

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06256

研究課題名(和文) 制御目標値削減による多関節ロボットの操作物接触順応法の開発

研究課題名(英文) Development of an object contact adaptation method for multi-joint robots by reducing control variables

研究代表者

関本 昌紘 (SEKIMOTO, Masahiro)

富山大学・学術研究部工学系・講師

研究者番号：40454516

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ロボットアームのバルブ開閉動作で生じる、ねじピッチの不確かさ起因の過度な操作力に対し、転置ヤコビ行列に基づく作業変数フィードバック制御系が創出するアームの零空間動的遷移の活用を検討した。不確かさのある変数の制御をやめて幾何拘束にロボットの状態を委ねることで、操作中にバルブから受ける力でアーム姿勢が動的に遷移し、ねじ進行に順応する。本手法を組み込んだ7関節ロボットアームの実証実験において、手先力覚情報、ねじピッチ情報無しに、円動作のための二つの制御目標値により、ねじ進行を伴うバルブ操作が継続することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動作の一部が制約される対象物操作は、バルブ開閉のほか、ドアや引き出しの開閉、部品の組立など多岐にわたる。しかし、ロボットによる自動化では一般に高度な状態計測・力制御が求められ、導入は限定されている。本研究は不確かさが想定される部分を制御ではなく力学作用の活用により解決している点が独創的で、実験結果や動力学的観点からの作業の定式化の研究成果は、拘束対象物の操作技術の発展に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：To resolve the excessive manipulation force caused by the uncertainty of the screw pitch in the valve opening/closing motion of a robot arm, we investigated the utilization of dynamic transitions in null space created by a Jacobian-transpose based task variable feedback control system. By ceasing the control of uncertain variables and allowing the robot state to be guided by geometric constraints, the arm posture dynamically transitions with the force received from the valve during operation and adapts to the screw progression. Experiments with a 7-joint robot arm incorporating this method showed that valve operation involving screw progression continued with two control target values for circular motion without information on the tip force and screw pitch.

研究分野：ロボティクス

キーワード：マニピュレーション 接触作業 適応 作業座標制御 冗長自由度

1. 研究開始当初の背景

ロボットアームのバルブ開閉作業では、ねじピッチの不確かさや設置誤差により、過度な接触力が生じやすい。バルブは回転方向に動作するが、他の方向には幾何拘束される。そのうえ、バルブの回転に伴い軸方向にねじ進行する。ロボット制御において、ねじピッチの誤差は一周では僅かであるが、作業の継続で累積する。このような誤差によるアーム手先の目標値と実際の不一致が、バルブとの適切な接触を妨げる。

2015年に開催された災害救助ロボット競技世界大会 DARPA Robotics Challenge では、「安全弁の操作」が課題の一つに設定された。そのほか、ホームロボットのドアや引き出しの開閉、製造業でのロボット組立作業など、動作の一部が拘束される対象物の操作技術への期待は高い。バルブ操作時に生じる内力に対し、内力検出・制御系調整により対応されることが多いが、力学的に自然に解消するアプローチも考えられるとの着想に至った。

2. 研究の目的

バルブ操作時の位置誤差問題に対し、本研究は、ロボットアームの制御目標値の一部を削減し、零空間内のアーム姿勢(冗長自由度)の動的遷移を活用する解決法の確立を目的とした(図1)。ねじピッチの不確かさが想定される軸方向の位置制御を行わず、幾何拘束にロボットの状態を委ねることにより、接触部でのバルブとロボット手先の相互作用力がねじ進行に対して適応的に作用する。他の拘束でも同様の効果が得られることから、作業実現に必要な最小限の制御により、適切なバルブ操作が実現できると考えられる。この特徴を活用する制御法の定式化、7関節ロボットアームによる実証実験、閉ループダイナミクスの解軌道解析に基づいた提案手法を効果的に用いるための諸条件の調査を実施した。

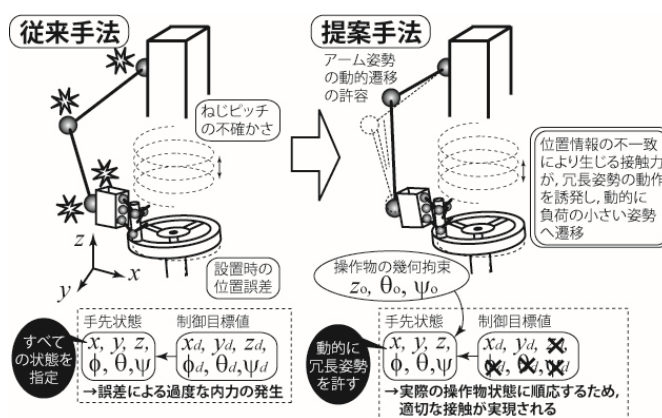


図1 制御目標値削減による操作物接触順応法

この特徴を活用する制御法の定式化、7関節ロボットアームによる実証実験、閉ループダイナミクスの解軌道解析に基づいた提案手法を効果的に用いるための諸条件の調査を実施した。

3. 研究の方法

(1) 動力学モデルに基づく制御法の定式化

ロボットアームのバルブ操作の動力学モデルを導出した。このモデルに基づき、作業実現に不可欠な作業変数、幾何拘束を受ける変数、それ以外の拘束無し冗長変数に分類し、正確なねじピッチが得られないとの仮定のもと、目的を達する制御法の定式化を行った。

(2) ロボットアームによる実証実験

提案手法を7関節ロボットアームに実装し、各作業変数、手先接触力の応答結果から、作業実現および接触順応性能を評価した。

(3) 接触順応を効果的に発揮する諸条件の調査

ロボットハンドを搭載し、ハンド把持力の変更による接触順応の性能向上を検証した。また、接触順応のしやすさの定量的な評価法を検討した。研究推進の中で、逆可動性の高い関節が接触順応を得やすいことが分かってきた。このとき、冗長自由度の動作が活発になり作業実現を妨げる可能性がある。閉ループダイナミクスの解軌道解析に基づき、接触順応と作業実現を両立する条件を調査した。

4. 研究成果

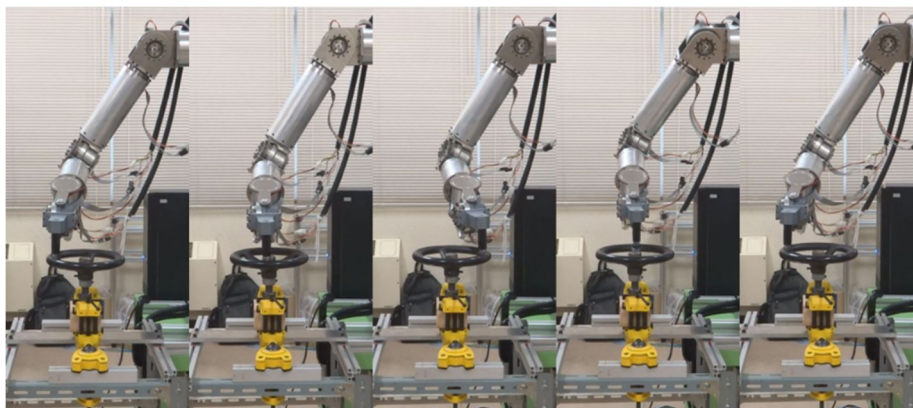
(1) 制御法の定式化

ロボット手先とバルブの幾何拘束を考慮し、ラグランジュの未定定数法によるロボットアームとバルブの拘束条件付き運動方程式を導出した。導出した運動方程式に基づき、バルブ回転で生じるねじ進行にロボットが接触順応する制御則を検討した。まず、ロボットの手先位置・姿勢6変数と冗長軸(アームアングル)1変数を作業変数に設定し、バルブ回転動作に不可欠な2変数(x, y)、幾何拘束を受けるバルブ高さ・水平傾斜角の3変数(z, θ, ψ)、それ以外の拘束無し冗長2変数(ϕ, β)に分類した。そして、バルブ動作に不可欠な2変数のみに、ロボット手先を一定の速度でバルブ軸まわりに円運動させる制御目標値($x_d(t), y_d(t)$)を定めた。転置ヤコビ行列による作業変数フィードバック制御系を組むことで、バルブ回転動作を実現しつつ、幾何拘束を

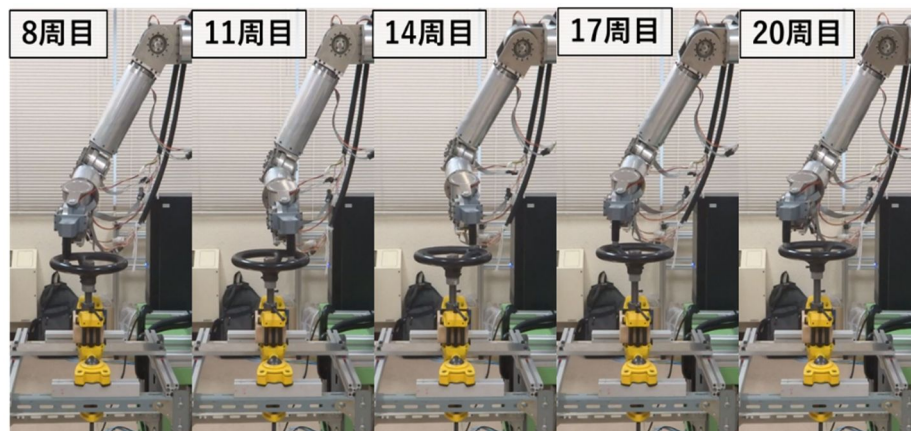
受ける3変数は零空間動作の特徴からその拘束に順応する、つまり、ねじ進行に対して接触順応する。導出した運動方程式と制御則を動力学シミュレーションに組み込み、意図した動作の実現を確認した。

(2) ロボットアームによる実証実験

バルブの取っ手とロボット手先を直接連結し、所有の7軸ロボットアームに設計した制御則を組み込み、バルブ操作実験を行った。図2は実験の様子であり、継続的なバルブ操作を実現した。ねじピッチが未知であるバルブの高さ変化に対し、提案手法は力覚情報のフィードバック無しに順応する結果を得た。このときの手先接触力は、バルブ上昇で大きくなり、平均で平面方向2N・高さ方向10N、最大で平面方向16N・高さ方向20Nであった。この値は、人の作業時より大きい、ロボットの受動動作に必要な力より小さかった。制御による過度な力の発生はなかったが、ロボット固有の関節摩擦が順応発揮に強く関係した。また、試行を重ねる中で、アーム肘部が土台側に引き込まれる自己運動が生じる場合があった。



(a) 1周動作 (4周目)



(b) ねじ進行と作業継続

図2 7軸ロボットアームのバルブ操作実験

(3) 接触順応の調査：ハンド把持力の違い

電動グリッパをベースにした1自由度ハンド、連動多関節機構からなる2本指ハンド(2自由度)の2種類のハンドを製作した(図3)。これらをロボットアームに搭載し、異なる把持力でノブを掴み、バルブ操作実験を行った。ノブとの接触面積が大きい2本指ハンドでは、把持力30N時にバルブ平面方向の手先接触力が5N小さくなった(高さ方向の違いは見られなかった)。ノブとの接触面積が小さい1自由度ハンドでは、50~150Nまで把持力を変えたものの、直接連結時と手先接触力に違いは見られなかった。把持力の違いによる接触順応の発揮は限定的であった。しかし、ハンド付きロボットアームによるバルブ操作が、直接連結時と同様に行える結果を得た。

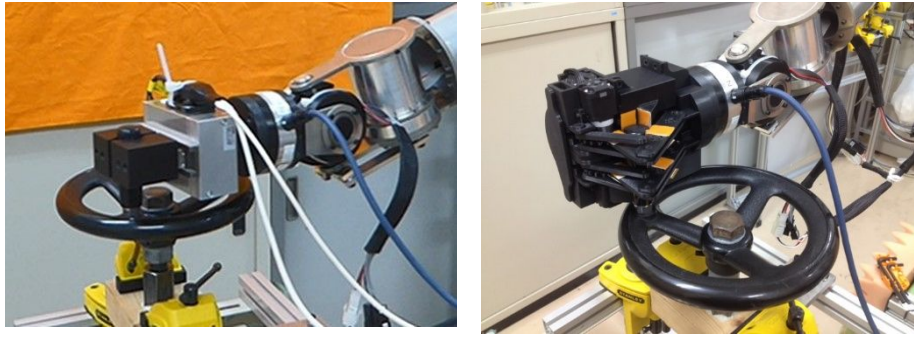


図3 開発したロボットハンド

(4) 接触順応の調査：接触順応の定量評価

接触順応は零空間アーム姿勢の動的遷移により生じるが、その程度を明示できずにいた。接触順応はアーム姿勢に依存する。手先制御に対する零空間のヤコビ行列の大きさの評価により、外力への順応性（零空間動作のしやすさ）の定量評価法を開発した。

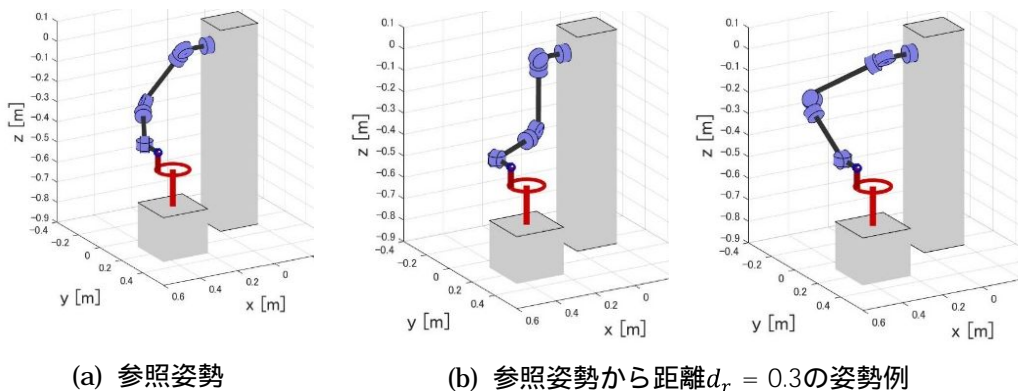
(5) 接触順応の調査：逆可動性の高い減速機

減速機メーカーとの情報交換の中で、現在のロボットアームの関節仕様を保ちつつ、減速機の逆可動性を高められることが判明した。これは接触順応を生み出すアームの零空間動作を効果的に得る重要な要素である。そこで、カスタム品の逆可動性を検証した。モータユニットの出力軸を動かすために必要なトルクは、標準品と変わらなかった。減速機自体の逆可動性は高いものの、モータ慣性、組み込み時の軸負荷（偏心など）の影響が大きかったと考えている。

(6) 接触順応の調査：逆可動性の高い関節での動作安定性

逆可動性の高いロボットアームは、本研究で着目する接触順応を効果的に得ることに貢献するが、意図しない冗長姿勢の動作（自己運動）を招く恐れがある。動作の安定性解析では、動作中に取りうる姿勢の把握が重要になる。研究代表者等は、先行研究の冗長自由度リーチングの運動解析において、動力学的な意味での冗長姿勢間の違いを、運動エネルギー（慣性行列）に関係する計量を導入したリーマン多様体上の2点間の最短距離（リーマン距離）により捉え、安定性解析に用いた。しかし、ホロノミック拘束を伴うバルブ開閉動作にこの手法を応用できるかは、未検討であった。ホロノミック拘束を満たす部分リーマン多様体上の2点間の最短曲線を変分法により解析した。最短曲線の必要条件から、拘束時のリーマン距離は、非拘束時と同様に運動エネルギーとの関係性を保ち、バルブ操作におけるロボットアームの冗長姿勢の範囲解析に導入できることを明らかにした。

上記の成果を踏まえ、手先が拘束される7軸ロボットアームのバルブ操作において、バルブ操作中のある姿勢に着目し、その参照姿勢から特定のリーマン距離にある姿勢群を確認した。図4は参照姿勢からリーマン距離 $d_r = 0.3$ の姿勢群の例を示している。結果から、動力学的に取りうる冗長姿勢の見積もりにリーマン距離を利用できると判断した。この解析法を用いたバルブ操作の安定性解析（許容できる自己運動の中で接触順応を發揮する条件の解明）、解析結果を踏まえた実機検証を計画していたが、時間の制約から実施できなかった。これらは、引き続き推進する。



(a) 参照姿勢

(b) 参照姿勢から距離 $d_r = 0.3$ の姿勢例

図4 リーマン距離による動力学的な姿勢評価

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 0件）

1. 著者名 Sekimoto Masahiro, Arimoto Suguru	4. 巻 36
2. 論文標題 Motion analysis of a multi-joint system with holonomic constraints using Riemannian distance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 794 ~ 810
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2022.2099763	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 関本 昌紘
2. 発表標題 リーマン幾何学と冗長自由度リーチングの動作解析
3. 学会等名 第141回ロボット工学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長谷純平, 関本昌紘, 神代充
2. 発表標題 本体部接触を伴うロボットアームの遠隔操作における冗長自由度の受動順応を用いた作業継続
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鷺田凌, 関本昌紘, 神代充
2. 発表標題 高逆駆動関節ロボットアームのねじクランク回しにおける冗長自由度の接触順応と動作姿勢を調整するダンピング制御法
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関本昌紘
2. 発表標題 冗長自由度の受動特性を用いたロボットアームの接触順応法：順応性能の定量化
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷本夏樹, 関本昌紘, 木村弘之
2. 発表標題 冗長自由度順応法を用いたネジクランク動作におけるロボット姿勢が制御量誤差と手先接触力に与える影響
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第56期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 更家吉紀, 関本昌紘, 木村弘之
2. 発表標題 ネジクランク回し作業における把持力の違いに対する冗長自由度の順応特性の調査
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第56期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷本夏樹, 更家吉紀, 伊藤良太, 田中琢稔, 関本昌紘, 竹垣盛一, 川村貞夫, Ji-Hun Bae, 木村弘之
2. 発表標題 制御目標値削減による冗長自由度順応法を用いたねじクランク動作時の手先接触力の調査
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takatoshi Tanaka, Masahiro Sekimoto, Morikazu Takegaki, Sadao Kawamura, Ji-Hun Bae, and Hiroyuki Kimura
2. 発表標題 Realization of turning a screw crank with less control inputs by using redundant degrees of freedom of a manipulator
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017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
---------	---------