

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760230

研究課題名(和文) 特異姿勢を利用したロボットの巧みな作業動作

研究課題名(英文) Efficient Motion of a Robot Manipulator for Task Achievement near Singular Configurations

研究代表者

浦久保 孝光 (Urakubo, Takateru)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・助教

研究者番号：10335424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：ロボットアームの特異姿勢は、従来のロボット運動制御においては避けられる傾向が強い。本研究では、ロボットアームによるある種の作業に対しては、特異姿勢を用いて作業を遂行することにより、必要な関節トルクを低減することが可能であることを明らかにした。

作業遂行のための最適運動を数値最適化によって求め、この運動に見られる特異姿勢の動力学的性質を解析により明らかにした。さらに、得られた最適軌道により実際のロボットにおいても特異姿勢を用いた省トルク化が達成されることを実機実験により明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For motion control of a robot arm, singular configurations of the arm tend to be avoided. In this study, we showed that, when a certain kind of tasks are performed by a robot arm, the joint torques necessary to achieve the tasks can be reduced by using singular configurations. The optimal motion for achieving the tasks was obtained by numerical optimization, and the dynamic features of singular configurations were revealed by analyzing the obtained motion. The experiments for an actual robot arm to achieve the obtained motion were performed to show that the advantage of singular configurations in reducing the joint torques is practically useful.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス 機構学 動力学

1. 研究開始当初の背景

(1) 複数の剛体リンクからなるロボットにおいて、肘や膝に対応する関節が伸び切った状態は特異姿勢と呼ばれる。この特異姿勢は、運動学的観点からは制御困難な状態であり、ロボットの運動計画や運動制御においては避けられることが多い。

(2) 一方で、人などの生物は特異姿勢を利用して重量物の持ち上げや跳躍などダイナミックな作業や動作を実現している。すなわち、特異姿勢は、力学的観点では作業達成に有用である可能性がある

(3) ロボットによるダイナミックな作業動作を実現するためには、特異姿勢の力学的性質の解明とその利用法の構築が必要である。従来研究では、静力学的性質がわずかに指摘されているのみであり、ダイナミックな作業動作に必要な動力学的性質については未解明である。また、特異姿勢の利用法についても体系的な研究はなされていない。

2. 研究の目的

(1) 本研究の1つ目の目的は、複数の剛体リンクからなるロボットにおける特異姿勢の動力学的性質を解明することである。2リンクロボットアームなどの具体的なロボットを考え、特異姿勢付近での動力学に対する理論解析を行い、ダイナミックな作業に対する特異姿勢の有用性を評価する。

(2) 本研究の2つ目の目的は、(1)で解明した動力学的性質をもとに、ロボットの効率的な作業達成が可能であることを、数値シミュレーションおよび実機実験によって示すことである。2リンクロボットアームによる重量物の引っ張り・持ち上げ作業など具体的な作業を考え、作業遂行において特異姿勢を用いた方が必要な関節トルクを軽減できることを実証し、実ロボットにおける特異姿勢の有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 特異姿勢の動力学的性質を調べるため、具体的に2リンクロボットアーム、4リンク跳躍ロボットを考え、これらのロボットに対する運動方程式を定式化し、特異姿勢付近での近似解析を行う。とくに、ダイナミックな作業を考え、作業対象物体や胴体の質量が大きい場合を想定し、作業達成に必要なエネルギーや運動量の生成・伝達について詳細に解析を行う。この解析結果を順動力学計算による数値シミュレーションによって検証する。

(2) 特異姿勢の動力学的性質を利用することで、効率的な作業達成が可能であることを示すため、具体的に2リンクロボットアームによる重量物の引っ張り・持ち上げ作業(図1)、4リンク跳躍ロボットによる跳躍動作な

どを対象に、作業動作達成に必要な関節トルクを最小化する最適運動計画問題を考える。これを数値最適化手法によって解き、得られた最適運動を他の運動と比較することで、特異姿勢を用いた作業動作によって省トルク化が達成されることを示す。また、実験機による実験を行い、作業動作の精度を確保するためにフィードバック制御を併用するなど、実用的なロボット制御を考えた場合においても、特異姿勢の動力学的性質による省トルク効果が得られることを実証する。

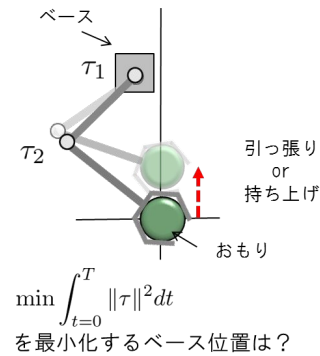


図 1: 2 リンクロボットアームによる最適引っ張り・持ち上げ問題

4. 研究成果

(1) 本研究でのいくつかの具体的なロボット作業に対する結果を通して、特異姿勢には以下の力学的性質があることを明らかにした。

静力学的性質(従来から知られた性質)

A. 特異姿勢付近では、手先(エンドエフェクタ)でのある方向の大きな負荷に対して、小さな関節トルクで耐えることができる。

動力学的性質(本研究で明らかにした性質)

B. 手先の作業物体の質量が大きい場合、他の姿勢に比べて特異姿勢付近において関節トルクから効率的にアームの運動エネルギーを生成可能である。

C. 特異姿勢付近でアームに蓄えられた運動エネルギーは、ロボットの姿勢が特異姿勢から離れるとともに手先の重量物の力学的エネルギーへと伝達される。

性質 A は従来から知られた性質であるが、本研究での解析や数値計算結果においても、その性質が再確認された。一方、性質 B, C は本研究によって明らかになった性質であり、ダイナミックな作業遂行に有用な性質である。今後、多リンク機構からなるロボットの様々な作業への利用が期待できる。

(2) 本研究で明らかにした性質 B を運動方程式にもとづく理論解析によって導出した。特異姿勢付近では、手先(エンドエフェクタ)と関節角度の運動学的関係が特異となるため、その運動学や動力学には強い非線形性がある。この非線形性に伴い運動方程式は、エネルギー生成に関する性質 B を持つことを示した。さらに、この性質 B を利用する手先の運動方

向とエネルギー供給率をいくつかの近似の下で解析的に明らかにした。

(3) 本研究で明らかにした性質Cは運動学的拘束(リンク機構による拘束)によって生じること示した。すなわち、性質Bによって、アーム部が大きな回転運動エネルギーを持てば、リンクが接続されていることによる運動学的拘束に従い、そのエネルギーは手先(エンドエフェクタ)部の重量物の力学的エネルギーとして伝達される。さらにこのとき、手先の重量物においては、拘束力を利用した大きな運動量変化を伴う。この運動量変化は、浮遊2リンク系や2リンクアームを持つモバイルマニピュレータの解析を通して明らかとなった。また、4リンク跳躍ロボットに対する解析結果と比較することで、性質Cはとくに引っ張り動作において見られ、跳躍時に胴体を上に押し出す場合などの押し動作においては見られないことが明らかとなった。

(4) 特異姿勢を利用して省トルクでの作業達成が可能であることをいくつかの作業例に対して数値シミュレーションによって明らかにした。例えば、図1の2リンクアームによる重量物の引っ張り・持ち上げ問題では、数値最適化によって、ベース位置に対する必要トルクのコスト関数値は図2および図3のような等高線図となる。初期姿勢が特異姿勢に近づくにつれて、コスト関数が小さくなり、必要な関節トルクを小さくできることが分かる。これらの数値計算においては、実験機に対する力学モデルを詳細なモデル化と摩擦等の同定によって構築し、逆動力学計算による必要トルクの算出を行った。数値最適化においては、市販の数値計算ソフトを用いて高精度な解を効率的に求めた。

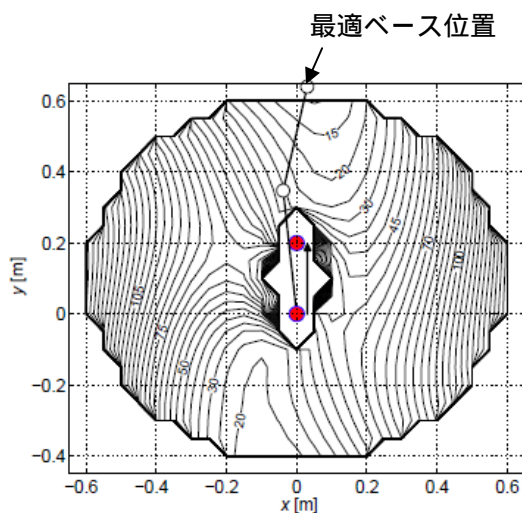


図2: 引っ張り作業において各ベース位置に対して得られるコスト(必要トルク)の等高線図

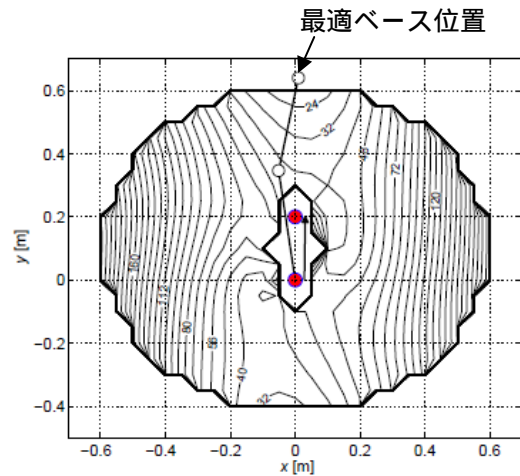


図3: 持ち上げ作業において各ベース位置に対して得られるコスト(必要トルク)の等高線図

(5) 実ロボットにおいても特異姿勢を利用した省トルクでの作業達成が可能であることを実証し、本研究で明らかにした特異姿勢の動力学的性質が実用上も有用であることを示した。実ロボットにおいては、モデル化誤差や制御誤差は避けられないため、最適運動計画問題の解をフィードフォワード入力として用いても精度の高い作業動作は達成できない。そこで、このフィードフォワード入力にフィードバック入力を加えた二自由度制御系を構築し、実ロボットによる実験を行った(図4)。

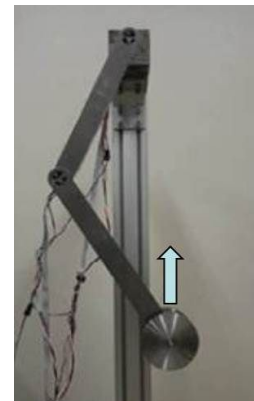


図4: 実ロボットによる持ち上げ作業実験

実ロボットにおいては、フィードバック入力による必要トルク(コスト)の増加が見られるが、図2、図3と同様に、ロボットの初期姿勢が特異姿勢に近づくにつれて、必要トルクが低減される結果が得られた。

(6) 様々な作業動作に対して同様な最適運動計画問題を解き、特異姿勢の動力学的性質の利用法について検討した。4リンクロボットによる跳躍動作においては、跳躍の離地および着地の際に、足首関節を用いて性質Bにもとづくエネルギー生成および吸収が可能である。しかし、実ロボットにおいては、着地時の衝撃力の低減が必要であり、この観点で

は特異姿勢から離れた姿勢での着地が良い。すなわち、エネルギー吸収と衝撃力低減にはトレードオフの関係があり、この2つの指標の重みを決定することで、着地時の最適姿勢が決定される。また、2リンクアームによる投擲作業を考えると、同様に特異姿勢における性質Bの利用が可能である。ただし、作業時間に制限を与えない場合は、肘関節を伸ばした特異姿勢よりも、肘関節を完全に折りたたんだ姿勢(もう1つの特異姿勢)を利用の方が省トルク化に有利である。2つの特異姿勢において性質Bを利用する運動方向には違いがあり、肘を折りたたんだ特異姿勢では連続的に性質Bを利用可能である。

#### 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)

[学会発表](計 8 件)

T. Urakubo, H. Yoshioka, T. Mashimo and X. Wan, Experimental Study on Efficient Use of Singular Configuration in Pulling Heavy Objects with Two-link Robot Arm, 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2014年6月4日, 香港  
X. Wan, T. Urakubo, Y. Tada, Optimization of Jumping Motion of a Legged Robot for Different Take-off Postures, The 8th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, 2014年5月28日, 韓国

浦久保, 万, 真下, 特異姿勢付近におけるリンク機構の動力学的性質に関する考察, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 2014年5月21日, 京都

X. Wan, T. Urakubo and Y. Tada, Landing Motion of a Legged Robot with Impact Force Reduction and Joint Torque Minimization, The Second International Conference on Robot, Vision and Signal Processing, 2013年12月11日, 北九州

万, 浦久保, 多田, 脚型跳躍ロボットの着地過程における最適動作生成, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 2013年9月5日, 東京

万, 浦久保, 吉岡, 多田, 脚型ロボットにおける特異姿勢付近での効率的跳躍動作に対する考察, 日本機械学会 第10回最適化シンポジウム 2012年12月6日, 神戸

吉岡, 浦久保, 真下, 万, 2リンクロボットアームの持ち上げ動作における特異姿勢の有用性の実験的検証, 日本ロボット学会第30回記念学術講演会, 2012年9月20日, 札幌

X. Wan, T. Urakubo and Y. Tada, A Study

on Jumping Motion of a Legged Robot with Efficient Energy Supply near Singular Configuration, The 7th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, 2012年6月20日, 中国

[その他]

ホームページ等

<http://robot.cs.kobe-u.ac.jp/contents/research/urakubo/robotarm.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

浦久保 孝光 (URAKUBO, Takateru)

神戸大学・大学院システム情報学研究所・助教

研究者番号: 10335424