

令和 6 年 4 月 24 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04350

研究課題名（和文）特異姿勢を用いたロボットのダイナミック動作における力学と制御

研究課題名（英文）Mechanics and control of dynamic robot motions using singular configurations

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ロボットアームの特異姿勢の動力学的な性質を理論解析、数値シミュレーション、実機実験によって調べた。2リンクアームに対して、動的可操作性と呼ばれる性質のリンク長に応じた変化を解析し、重量物運搬などのダイナミックな作業において、特異姿勢を用いることが有用であるとともに、前腕が上腕に比べて長い方がその有用性が増す傾向にあることを明らかにした。また、微小重力下の4リンクからなる脚型ロボットに対して、エンドエフェクタと地表との間の衝撃力を用いた効率的な跳躍運動の可能性を数値シミュレーションによって確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

特異姿勢はその運動学的性質を根拠に従来のロボット制御において避けられる傾向が強い。本研究によって動力学的な有用性を理論解析、数値シミュレーション、実機実験によって示したことは、今後のロボット制御の考え方に対する学術的な新たな提案となる。また、特異姿勢を活かすことで、ロボットの達成可能なタスクが増えるとともに、タスク達成に必要な消費エネルギーを低減可能である。よって、本研究の成果は、社会で活躍する有用なロボットの創出に貢献すると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, the dynamic features of robotic arms around the singular configurations were investigated by theoretical analysis, numerical simulations and hardware experiments. For two-link arms, we analyzed the change in dynamic manipulability with link lengths, and found that utilizing singular configurations is advantageous in achieving dynamic tasks of moving heavy objects, and that the advantage tends to be greater when the forearm is longer than the upper arm. For a legged robot under microgravity, it was verified by numerical simulations that an efficient jumping motion is possible by using an impact force between the end-effector and the ground surface.

研究分野：ロボット工学、制御工学

キーワード：動力学解析 最適運動計画 ロボットマニピュレータ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) ロボットアームの特異姿勢は、アーム手先の位置および姿勢と関節角の運動学的関係が特異となる姿勢である。例えば、2リンクアームの場合、アームを真っすぐに伸ばした姿勢、完全に折りたたんだ姿勢が特異姿勢となる。ロボット制御においては、その運動学的特異性からアーム手先の制御が困難となり、特異姿勢を避けることが一般的である。

(2) 一方で、人間を含む生物は特異姿勢を巧みに利用してダイナミックな作業を行っている。さらに、いくつかの論文では、ロボットの最適運動計画を通して、特異姿勢を利用することで消費エネルギーが低減されることが示されている。このように、動力学的な観点では、特異姿勢を利用することは作業達成に有利である可能性がある。にもかかわらず、特異姿勢の動力学的な性質は十分に理解されておらず、その利用は進んでいない。

2. 研究の目的

(1) ダイナミックな作業における特異姿勢の有用性の背景にある動力学的な性質を明らかにする。研究代表者は、以前の研究において、2リンクアームの場合に対してエネルギーの生成、吸収のしやすさという観点で特異姿勢の動力学的性質の解析を行ってきたが、発生可能な力など他の観点での解析を進めるとともに、ロボットのリンク長や関節摩擦など機構のパラメータに応じた性質の変化を調べ、体系的な理解を目指す。

(2) 実際のロボット作業における特異姿勢の有用性を検証する。理想状態での解析や数値シミュレーションだけでなく実機実験や実験機を想定した数値シミュレーションを行うことで、特異姿勢を利用した動作の実用性を確認する。

3. 研究の方法

(1) 具体的に2リンクロボットアームによる重量物の運搬作業を考え、アーム手先での力の発生しやすさを示す指標である動的可操作性を解析する。重量物がアーム質量に比べて十分に大きいという仮定の下で近似解析を行い、アーム姿勢に応じた動的可操作性の変化を陽に表現する。さらに、前腕、上腕のリンク長を変えて解析を行い、リンク長の違いによる動的可操作性の変化を調べる。また、消費トルクを目的関数として、重量物運搬動作の数値最適化をリンク長を変えて繰り返し行い、解析結果と最適化結果を比較し考察を行う。

(2) 冗長な自由度を持つシリアルリンクロボットとして、4リンクからなる脚型ロボットを考え、跳躍時の押し動作における特異姿勢の有用性について調べる。数値最適化によって最適跳躍動作を探索するとともに、実機実験により得られた動作の実現可能性を検証する。

4. 研究成果

(1) 2リンクアームによる重量物の運搬作業において、重量物が十分に重い場合に、関節トルクによるアーム手先の加減速を考えると、特異姿勢付近である方向に大きな動的可操作性を持つことが近似的な理論解析によって分かった。図1は、動的可操作性楕円体(アーム手先の発生可能な加速度を表す楕円体)の長軸方向の大きさを表す固有値である。横軸はアーム姿勢(関節角の余弦)であり、1がアームが真っすぐに伸びた特異姿勢、-1がアームが完全に折りたたまれた特異姿勢に対応する。図から2つの特異姿勢からわずかにずれた姿勢において動的可操作性が大きい、すなわち、アーム手先の重量物を加減速しやすいということが分かる。運動方程式にもとづく近似理論解析によって、動的可操作性が極大となる姿勢、そのときの極大値も明らかとなっている。さらに、このときの動的可操作性楕円体の長軸方向、すなわち、重量物を加減速しやすい方向についても解析し、近似的にはロボットアームのベース位置に向けた方向に重量物を加減速しやすいことが明らかとなった。

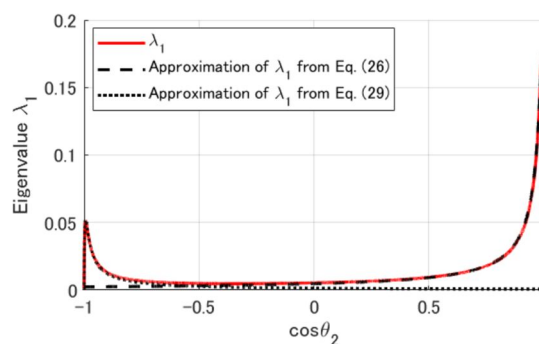


図1 動的可操作性解析結果の一例

(2) 2リンクアームによる重量物の運搬作業における上記の解析について、前腕と上腕の長さの違いによる影響を調べ、前腕の方が上腕より長い場合に、楕円体長軸方向の動的可操作性が大きくなる条件を求めた。この条件は、アームの慣性モーメント、長さなどを含む複雑なものとなるが、ロボットや生物の2リンク機構においては満たされることが多いと考えられる。すなわち、

この結果は、重量物をアームのベース位置方向に引いたり、その逆方向に押したりする場合には、前腕が上腕より長い方が有利であることを示唆する。

(3) 2リンクアームによる重量物の運搬作業に対して、作業時間中の消費トルクの積分値を目的関数として数値最適化を行い、上記の(1)(2)で得られた解析結果に対応する最適化の結果が得られることを確認した。図2は、前腕、上腕の長さを Setting A では0.5、0.5[m]、Setting B-1では0.6、0.4[m]、Setting B-2では0.4、0.6[m]、Setting C-1では0.7、0.3[m]、Setting C-2では0.3、0.7[m]、Setting D-1では0.8、0.2[m]、Setting D-2では0.2、0.8[m]とした場合の目的関数 J_c の値を示している。横軸は重量物の始点、終点を固定した場合のロボットベースの位置であり、各グラフの左端が折りたたまれた特異姿勢、右端が真っすぐ伸びた特異姿勢に対応する。図2の結果より、前腕、上腕の長さの違いが大きく、前腕が長い方が消費トルクを低減できることが分かる。これは、(2)で得られた解析結果に対応した結果である。前腕、上腕の長さの違いが大きくなれば作業空間が小さくなるものの、作業の種類が限定されている場合などには、大幅な消費トルク低減効果が見込める。図3には、Setting A の場合の2つの動作を例示している。青色の楕円体が動的に可操作楕円体であり、図3(a)では、初期時刻の真っすぐ伸びた特異姿勢付近で重量物を加速させる大きな力を発生可能であることが分かる。図3(b)では、終端時刻の折りたたまれた特異姿勢付近で重量物を減速させる大きな力を発生可能であることが分かる。

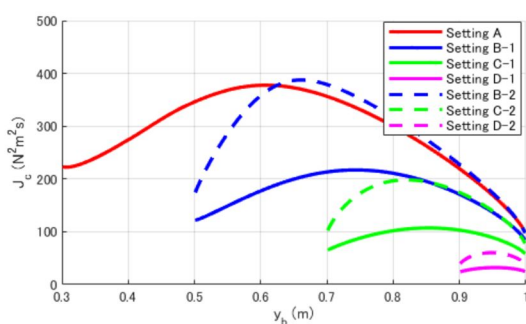
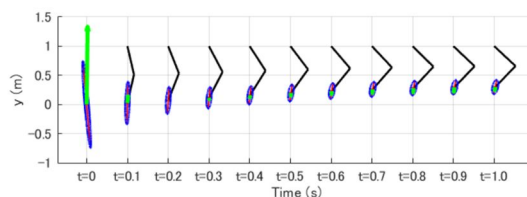


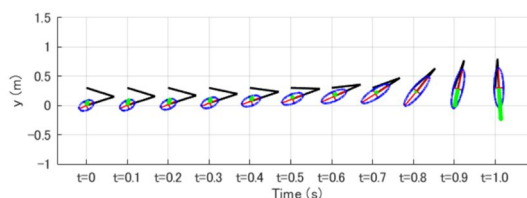
図2 最適動作における消費トルクの変化

(4) 2リンクアームによる重量物の運搬作業に対して、これまでに製作した実験機をもとに関節摩擦等のモデルを構築し、(3)と同様な数値最適化を行い、実際の作業における特異姿勢の有用性、リンク長の違いによる消費トルクの違いを確認した。図4が得られた結果であり、関節摩擦により折りたたまれた特異姿勢付近の有用性は失われるものの、真っすぐ伸びた特異姿勢付近の有用性は実作業でも期待されることが分かった。また、リンク長の違いによる傾向も図2の場合と同様となることが分かった。

(5) 4リンクからなる脚型ロボットに対しては、(3)と同様に最適跳躍動作を数値シミュレーションによって探索したところ、足リンクを大きく回転させ、足リンクが地面と衝突するときの衝撃力を用いて跳躍する動作が、微小重力下もしくは無重力化において有利であるという結果が得られた。これは当初の研究計画では想定していなかった動作であったが、特異姿勢付近を用いて常に足先を地面に接触させながら押す動作と同様に、消費トルクを抑えながら大きな跳躍量を得られる可能性がある。このため、研究協力者とともに実機実験を行い、その実現可能性を確認した。図5は、実験時の脚型ロボットの運動を示しており、実際にも衝撃力を利用した動作により跳躍動作が実現された。その時の跳躍量は、衝撃力を利用しない場合と同程度であり、さらに詳細な解析や実験が必要ではあるが、この種の跳躍動作の可能性を示すことができた。



(a) Setting A ($y_b=0.999$ [m])



(b) Setting A ($y_b=0.301$ [m])

図3 得られた最適動作の例

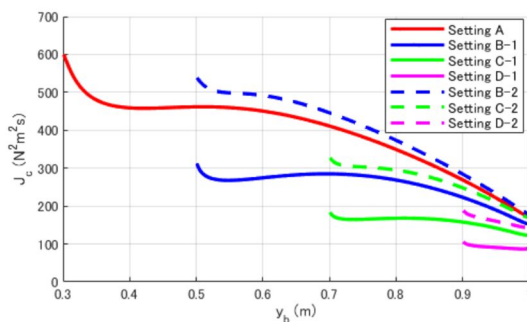


図4 最適動作における消費トルクの変化 (実験機想定シミュレーション)

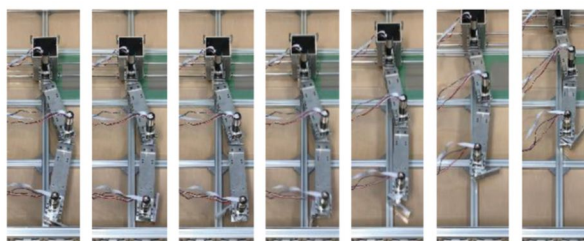


図5 衝撃力を利用した脚型ロボットの跳躍動作実験の様子

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 1件）

1. 著者名 Masashi Nakamura, Takao Muromaki, Takateru Urakubo	4. 巻 11
2. 論文標題 A Study on Kicking Motion Strategy for a Legged Robot	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research	6. 最初と最後の頁 145 ~ 150
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18178/ijmerr.11.3.145-150	査読の有無 有
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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Masashi Nakamura, Takateru Urakubo, Takao Muromaki
2. 発表標題 Dynamic motion of two-link arms with different link lengths using singularities
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村成志、浦久保孝光、室巻孝郎
2. 発表標題 異なるリンク長さを持つ2リンクアームの特異姿勢付近における動的可操作性解析
3. 学会等名 2023年度 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 菊田潤、室巻孝郎、中村成志、浦久保孝光
2. 発表標題 衝撃力を用いた蹴り出し動作に関する実験
3. 学会等名 2023年度 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中村成志、浦久保孝光、室巻孝郎
2. 発表標題 特異姿勢付近における2リンクロボットアームの動的可操作性解析
3. 学会等名 2022年度 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菊田潤、室巻孝郎、中村成志、浦久保孝光
2. 発表標題 脚型ロボットの蹴り出し動作実験
3. 学会等名 日本設計工学会関西支部 2022年度研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masashi Nakamura, Takao Muromaki, Takateru Urakubo
2. 発表標題 A Study on Kicking Motion Strategy for a Legged Robot
3. 学会等名 2021 6th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村成志、室巻孝郎、浦久保孝光
2. 発表標題 脚型ロボットの蹴り出し動作に対する動力学解析と最適化
3. 学会等名 2021年度 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浦久保孝光
2. 発表標題 跳躍動作における特異姿勢付近での動力学に関する考察
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村成志、室巻孝郎、浦久保孝光
2. 発表標題 脚型ロボットの蹴り出し動作の生成
3. 学会等名 日本設計工学会 関西支部 2020年度研究発表講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://www.ai.cs.kobe-u.ac.jp/urakubo/index.html

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
研究協力者	室巻 孝郎 (Muromaki Takao)	舞鶴工業高等専門学校・機械工学科・准教授 (54301)	

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
---------	---------