

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：54701

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14705

研究課題名（和文）冗長マニピュレータ有する冗長性の動学的利用のための動力学特性の解明

研究課題名（英文）Elucidation of dynamic properties for utilization of kinetics with kinematic redundant manipulators

研究代表者

岡部 弘佑（Okabe, Kousuke）

和歌山工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号：40758132

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、通常のロボットアームより関節の数を余剰に有する冗長マニピュレータを対象とし、アームの動作速度による関節のトルク制限内で出力可能な手先の加速度特性およびトルク制限内で出力可能な手先の力/モーメント特性への影響を明らかにした。  
また明らかになった力学特性のうち、アームの手先位置を変えずに肘の位置を変えることのできる内部運動に関する力学特性を利用することで、アームが作業中により手先に未知の力が加わる条件下でもセンサレスで人やモノとの衝突を検出できるセンサレス衝突検出手法を新たに提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

関節駆動トルク制限内で出力可能な手先操作力を表す操作力多面体は、評価指標としてアームの設計や動作計画に一般的に用いられている。そのため、アームの動作速度や動作加速度による操作力多面体への影響を解明した本研究成果の学術的意義は高い。

また近年は80W規制の緩和によりヒトと同じ空間で働く協働ロボットが広く普及し始めており、ヒトの安全性確保のために安全対策の重要性が高まっている。本研究成果である衝突検出手法は冗長性を用いることで、手先への力を許容しつつ衝突検出が可能で、特別なセンサや動力学パラメータを必要とせず、簡易な計算式であるため処理も早い社会的意義の高い成果となっている。

研究成果の概要（英文）：This research project focuses on a redundant manipulator that has an additional number of joints compared to a normal robot arm. As a result of this research, the effects of the speed of arm movement on the acceleration characteristics of the hand tip and the force/moment characteristics of the hand tip that can be output within the torque limit have been clarified.

By utilizing the kinetic characteristics of the internal motion that enables the arm to change the position of the elbow without changing the position of the hand tip, we proposed a new sensorless collision detection method that can detect collisions with people or objects without sensors even under conditions where the arm is working and unknown forces are applied to the tip of the hand.

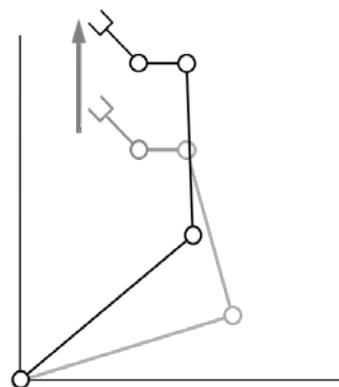
研究分野：ロボット工学

キーワード：マニピュレータ 運動学的冗長性 力学特性

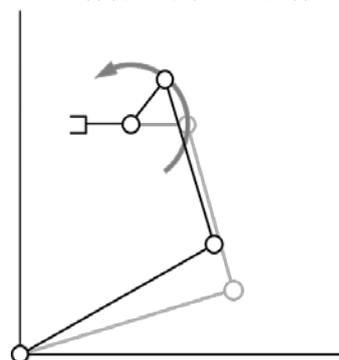
1. 研究開始当初の背景

マニピュレータとは対象物を操作するために手先の位置や姿勢を変化させるロボットアームのことで、特に冗長マニピュレータとは Fig.1 のように作業空間の次元に対して余剰な関節自由度を有するマニピュレータのことである。このような運動学的冗長自由度を有するマニピュレータは Fig.1(a)のように作業空間上の任意の位置・姿勢に手先を持って行けるだけでなく、Fig.1(b)のように作業空間とは独立した内部運動を行うことができる。そのため冗長マニピュレータはこの内部運動を利用することで、手先の作業とは独立したサブタスクを実行可能である[1]。このサブタスク実行能力の利用方法の一つとしてアームの障害物回避を用いて回り込み作業というのがある[2][3]。産業界ではこの回り込み作業を行うことでより入り組んだ場所での作業が可能となるため、安川電機や FANUC では冗長自由度 1 を有する 7 関節マニピュレータが製造・販売されている。このように冗長マニピュレータが産業界でも採用されるほど普及しているにもかかわらず、冗長性（サブタスク実行能力）の利用方法は回り込み作業などの冗長性の運動学的利用が主である。冗長性の力学的利用法は研究レベルに留まっており実用化には至っていない。

冗長性の利用を考えた場合、マニピュレータの特性を作業空間とその零空間（冗長性による内部運動空間）上の変数を用いて示す方が、関節空間上の変数を用いて示すより手先とは独立した動作が分かりやすいため都合が良い。しかし作業空間とその零空間上の変数を用いてマニピュレータの特性を示すには“姿勢変数の一般化”という大きな問題が存在する。姿勢変数とは作業空間とは独立した内部運動を表すアームの姿勢のことで、平面 3 関節マニピュレータでは手先の向いている方向、空間 7 関節マニピュレータでは肩・肘・手先によって張られる平面の鉛直平面からの角度など、通常この変数はアームの形状によって異なる値が用いられており、一般のマニピュレータに適用可能な姿勢変数は未だ提案されていない。冗長性の運動学的利用法ではこの問題を、関節角度のみで計算できるヤコビ行列の疑似逆行列を用いてサブタスクを作業空間の零空間に射影し、作業空間上の速度と線形結合する制御系を構築することで回避している[4]。同様に姿勢変数の問題を回避した冗長性の力学的利用を考えた場合、“動力学方程式の導出”と“冗長マニピュレータの特性指標の表示手法確立”という 2 つの課題が存在する。



(a) 作業空間上の動作



(b) 冗長性による内部運動

Fig.1 マニピュレータの内部運動

i. 動力学方程式の導出に関する課題

マニピュレータの動力学方程式は一般的にラグランジュ法を用いて導出するが、ラグランジュ法ではラグランジュ関数を一般化座標系で偏微分することで導出される。通常は一般化座標系を関節座標系として導出するが、冗長性による運動を明確にするためには作業空間上の変数と姿勢変数で偏微分しなければならない。導出した結果は一般化したマニピュレータには適用できない式となる。そのため姿勢変数の使用を回避するために通常動力学方程式からヤコビ行列の疑似逆行列等を用いて導出する必要がある。

ii. 動力学特性指標の表示手法の確立に関する課題

マニピュレータの動力学特性を示す手法としては出力の出しやすい方向を楕円体で表示する動的可操作性楕円[5]や駆動トルク制限内で出力可能な加速度ベクトルの集合を表す動的可操作性多面体[6]が知られている。これらの指標は作業空間上に楕円体や多面体を表示することで特性を示しているが、冗長マニピュレータの場合作業空間より高次元な楕円体や多面体を表示する必要がある。またこれらの楕円体や多面体は関節速度に応じて並進することが報告されており[7]、内部運動よりこれらの指標が受ける影響についても明確化する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究課題の目的は「運動学的冗長マニピュレータの有する冗長性の力学的利用のための力学特性の導出とその検証」である。

上述したように冗長性の動力学的利用には、関節空間ではなく作業空間とその零空間（これらの空間を合わせて拡張作業空間と呼ばれる）上の変数を用いて動力学方程式等の動力学特性を表した方が、冗長性による動作を明確に示せるため有利である。作業空間上の速度  $\dot{\mathbf{r}}$  と関節空間上の速度  $\dot{\mathbf{q}}$  はヤコビ行列の疑似逆行列  $\mathbf{J}^+$  を用いて  $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^+ \dot{\mathbf{r}}$  と表されるが、申請者は冗長性による動作を数学的に明確にするために、Fig.2 のように関節速度空間をグラスマン代数のウェッジ積を用いて定義 ( $\mathbf{e}_1 \wedge \mathbf{e}_2 \wedge \mathbf{e}_3$ ) し、関節速度空間をヤコビ行列の疑似逆行列によって張られる空間 ( $\mathbf{J}_1^+ \wedge \mathbf{J}_2^+$ ) で縮約することで、速度次元における冗長性による動作の基底ベクトル  $\mathbf{u}$  を数学的に導出した。この冗長速度の基底ベクトル  $\mathbf{u}$  を用いることで、上に課題 i. として述べた拡張作業空間上の変数を用いた動力学方程式の導出し、この基底ベクトルを用いることで動的可操作性多面体が拡張作業空間上の速度変数に応じて並進することを数学的に示すことに成功している[5]。申請者が提案した速度・加速度次元において作業空間と直交した零空間の基底ベクトルを数学的に導出する手法は独自性が高く評価されており、2019 年に日本ロボット学会よりロボティクスシンポジウム研究奨励賞を受賞した。しかし申請者の手法は縮約により基底ベクトルを求めており冗長自由度 1 に限定した手法であり、冗長自由度が 2 以上の場合には縮約により得られる式はベクトルではなく空間を表す。そのため基底ベクトルが得られず、空間を表す式から基底ベクトルを導出するといった、冗長自由度 2 以上の一般化した冗長マニピュレータへの適用といった課題が残っている。またこの手法は数学的に導出されシミュレーションにより検証が行われているが、実機実験による検証は行われておらず実機検証という課題が残っている。

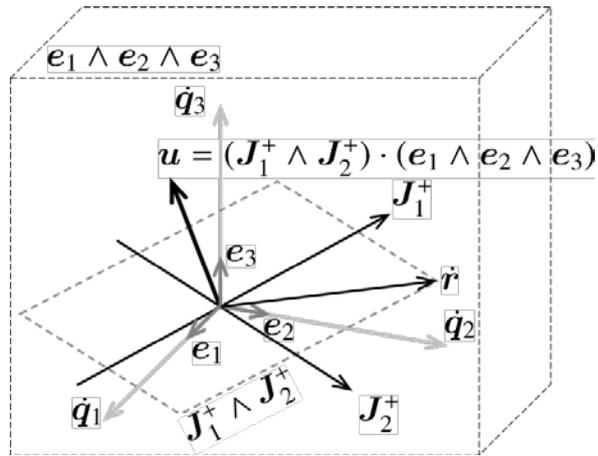


Fig. 2 冗長性による内部動作の基底ベクトル

## 3. 研究の方法

本申請課題では冗長マニピュレータの動力学特性を次のように明らかにする。

- i. 拡張作業空間上の変数を用いた動力学方程式の実機検証
 

本研究室で保有している平面 3 関節マニピュレータはハーモニックドライブが組み込まれているため、動力学特性の検証には不向きである。そのため研究設備費として計上したモータ出力軸にトルクセンサが組み込まれたサーボモータを、平面 3 関節マニピュレータに組み込むことで動力学特性を計測可能なシステム構成とし、申請者が解明した動的可操作性多面体の並進現象を実機実験により検証することで、拡張作業空間上の変数を用いた動力学方程式の正当性を明らかにする。
- ii. 冗長自由度 2 以上のマニピュレータへの基底ベクトル導出手法の拡張
 

冗長自由度が 2 以上である場合、縮約により求められる零空間の基底ベクトルは空間の足し算として導出される。そのためグラスマン代数の公式を用いて空間の足し算から基底ベクトルを導出することで一般化した冗長マニピュレータについて作業空間の零空間の基底ベクトルを数学的に明らかにする。
- iii. 拡張した動力学方程式の実機検証
 

冗長自由度 2 以上に拡張した基底ベクトルを用いて動力学方程式を導出し、A. と同様に動的可操作性多面体の並進現象を実機実験による検証を行うことで冗長自由度 2 以上の拡張作業空間上の変数を用いた動力学方程式の正当性を明らかにする。

#### 4. 研究成果

本研究課題では、冗長マニピュレータの動作速度に応じた操作力多面体の並進特性の解明と、冗長マニピュレータの冗長性を利用した新たなセンサレス衝突検出手法の大きく二つの成果が得られた。

##### i. 冗長マニピュレータの動作速度に応じた操作力多面体の並進特性の解明

操作力多面体とはマニピュレータの関節トルク制限内で出力可能な手先の操作力/モーメントの範囲を図的に表したもので、マニピュレータの静力学方程式より導出される。しかし研磨や操作などを効率的に行おうとアームの動作速度を高くすると動学的な影響が表れてくるが、この動学的影響が操作力多面体ではどのような形で現れるかは未解明であった。

本研究課題では、まず申請者が提案している冗長マニピュレータの内部運動速度をグラスマン代数を用いることで最小限の変数で表す手法を応用し、静力学方程式について冗長性による内部運動が静力学方程式に与える影響を定式化した。拡張した静力学方程式では Fig. 3 に示すように、マニピュレータの関節駆動トルクの空間において、手先での作業による力/モーメント  $f$  はヤコビ行列  $J^T$  によって切り抜かれる部分空間となる。この手先の作業による力やモーメントとは直交した方向  $u$  に冗長性による内部運動の基本動作ベクトルが来るため、この直交した方向の空間はマニピュレータの冗長性による内部運動を生じさせる力を表す空間となる。次に、このように解釈できる静力学方程式を動力学方程式に組み込むことで動力学特性が考慮された操作力多面体の式が得られる。このとき通常は式を簡単化するために無視される項について、テンソル代数という数学の手法を用いて細かく計算することで、操作力多面体に対する動学的な影響が明らかになった。本研究の成果として、手先や内部運動の速度ベクトルのテンソル積に比例し、また手先や内部運動の加速度ベクトルに比例して、Fig. 4 のように操作力  $f_i$  と内部運動を生じさせる力  $s$  からなる空間上で操作力多面体は平行移動することが明らかになった。

本研究成果はマニピュレータが作業する時の力加減に関わる力学特性を表しているため、マニピュレータの力加減を要する作業だけでなく、接触を伴う作業全体に対する重要な知見を表している。これはマニピュレータ自体の制御や、その前段階の動作計画に適用可能である。本申請課題進行中に爆発的な人工知能の性能向上が起き、多くの問題は人工知能を用いることで解決可能な時代となった。しかし、人工知能は意味も判らず学習した効率的な動作を行うため、不必要な計算を大量に行い実現している。産業界においては、より低コストでより高効率であることが求められるため、本研究により得られた知見は、これらを実現するうえで重要な特性となっている。

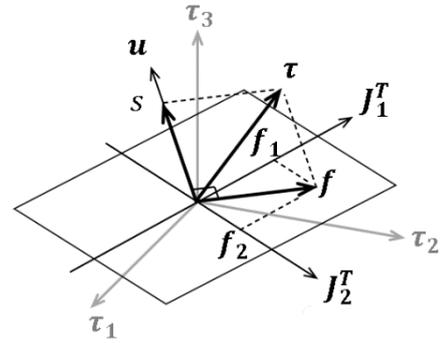
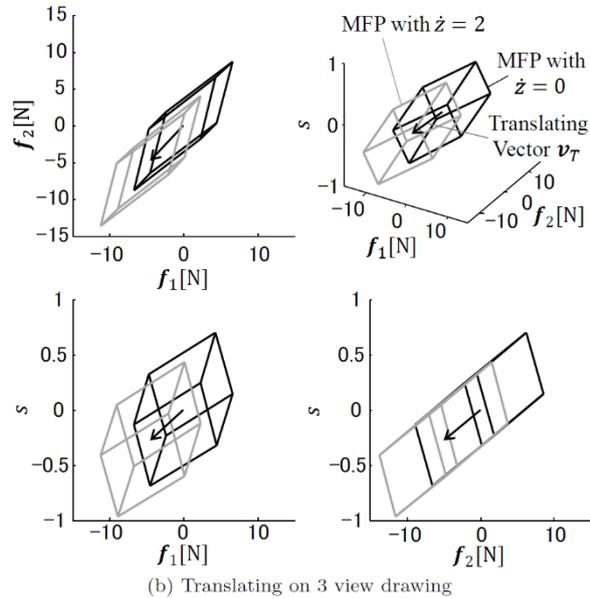


Fig. 3 内部運動を生じさせる力と手先の力/モーメントの関係



(b) Translating on 3 view drawing  
Fig. 3 操作力多面体の内部運動速度による並進

ii. 冗長マニピュレータの冗長性を利用した新たなセンサレス衝突検出手法

近年は産業用ロボットの 80W 規制の緩和により、安全対策を講じることで安全策などを設置する必要がなく、ヒトと同じ空間で作業を行う協働ロボットが普及してきており、安全対策の重要性が高まってきている。安全対策としてはヒトや環境と衝突しないよう動作を計画する Collision avoidance や、衝突後に以下にしてヒトの安全を確保するかの Collision process が存在する。特に Collision process では極短時間の間に、衝突検出して衝突部位判定、衝突内容分類、衝突後処理実行を行わなければならない。衝突検出や衝突部位判定では単純かつ確実な処理が求められる。

本研究課題では冗長マニピュレータの有する冗長性の力学的利用を目的としており、動力学特性の導出過程において得られた知見を応用した、冗長性による静力学特性を利用した新たなセンサレス衝突検出手法を提案している。まず、操作力多面体の並進特性解明時に導出した冗長性による内部運動の基本単位を用いて静力学方程式を拡張すると、内部運動を生じさせる力を定義することができる。この内部運動を生じさせる力は、マニピュレータが作業を行う時に加わる手先への力/モーメントとは独立した力として存在するため、通常の作業においては内部運動を生じさせる力はマニピュレータに加わることはない。では通常では加えられることのない内部運動を生じさせる力が加えられるのはどのような場合かという点、通常では起こらない手先以外への力が加えられたとき、つまりマニピュレータへの衝突が生じたときである。この内部運動を生じさせる力は、一般的なマニピュレータ動作時の関節駆動トルクから、マニピュレータの制御等に用いられるヤコビ行列を用いて算出できるため、特殊な制御や特別なセンサ、専用のパラメータ同定等が不要で、かつ簡単な計算式から求められるため高速な処理が可能である。加えて内部運動を生じさせる力を用いるため、力が加わった部位が作業時に力/モーメントの加わる手先か、それ以外かを判別する衝突部位判定も衝突検出と同時にされる。欠点としてマニピュレータに冗長性を必要とするが、マニピュレータが行う作業は手先の位置や姿勢が完全に決められていることは少なく、ツールの同軸方向に対して姿勢が任意であることが多いため、これを冗長性をみなすことで本手法を適用可能である。本手法の基本原理については、シミュレーションと実機検証によりその有効性が確認されている。

- [1] Y. NAKAMURA, H. HANAFUSA, and T. YOSHIKAWA, "Task-Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators", The Int. J. of Robotics Research, Vol.6, Iss.2, (1987), pp.3--15.
- [2] 吉川恒夫, "ロボット制御工学基礎論", コロナ社, pp.208-220
- [3] A. A. MACIEJEWSKI, and C. A. KLEIN, "Obstacle Avoidance for Kinematically Redundant Manipulators in Dynamically Varying Environments", The Int. J. of Robotics Research, Vol.4, No.3, (1985), pp.109--117.
- [4] H. Hanafusa, T. Yoshikawa, Y. Nakamura, "Analysis and Control of Articulated Robot Arms with Redundancy", IFAC Proceedings Vol.14, Iss.2, (1981), pp.1927--1932.
- [5] 岡部弘佑, "冗長マニピュレータの手先-冗長運動間干渉による動的可操作性多面体並進に関する詳細な解析", 第24回ロボティクスシンポジウム講演論文集, 富山, 日本, (2019), pp.185--188

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Okabe Kousuke	4. 巻 41
2. 論文標題 Translating Manipulating Force Polytope by Dynamics on Kinematical Redundant Manipulators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 303 ~ 308
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.41.303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okabe Kousuke	4. 巻 38
2. 論文標題 Kinematic redundancy: Kinetics for use with redundant manipulators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Open Access Government	6. 最初と最後の頁 288 ~ 289
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.56367/OAG-038-10675	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Okabe Kousuke	4. 巻 2022
2. 論文標題 Elucidation of kinetics for use with redundant manipulators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 15 ~ 17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21820/23987073.2022.1.15	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡部弘佑
2. 発表標題 手先作業中におけるアームの運動学的冗長性を利用したセンサレス衝突検出
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡部弘佑
2. 発表標題 ロボットアームの動力学特性による操作力多面体の並進
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡部弘佑
2. 発表標題 運動学的冗長マニピュレータの動的可操作性多面体並進に関する実機検証
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関