づいて、図5に示す2アーム6自由度平行ロボットの構想設計および詳細設計を実施した。本研究の平行ロボットは駆動冗長性を有するために推力およびトルク制御を行う必要がある。そこで、国内外のアクチュエータを調査し、仕様を満たすリニアモータおよびダイレクトドライブモータを選定すると共に、8軸制御用としてLabViewを用いた制御装置を設計した。

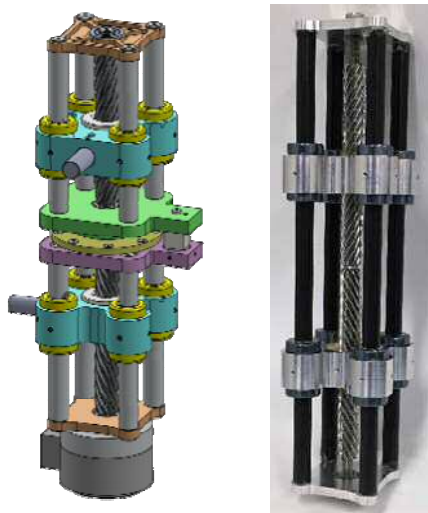


図4 差動ネジ組込み出力節



図5 平行ロボットの設計

## (3) ロボットの動作評価

運動学的冗長性と駆動冗長性を利用したロボットの特異性(可操作性)や機構内力を変化させた時のロボットの位置決め精度や力制御性能の影響を明らかにすることを目的として、本ロボットで特徴的な機構である差動ネジ組込み可動部に対して、運動学的冗長性を利用した内力付加の影響を測定する歪ゲージ式の内力センサを開発して組込んだ。マルチボディダイナミクスを用いた差動ネジ機構の動力学解析方法を提案した。

以上の研究成果に基づき、並進300mm、旋回角度 $\pm 90$ 度、回転角度360度以上を実現するロボットの設計を完了させた。一部の機械部品の調達に時間を要したために、最終的な動作検証の一部は課題として残されたが、研究全体の当初目標である新しい平行ロボットの(1)機構解析と制御方法の確立、(2)実機の設計試作、および(3)動作評価の凡そを完成させることが出来た。

[当初予定に対する新たな知見]

### (1) 新形状差動ネジの開発

ナットの並進運動をネジの回転に伝達するためには、ネジの摩擦角を超える長リードネジが必要となる。ロボットの小型軽量化のためにはネジの小径化が有効であるが、ナット並進駆動に適した小径長リードネジは市販されていない。そこで、図6に示すような軸直角断面が正方形の新しいネジ形状を応用した差動ネジ機構を提案した。図6右に示す等リード・逆ねじれ方向ネジのオーバーラップネジは、スペインの建築家ガウディが、サグラダファミリアの柱やグエル公園の十字架塔などに使用している二重らせん構造と類似の形状であり、これをガウディネジと命名した。ガウディネジの幾何学や、差動駆動の運動学や動力学を明らかにし、5軸加工機を用いたガウディネジの試作や、3Dプリンタを用いたナットの試作を行った。

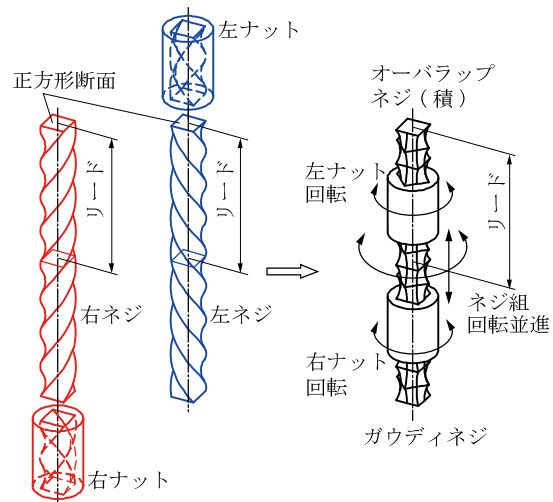


図6 新形状差動ネジ(ガウディネジ)



8mm□, リード 50mm  
 ガウディネジ (アルミ): 切削  
 ナット (樹脂): 3Dプリンタ

図7 ガウディネジとナットの試作

(2) 差動ネジ対偶と差動ベルト駆動を用いた XYZ $\theta$  パラレルロボットの提案

工業用のハンドリングでは、デルタロボット称される 3 自由度 (XYZ) 並進+1 自由度回転 ( $\theta$ ) パラレルロボットが用いられている. 本研究の 6 自由度パラレルロボットに対して, アームの代わりに差動ベルト機構を用いた 4 自由度パラレルロボットを提案し, 設計試作を行った. 差動ベルト機構を用いて図 8 に示す差動ネジを回転・並進させて, 4 自由度動作を実現する.

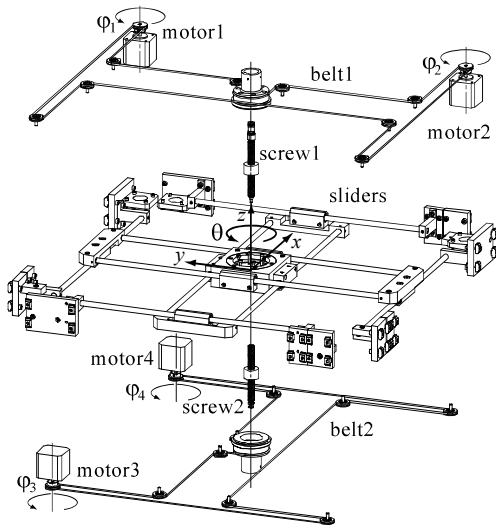


図8 XYZ $\theta$  パラレルロボット

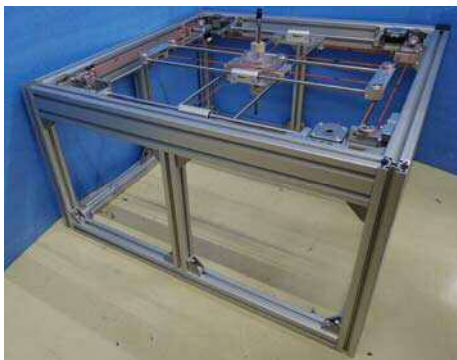


図9 XYZ $\theta$  パラレルロボット試作機

## 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 8 件)

① Harada, T. and Angeles, J., From the McGill Pepper-Mill Carrier to the Kindai Atarigi Carrier, A novel two limbs six-dof parallel robot with kinematic and actuation redundancy, Proc. IEEE ROBOT, 2017, 査読有, pp.1328-1333, DOI: 10.1109/ROBOT.2017.8324696

② Fujii, K. and Harada, T., Geometry of Gaudi-inspired Screw and Nut for Differential Drive Mechanism, Proc. IEEE ROBOT, 2017, 査読有, pp.1900-1905, DOI: 10.1109/ROBOT.2017.8324601

③ Harada, T., Enlargement of the Translational and Rotational Workspace of Parallel Robots, Proc. ICCMA, 2017, 査読有, pp.18-22 DOI: 10.1145/3149827.3149848

④ 原田 孝, パラレルロボットの動作範囲の拡張, 機械の研究, 査読有, 69(3), 2017, pp.203-211 [http://www.yokendo.com/julbook/kikai/k\\_69\\_3.htm](http://www.yokendo.com/julbook/kikai/k_69_3.htm)

⑤ Harada, T. and Fujii, K., Geometry of Gaudi-inspired screw for differential drive mechanism, Proc. ICCMA, 2016, 査読有, pp. 104-106, DOI: 10.1145/3029610.3029634

⑥ Makino, T., and Harada, T., Cable collision avoidance of a pulley embedded cable-driven parallel robot by kinematic redundancy, Proc. ICCMA, 2016, 査読有, pp.117-120, DOI: 10.1145/3029610.3029620

⑦ Harada, T., Mode Changes of a Planar 3 DOF Redundantly Actuated Parallel Robot, Int. J. of Materials, Mechanics and Manufacturing, 査読有, 4(2), 2016, pp.123-126 DOI: 10.7763/IJMMM.2016.V4.238

⑧ Harada, T., Mode changes of redundantly actuated asymmetric parallel mechanism, Journal of Mechanical Engineering Science, 査読有, 230(3), 2015, pp.454-462, DOI: 10.1177/0954406215588479

[学会発表] (計 9 件)

① Harada, T., Enlargement of the Translational and Rotational Workspace of

Parallel Robots, ICCMA2017, 2017年10月,  
Edmonton, Canada

② 原田孝, 中村悠人, 藤井賢吾, 差動ネジ  
駆動機構の力学的な分類と統合, 日本機械  
学会 2017年度年次大会, 2017年9月, 埼玉市

③ 藤井賢吾, 原田孝, Gaudi-inspired 差動  
ネジ駆動機構の研究, 日本機械学会  
ROBOMECH 2017, 2017年5月, 郡山市

④ 原田孝, 運動学的冗長性と駆動冗長性を  
有するパラレルロボットの冗長性を利用し  
たモーションコントロール, 日本機械学会  
ROBOMECH 2017, 2017年5月, 郡山市

⑤ 牧野 達, 原田孝, 運動学的冗長性を用  
いたケーブル駆動パラレルロボットのケー  
ブル姿勢制御方法, 日本機械学会 2016 年度  
年次大会, 2016年9月, 福岡市

⑥ 原田孝, 牧野 達, 差動ネジ対偶と差動  
ベルト駆動を用いたXYZ $\theta$ パラレルロボットの  
提案, 日本機械学会 ROBOMECH 2016, 2016  
年6月, 横浜市

⑦ Harada, T. and Makino, T., Design of a  
Novel 6 dof Parallel Robot for Haptic  
Device, 12th International Conference on  
Ubiquitous Healthcare, 2015年11月, 東大  
阪市

⑧ 原田孝, 牧野 達, 運動学的冗長性と駆  
動冗長性を合わせ持つ6自由度パラレルメカ  
ニズムの運動学, 日本機械学会 2015年度年次  
大会, 2015年9月, 札幌市

⑨ 原田孝, 運動学的冗長性と駆動冗長性  
を合わせ持つ2アーム6自由度パラレルロボ  
ットの提案, 日本機械学会 ROBOMECH 2015,  
2015年5月, 京都市

[図書] (計2件)

① Harada, T., IntechOpen, Kinematics  
(chapter 5: How to Expand the Workspace of  
Parallel Robots), 2017, 95-111

② 稲田 重男, 森田 鈞, 長瀬 亮, 原田孝,  
オーム社, 大学課程 機構学, 2016, 224

[その他]

ホームページ

<https://sites.google.com/site/parallelmec/ja/research>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

原田 孝 (Harada Takashi)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号: 80434851