

令和元年6月3日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06182

研究課題名(和文) ロボット特異姿勢の動的性質の解明とその応用

研究課題名(英文) Dynamic characteristics of robot singular configurations and their applications

研究代表者

浦久保 孝光 (Urakubo, Takateru)

神戸大学・システム情報学研究科・准教授

研究者番号：10335424

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)：本研究では、ロボットによる動的な作業動作に対して、特異姿勢の力学的な性質を調べ、その有用性を、解析、数値シミュレーション、実機実験を通して明らかにした。ロボットの特異姿勢とは、例えば2リンクアームであれば、アームが真っ直ぐに伸びた状態である。従来のロボット制御では、この特異姿勢を避ける傾向にあるが、本研究の結果によれば、重量物運搬などの動的な作業動作においては、特異姿勢を利用して消費関節トルクを低減して作業達成が可能である。いくつかの具体的なロボット作業動作を考え、ロボットが持つ関節の数や自由度、行う作業に応じて、多様な特異姿勢の性質とその利用法があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボットアームの運動方程式は特異姿勢付近で強い非線形性を持つ。本研究では、いくつかのロボットを対象として、この非線形性に伴う力学的性質やその利用法を解明したものであり、ロボットダイナミクスの理解としてその学術的意義は高い。

また、今後のロボットは、災害地での瓦礫除去、家庭内での様々な荷物の運搬など、未知環境での作業遂行が求められる。本研究の成果は、特異姿勢の活用の有無が、作業達成の成否にかかわることを示しており、より役に立つロボットの創出に向けて、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, we examined the dynamic characteristics of singular configurations for serial-link robots, and showed by theoretical analysis, numerical simulations and experiments that the robots can achieve dynamic tasks by utilizing the characteristics. For a two-link robot arm, its singular configuration is the posture where the arm is stretched out. Although singular configurations tend to be avoided in the conventional approach to robot control, this study revealed that singular configurations allow the robots to achieve dynamic tasks such as lifting up a heavy object while reducing the joint torques necessary for the tasks. Furthermore, we can find various dynamic characteristics of singular configurations and various ways of utilizing them, depending on the tasks required for the robots, the number of joints and the degrees of freedom of the robots.

研究分野：ロボティクス

キーワード：動力学 非線形力学 最適運動計画

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) ロボットマニピュレータやヒューマノイドなど多くのロボットは複数の剛体リンクから構成されるが、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。特異姿勢においては、エンドエフェクタと呼ばれる手先や足先と関節角の運動学的関係が特異となり、エンドエフェクタの制御が困難となる。このため、従来のロボット制御においては、特異姿勢を避けることが一般的である。

(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。にもかかわらず、特異姿勢の力学的性質やその利用法については明らかにされていない。静力学的な性質は従来より指摘されているが、とくにダイナミック動作に必要な動力学的な性質は未解明である。

2. 研究の目的

(1) 人や生物のように特異姿勢を利用して巧みにダイナミック動作を行うロボットを創出するため、特異姿勢の力学的性質を解明するとともに、その利用法について調べる。研究代表者は、これまでに2リンクロボットアームが重量物を引っ張ったり持ち上げたりする場合を考え、特異姿勢の動力学的性質を詳細に調べてきた。本研究では、さらに他のリンク機構を持つロボットや作業動作を考え、より多角的に特異姿勢の力学的性質の解明を進める。

(2) 複数のロボット動作において得られた特異姿勢の力学的性質を整理し、体系的な特異姿勢の理解を進める。また、いくつかのロボット動作に対して実機実験を行い、ダイナミック動作における特異姿勢の有用性を実証する。

3. 研究の方法

(1) 具体的なロボット動作として、2リンクアームを搭載したモバイルマニピュレータによる重量物の引き摺り動作、3リンク平面冗長ロボットアームによる重量物運搬動作、3次元ロボットアームによる重量物運搬動作、脚型ロボットによる跳躍動作を対象として、それぞれの動作における特異姿勢の力学的性質と利用法を調べる。

(2) それぞれのロボット動作において、作業達成に必要な関節トルクを最小化する最適運動を数値最適化手法によって求める。最適運動における特異姿勢の利用法を詳細に調べるとともに、最適でない運動との比較を行い、特異姿勢の力学的性質および有用性を考察する。

(3) 対象とするロボット動作に対して実験機を製作し、得られた最適運動の実現可能性や有用性を実証する。実際のロボットにおける関節部の摩擦、モデル化誤差などの下で、特異姿勢の力学的性質および有用性を確認する。

4. 研究成果

(1) 2リンクアームを搭載したモバイルマニピュレータによる重量物の引き摺り動作については、2リンクアームの場合と同様な特異姿勢の有用性があることが分かった。すなわち、アーム部を真っ直ぐにした特異姿勢において、ロボット全体が持つ力学的エネルギーを活用して、大きな力で手先に把持した物体を引っ張ることができる。また、このロボット動作に対しては、実験機を製作し、数値最適化によって得られた運動を実際のロボットによって実現した。特異姿勢の動力学的性質を利用しない運動では引き摺って動かすことができないほどの重い物体に対しても、特異姿勢を利用した運動を用いれば動かすことができることが実証された。図1の例では、約6kgの質量のロボットによって、30kgの質量の重量物を、特異姿勢を使って約3cm移動させることができています。わずかな移動量ではあるが、この運動を繰り返し行うことで、重量物を所望の位置まで運ぶことが可能となる。

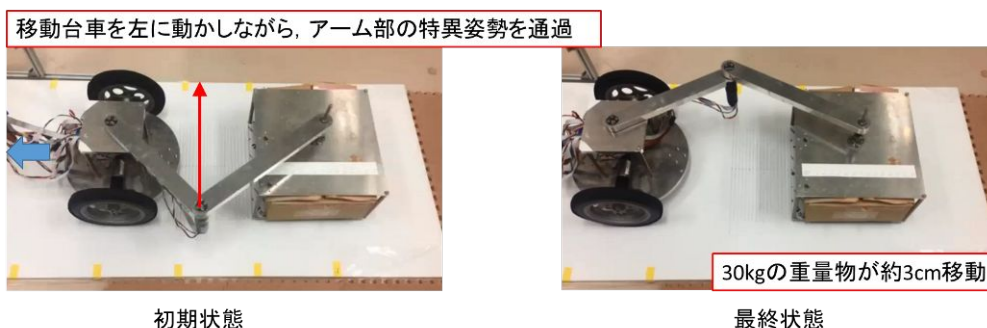


図1 2リンクアームを搭載したモバイルマニピュレータによる重量物の引き摺り動作

(2) 3 リンク平面冗長ロボットアームによる重量物運搬動作については、数値シミュレーションによって最適動作を求めた。2 リンクアームの場合に比べて、同じ重量物の移動軌跡であったとしても冗長性のため多様なアーム部の運動が可能となる。最適化の結果、2 リンクアームの場合と同様に、各関節を真っ直ぐに伸ばした特異姿勢を用いることで、重量物運搬に必要な関節トルクを低減できることが分かった。

(3) 3 次元ロボットアーム (図2) による重量物運搬動作についても同様に、数値シミュレーションによって最適動作を求めた (図3)。その結果、2 リンクアームのときと同様な特異姿勢を用いた最適動作が得られた。一方で、条件によっては2 リンクアームには存在しない種類の特異姿勢を活用した運動も見られた。また、実験機を製作し、モータに取付可能な様々なギア比のギアを想定し、数値シミュレーションを行った。この結果、ギア比の違いに伴う関節摩擦の違いによって、多様な最適動作が得られることが分かった。ギア比を小さくして摩擦を抑えた場合には、よりダイナミックな動作によって消費トルクを抑えて重量物の持ち上げ作業を達成できる。

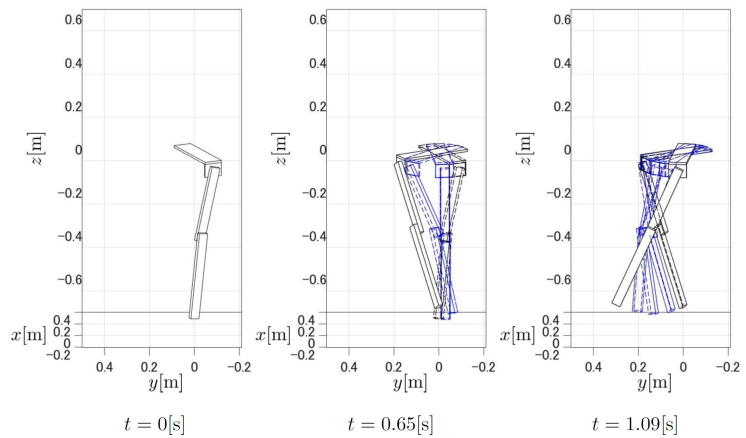


図2 3次元ロボットアーム

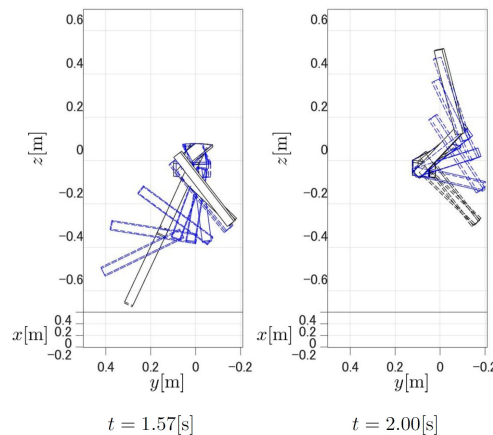


図3 最適持ち上げ動作の例

(4) 脚型ロボットによる跳躍動作についても同様に、数値シミュレーションによって最適動作を求めた。上述の他の作業動作においては手先において重量物を強く引っ張ることが重要であったが、跳躍動作においては足先で地面を強く押すことが重要である。このような押し動作において利用される特異姿勢の力学的性質について考察を行った。特異姿勢から少しずれた姿勢において関節トルクから足先での力を発生しやすく、この性質を利用していると考えられる。また、図4に示す実験機を製作し、数値シミュレーションで得られた運動に従い関節トルクを与え、動作実験を行った。この実験装置は斜面台によって、水平面内の動作から垂直面内の動作までを実験することが可能である。

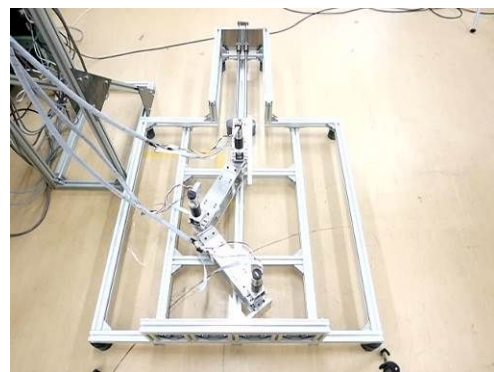


図4 脚型ロボット

(5) 関節の数や回転軸方向といったロボットの自由度に応じて、様々な特異姿勢が存在する。上述のいくつかの具体的なロボット作業動作について特異姿勢の力学的性質を調べた結果、ロボットの自由度や行う作業に応じて、利用する特異姿勢やその性質は多岐にわたることが分かった。特異姿勢では、手先もしくは足先と関節角の運動学的関係が特異になっており、関節部に何らかの拘束力が発生することが多い。この拘束力を作業達成に活かすように特異姿勢を利用することが重要であると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

T. Urakubo, E. Kitagawa, X. Wan and T. Mashimo, Dragging Motion of a Two-link Mobile Manipulator with Large Pull Force through Singular Configuration: Theoretical Analysis and Experimental Verification, *Advanced Robotics*, 査読有, Vol. 32, No. 11, pp. 623-634, 2018

DOI: 10.1080/01691864.2018.1476180

北側, 浦久保, 万 : 2 リンクモバイルマニピュレータによる重量物運搬動作における特異姿勢の動力学的有用性, *システム制御情報学会論文誌*, 査読有, Vol. 30, No. 3, pp. 87-96, 2017

[学会発表](計9件)

鰻田, 井口, 室巻, 須田, 浦久保, 3 回転関節を持つ脚型跳躍ロボットの開発, 日本設計工学会関西支部 平成 30 年度研究発表講演会, 2018

K. Unagida, T. Muromaki, A. Suda, X. Wan and T. Urakubo, Development of a Legged Robot for Studying an Efficient Jumping Motion near Singular Configurations, 2018 International Symposium on Flexible Automation, 2018

鰻田, 室巻, 須田, 浦久保, 万, 特異姿勢付近における効率的跳躍動作の研究および脚型ロボットの開発, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018*, 2018

R. Kawanishi, T. Urakubo and X. Wan, Dynamic Advantages of Singular Configurations in Moving Heavy Objects with a 3-DOF Robot Manipulator, IEEE 15th International Workshop on Advanced Motion Control, 2018

川西, 浦久保, 万, 3 自由度ロボットマニピュレータによる重量物運搬動作における特異姿勢の有用性に関する考察, 第 18 回 SICE システムインテグレーション部門講演会, 2017

鰻田, 室巻, 須田, 浦久保, 万, 跳躍動作を行う脚型ロボットの開発, 日本設計工学会関西支部・ヒューマンサポートサイエンス学会 平成 29 年度研究発表講演会, 2017

北側, 浦久保, 万, 2 リンクモバイルマニピュレータによる特異姿勢を用いた重量物運搬動作の実験的検証, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 若手研究発表会, 2017

馬, 浦久保, 万, 3 リンク平面冗長マニピュレータによる重量物運搬動作における特異姿勢の有用性, 平成 28 年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2016

E. Kitagawa, T. Urakubo and X. Wan, Advantage of Singular Configuration in Pulling Heavy Object with a Two-link Mobile Manipulator, 2016 International Symposium on Flexible Automation, 2016

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 真下 智昭

ローマ字氏名: (MASHIMO Tomoaki)

研究協力者氏名: 室巻 孝郎

ローマ字氏名: (MUROMAKI Takao)

研究協力者氏名: 万 象隆

ローマ字氏名: (WAN Xianglong)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。