

令和 6 年 4 月 19 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14702

研究課題名（和文）赤外光反射型センサを利用して全身の接触遷移を支配する制御理論に関する研究

研究課題名（英文）Control for whole-body contact transition using optical reflective sensors

研究代表者

有田 輝（Arita, Hikaru）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：60843993

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ロボットが何かの作業をする際に必要になる「触れていない状態から接触状態への移り変わり」に注目した。研究の結果、接触する前の対象物をセンサで検出し、そのセンサの出力を用いて接触時の衝撃力の緩和や、接触しないように回避する動作を生成する手法を確立した。さらに本手法をロボット全身で行うためロボットの表面を覆うことができる高速な非接触センサを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の人手不足問題に対する解決策の一つとして、ロボットによる自動化が検討されている。しかし、現在のロボット技術では形状が複雑な対象物を繊細かつ素早く正確に扱うことは難しく、人手を必要とする作業が多く残されている。これに対し、本研究の成果は従来のロボットが特に苦手とする接触間際から接触の瞬間までの動作を制御する方法を提供する。今後ますます重要になる接触をより厳密に扱うための基礎となる成果である。

研究成果の概要（英文）：In this research, we focused on the transition from non-contact to contact state that is necessary when robots perform tasks. As a result of the research, we established a method to detect objects before contact using sensors and generate motions that mitigate impact forces at the time of contact or avoid contact by utilizing the sensor output. Furthermore, we developed a high-speed non-contact sensor that can cover the entire surface of the robot to implement this method for the whole robot body control.

研究分野：ロボティクス

キーワード：近接覚 衝撃緩和 接触遷移

1. 研究開始当初の背景

ロボットの作業環境/作業対象は多様化しており、より複雑な環境/対象を、より繊細に、素早く、正確に扱うためのロボット技術が求められている。ロボットハンドによる物体の把持に代表されるように、多くの作業にはロボットと環境/対象の力学的相互作用が欠かせない。力学的相互作用はロボットと環境/対象が“接触”することではじめて可能となるが、既存の技術では接触と非接触の遷移(接触遷移)を正確に制御することができない。

2. 研究の目的

本研究は接触と非接触の遷移(以降、接触遷移と呼ぶ)を制御するための理論を明らかにする。本研究では、赤外光反射型センサ(以降、近接覚センサと呼ぶ)をロボット全身に被覆実装し、センサが検出する情報を“仮想的な反力”として用いる制御系を開発することで解決を目指す。特に、ロボット全身に“仮想的な反力”を導入する方法、及びこれに伴って複雑化する対象の安定な制御方法に着目する。

3. 研究の方法

本研究では、下記の3つの目標達成を経て目的を達成した。

- 近接覚センサの出力を“仮想的な反力”として用いる非接触時の制御を実現しつつ、接触に至るまでを安定に制御する手法の開発
- 仮想的な反力に基づく制御と作業遂行のために必要となる制御の統合
- 仮想的な反力に基づく制御をロボット全身の制御へ拡張するために必要となる全身被覆可能な近接覚センサの開発

4. 研究成果

【 の成果】

力制御の手法として知られる「アドミッタンス制御」を利用して目標を達成した。アドミッタンス制御は、主にバネマスダンパ系で表現される仮想的な物体に力センサから得られる力を作用させた際の挙動をシミュレートし、その結果として得られた仮想物体の位置・速度に追従するようにロボットを制御する手法である。本研究では、力センサで得られる力情報の代わりに近接覚センサの出力に基づく仮想的な力を仮想物体に作用させる手法を提案した(図1)。バネマスダンパ系の動特性はよく知られており、この知見を利用して比較的容易に安定性を担保できる。

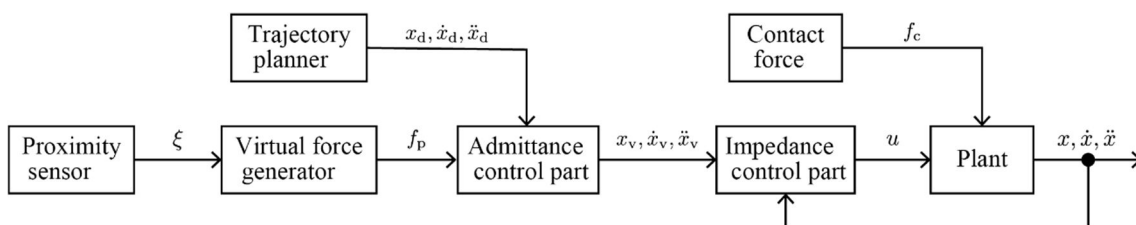


図1：仮想的な反力を力情報の代わりに用いる制御方法

このアイデアに基づき、まず非接触から接触への遷移に注目した衝撃緩和制御を実現した。ここでは近接覚センサの出力に基づく仮想的な反力が粘性力になるように設計し、衝突寸前のロボットと物体の相対速度を低減するために用いた。実機実験の結果、0.3 m/s で接近する物体が衝突した際の衝撃力を75.1%低減し、柔らかく接触可能であることを確認した。次に、仮想的な粘性力と仮想的な弾性力を組み合わせて用い、非接触と接触を遷移するタイミングの制御と衝撃緩和を両立する手法を提案した。前述の衝撃緩和制御の機能を損なわないため、タイミングを制御するための指令は大雑把なもの(例えば不連続なON/OFF)でも問題ないことを確認した。

【 の成果】

ここでは2つに分類される研究成果を挙げた。まず1つ目は、脚ロボットの軟着地の実現である(図2)。ここでは近接覚センサの出力を仮想的な弾性力として用いたが、単に利用するだけではなく、センサの検出特性を考慮したハードウェア設計の工夫によって制御性能を向上させた。通常、近接覚センサの出力は対象物との相対距離が近づくほど増大する。本研究ではこの特性を仮想的な弾性力として用いるが、従来通りに足先にセンサを実装すると、着地後のロボットの姿勢にも仮想的な弾性力の影響が生じ、所望の姿勢を取ることができない。そこで本研究では、近接覚センサの出力がごく近距離で低下することを利用した。近接覚センサは多くの場合、物体の接近に伴って出力が低下し始める距離(焦点距離)が数ミリ程度であるため、実装上問題にならないように焦点距離の分だけセンサを埋め込むことでゼロ距離までの検出を可能にしている。この研究ではあえて埋め込まずにセンサを実装し、ゼロ距離での出力が小さくなるようにした。

その結果として、十分な着地衝撃緩和と着地後の姿勢制御を実機で実現することに成功した。

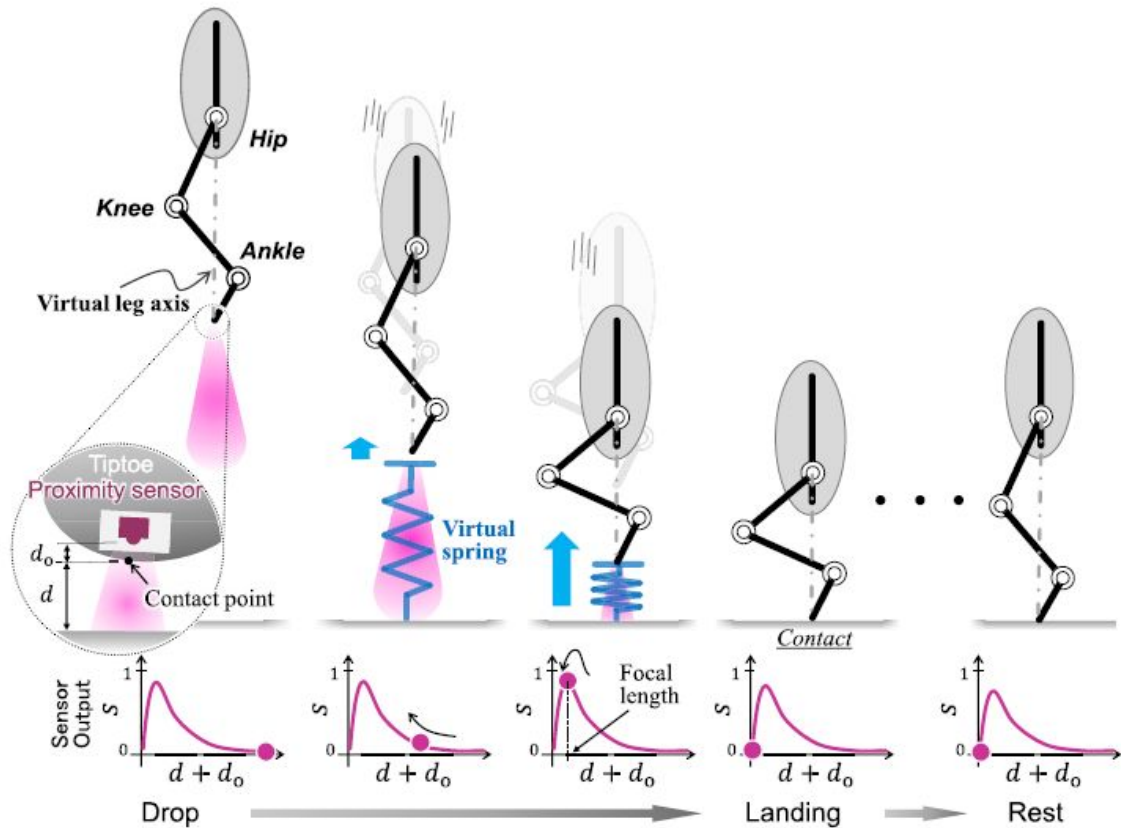


図 2：仮想的な弾性力を用いて着地衝撃を緩和する制御

2つ目は、2指平行グリップによる把持に関する成果である。の成果で述べたアドミッタンス制御をベースにした仮想的な反力を用いる制御手法を応用し、「2指同時接触」+「衝撃緩和」+「把持力調整」を1つの制御則で実現することに成功した。2指が同時に接触することは、倒れやすい物体の把持などを可能にする。本成果は実機を用いた実験でも効果を確認できており、現在は国際学会誌投稿に向けて実験データを整理している。

【 の成果】

等身大の産業用ロボットのリンクを全体的に被覆可能な比較的大型の近接覚センサを開発した(図3)。近接覚センサは小型のセンサ素子を複数用いて構成されるため、センサ素子をロボット表面に分散配置して全身に検出範囲を拡大すること自体は難しくない。このときに問題になるのは、センサ素子の個数が増えるほど応答性が損なわれることである。一つ一つのセンサ素子の出力を個別に取得して用いる既存の方法では、250Hz程度の応答周波数が限界であり、反射的な動作が必要となる接触遷移制御に用いるには心もとない。これに対して本研究では、リンクを覆う素子すべての出力をアナログ演算回路(図4)を用いて統合し、「仮想的な合力」を出力する近接覚センサを開発した。個別に出力を取得することなく、アナログ回路で並列処理を行うため高速応答を実現することができ、132個の検出素子を繋いだ場合でも10kHz以上の応答周波数を達成した。

さらに、開発したセンサの有用性を示す応用例として、実際に6自由度の等身大産業用ロボットアームにセンサを実装し、人間の掌に対する反射的な回避行動を簡単に生成できることを示した。使用した制御則は仮想的な弾性力の合力を用いるものであるため、やの成果を組み合わせることで全身の接触遷移の実現が見込める。ただし、本研究では定量的な評価に必要な実験装置が不足したため、実施は見送った。

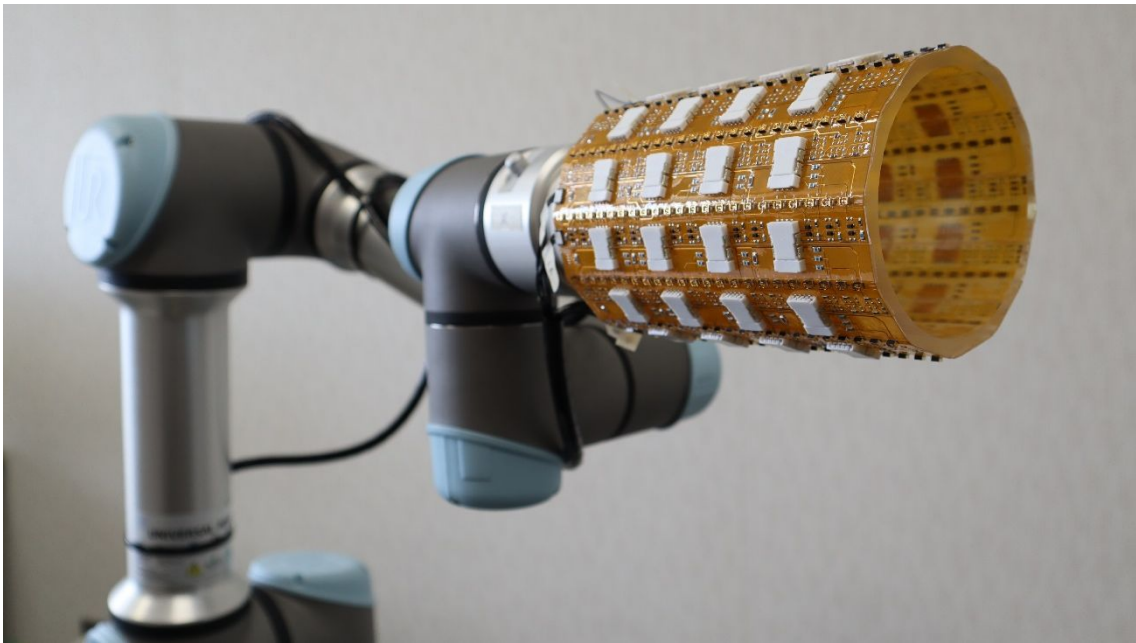


図3：リンクを被覆できる高速な近接覚センサ

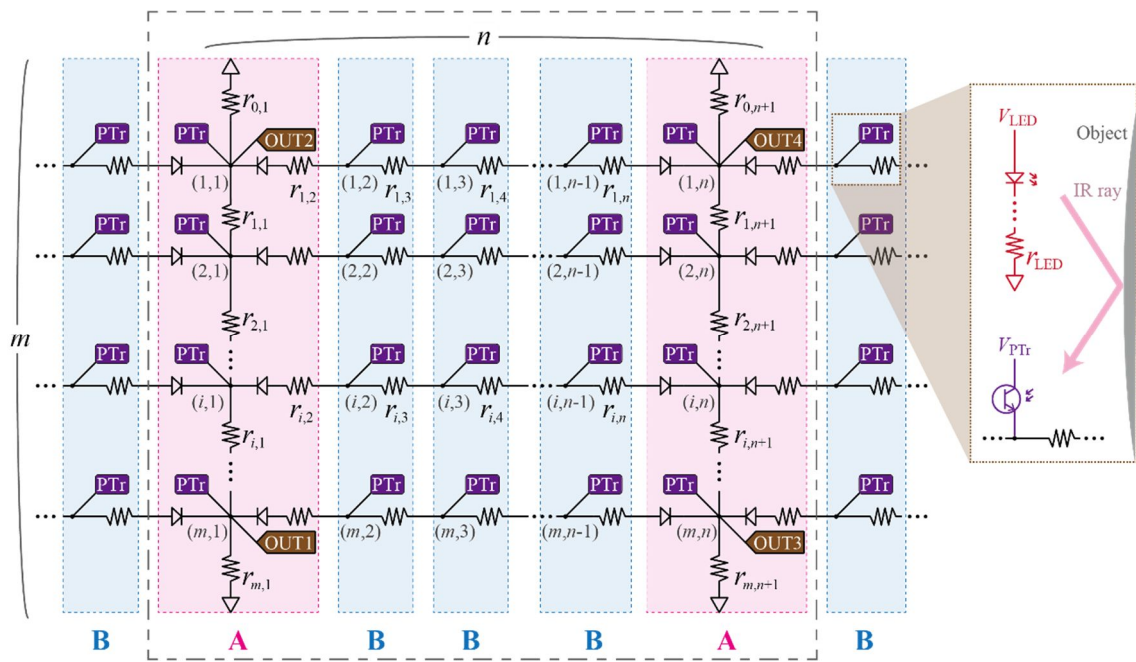


図4：開発したアナログ演算回路

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Arita H., Suzuki Y.	4. 巻 35
2. 論文標題 Contact transition control by adjusting emitting energy of proximity sensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 93 ~ 107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2020.1848622	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 Arita Hikaru, Nakamura Hayato, Fujiki Takuto, Tahara Kenji	4. 巻 39
2. 論文標題 Smoothly Connected Preemptive Impact Reduction and Contact Impedance Control	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Robotics	6. 最初と最後の頁 3536 ~ 3548
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/tro.2023.3286045	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 -

1. 著者名 Arita Hikaru	4. 巻 37
2. 論文標題 A fast optical proximity sensor skin that contains an analog computing circuit and can cover an entire link	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1083 ~ 1099
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2023.2239320	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中村隼, 有田輝, 田原健二
2. 発表標題 光学式近接覚センサとアドミッタンス制御を用いた衝撃力低減手法の検討
3. 学会等名 第23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 2022年

1. 発表者名 中村隼 , 有田輝 , 田原健二
2. 発表標題 近接覚センサを用いた力制御におけるセンサ出力のモデル化による 実験データに基づく解析の基礎検討
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 有田輝 , 中村隼 , 田原健二
2. 発表標題 近接覚に基づく粘弾性を用いた接触遷移制御の基礎検討
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村隼 , 有田輝 , 鈴木陽介 , 田原健二
2. 発表標題 近接覚センサを用いた衝撃緩和制御に対するセンサ出力の指数関数モデルによるパラメータ設計手法
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 常盤 俊介 , 有田 輝 , 田原 健二
2. 発表標題 近接覚センサを用いた多重インピーダンス制御による把持時の各指同時接触と衝撃緩和の実現
3. 学会等名 第24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(SI2023)
4. 発表年 2023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
---------	---------