

令和 4 年 5 月 17 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14952

研究課題名（和文）協調ロボットの安全性、作業性向上のための近接覚・触覚センサモジュールの開発

研究課題名（英文）Development of proximity and tactile sensor module to improve safety and operability of cooperative robot

研究代表者

辻 聡史 (Tsuji, Satoshi)

福岡大学・工学部・助教

研究者番号：40632021

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）：協調ロボット（協働ロボット）の安全対策として、ロボットの皮膚となり、非接触及び接触測定が可能な近接覚・触覚センサの開発を行った。本研究では主に、（１）ToF・自己容量近接覚・接触センサ、（２）ToF・自己容量近接覚・触覚センサ、（３）エンドエフェクタのためのライトカーテンを考案した。試作したセンサをロボットアームに実装し、非接触及び接触測定が可能であり、得た情報によりロボットアームを制御可能であることを実験により示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、人と同じ場所で、人と協働して作業できる協働ロボットが注目されている。これらのロボットが安全に作業するには、ロボットと人との衝突を避けることが重要であり、ロボット周囲の状態を常に測定する必要がある。更に安全、確実に作業するためには、対象との接触状態を検出し、その情報をフィードバックさせロボットを操作することも重要である。そのためのセンサの一つとして、ロボット表面を覆う触覚センサや近接覚センサがあげられる。本研究で提案した近接覚・触覚センサは、協働ロボットの安全対策の一つになりえると考えられる。

研究成果の概要（英文）：As a safety measure for collaborative robots, we have developed proximity and tactile sensors that can detect objects with and without contact. In this study, we mainly proposed 3 sensors that (1) proximity and contact sensor by combining ToF (Time-of-Flight) and self-capacitance sensors, (2) proximity and tactile sensor by combining ToF and self-capacitance sensors, and (3) safety light curtain using ToF sensors for end effector. We showed that these prototype sensors mounted on the robot arm can detect objects at proximity range and on contact. In addition, the robot arm was controlled using measurement data.

研究分野：センサ工学

キーワード：協働ロボット 触覚センサ 近接覚センサ

1. 研究開始当初の背景

近年、人と同じ場所で、人と協働して作業できる協調ロボット（協働ロボット）が注目されている。これらのロボットが安全に作業するには、ロボットと人との衝突を避けることが重要である。そのためにはロボット周囲の状態を常に測定する必要がある。更に安全、確実に作業するためには、対象との接触状態を検出し、その情報をフィードバックさせロボットを操作することも重要である。そのためのセンサの一つとして、ロボット表面を覆う触覚センサや近接覚センサがあげられる。これまでに、協働ロボットのための様々な触覚センサ及び近接センサの研究・開発が行われているが、標準デバイスとして確立されたものはない。

2. 研究の目的

協働ロボットの皮膚となる触覚センサの標準デバイスの確立を目指し、ロボット表面全体を覆うセンサシステムの確立を目的とした。そのために自己容量センサと ToF(Time-of-Flight)センサを複合した近接覚・触覚センサの開発を行った。試作したセンサでロボット全体を覆うことにより、ロボット表面において非接触及び接触測定が可能なセンサの実現を目標とした。

3. 研究の方法

上記の目標に向け、主に下記の3つのセンサを考案し、試作したセンサを用い、実験によりセンサの有用性を検証した。

（1）ToF・自己容量近接覚・接触センサ

非接触における対象までの距離が検出可能な ToF センサと自己容量センサを組み合わせた ToF・自己容量近接覚・接触センサを提案した。ToF センサは、Z 軸方向の広範囲に距離検出が可能であるが、指向性が高いため近距離において X-Y 軸方向の測定範囲が狭く死角が生まれやすい課題がある。また、ToF センサは光の反射時間計測を行っていることから近距離における測定精度に課題があり、接触の有無を判別することは難しい。一方、自己容量センサは、単電極と接地間の静電容量の変化を測定することにより、近距離の対象を検出できる。図 1 のように自己容量センサと ToF センサを組み合わせることにより、広範囲に死角がない対象検出が期待できる。まず、1 個の ToF センサと 1 個の自己容量センサの電極を組み合わせた ToF・自己容量近接覚・接触センサを試作し、近接及び接触測定について実験により検証した。更に 25 個の ToF・自己容量近接覚・接触センサモジュールを作製し、ロボットアームに実装し、センサによる測定及び測定した情報によるロボットアームの制御について検討した。次に、上記のセンサの近接測定における死角の低減のために、自己容量センサの大きな電極に複数の ToF センサを配置した ToF・自己容量近接覚・接触センサを試作し、近接及び接触測定について実験により検証した。更に試作したセンサをロボットアームに実装し、センサによる測定及び測定した情報によるロボットアームの制御について検討した。

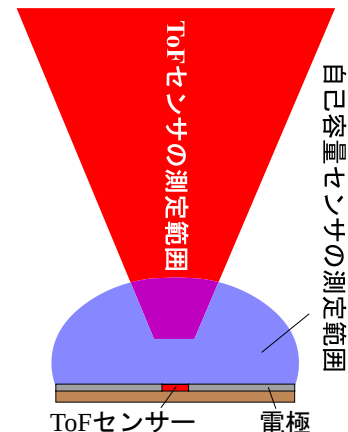


図 1：ToF・自己容量近接覚・接触センサの測定イメージ

（2）ToF・自己容量近接覚・触覚センサ

上記（1）では、近接測定及び接触測定が可能である。しかしながら、タッチパネルのように接触の有無の測定は可能であるが、接触状態の測定が難しい課題があった。そこで、近接から接触状態まで検出する手法として ToF・自己容量近接覚・触覚センサを提案した。1 個の ToF センサと自己容量近接覚・触覚センサを組み合わせた ToF・自己容量近接覚・触覚センサを試作し、近接及び接触状態の測定について、実験により検証した。更に 16 個の ToF・自己容量近接覚・触覚センサモジュールを作製し、ロボットアームに実装し、センサによる測定及び測定した情報によるロボットアームの制御について検討した。

（3）エンドエフェクタのためのセーフティライトカーテン

上記（1）（2）とは、別のアプローチとして、ロボットのハンドなどのエンドエフェクタとワークの安全対策として ToF センサを用いたセーフティライトカーテンを提案し、センサを試作した。エンドエフェクタは、通常ワークの形状や作業内容により形状が様々であり、エンドエフェクタ毎に安全対策を講じることは、コストが必要になる。本ライトカーテンは、図 2 のようにエンドエフェクタの上部に設置され、エンドエフェクタ毎にセンサを設計する必要がなく、様々なエンドエフェクタへの利用が期待できる。試作したライトカーテンを用い、エンドエフェクタ及びワーク周辺の測定について、実験により検証した。



図 2：セーフティライトカーテンのイメージ

4. 研究成果

上記に対する成果についてそれぞれ述べる。

(1) ToF・自己容量近接覚・接触センサ

1 個の ToF センサと 1 個の電極で構成される ToF・自己容量近接覚・接触センサを試作した。試作したセンサ同士はコネクタにより接続でき、ロボットの実装面に合わせ自由に取り外し可能である。試作したセンサで近接及び接触測定について確認を行った。その結果、使用した ToF センサは約 300 mm 離れた位置から対象までの距離を検出できることを確認した。また、近距離における精度が低下することを確認した。一方、自己容量センサは、近距離における対象を検出できることを確認した。更に、自己容量センサは人との接触を検出できることを確認した。また、ToF センサ及び自己容量センサによる非接触の X-Z 軸における検出範囲を確認し、近距離における ToF センサの死角を自己容量センサにより補足可能であることを確認した。これにより、ToF・自己容量近接覚・接触センサは 300 mm から接触までシームレスな測定が可能であることを示した。次に図 3 に示すように試作センサを 24 個作製し、ロボットアームに実装した。これにより ToF・自己容量近接覚・接触センサは、ロボット表面にて近接及び接触測定が可能であることを示した(図 4)。更にセンサ情報に基づいてロボットアームをリアルタイムに制御可能であることを示した。これらの成果は、IEEE Sensors Journal (2020 年 5 月)に掲載されている。

上記センサは、多数の小型のセンサでロボットを覆うことを想定していることから電極が小さく、自己容量センサの非接触検出範囲が狭い。そのため ToF センサの検出範囲と自己容量センサの検出範囲の間に死角が生じる課題があった。そこで、死角の低減のために自己容量測定用の大きな電極に複数の ToF センサを配置した ToF・自己容量近接覚・接触センサを提案し、試作を行った。試作した ToF・自己容量近接覚・接触センサを用い、近接測定、接触測定、及び近接における X-Z 検出範囲について実験で確認を行った。その結果、提案した ToF・自己容量近接覚・接触センサにより 400 mm から接触までシームレスな測定が可能であることを示した。試作したセンサをロボットアームに実装し、ロボットアームが移動中におけるロボットアーム周辺の近接及び接触測定が可能であることを示した。更に、測定した情報に基づいてリアルタイムにロボットアームを制御できることを示した。これらの成果は、電気学会論文誌 E (2021 年 6 月)に掲載されている。これらのことから、ToF・自己容量近接覚・接触センサの有用性が示せたと考える。

(2) ToF・自己容量近接覚・触覚センサ

上記(1)に加え、接触状態の測定を行うために、ToF センサと我々が以前提案した自己容量近接覚・触覚センサを融合した ToF・自己容量近接覚・触覚センサを提案し、センサを試作した。試作したセンサ同士はコネクタにより接続でき、ロボットの実装面に合わせ自由に取り外し可能である。試作したセンサで近接及び接触状態測定について確認を行った。その結果、約 300 mm 離れた位置から接触状態までシームレスに測定可能であることを示した。次に図 5 に示すように試作センサを 16 個作製し、ロボットアームに実装し、ToF・自己容量近接覚・触覚センサによりロボット表面にて近接及び接触状態測定が可能であることを示した(図 6)。更に、センサ情報に基づいてロボットアームをリアルタイムに制御可能であることを示した。これらの成果は、IEEE Sensors Journal (2022 年 1 月)に掲載されている。これらのことから、ToF・自己容量近接覚・触覚センサの有用性が示せたと考える。



図 3：ロボットアームに実装した ToF・自己容量近接覚・接触センサ

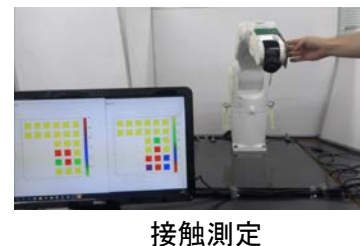


図 4：ToF・自己容量近接覚・接触センサの測定の様子



図 5：ロボットアームに実装した ToF・自己容量近接覚・触覚センサ

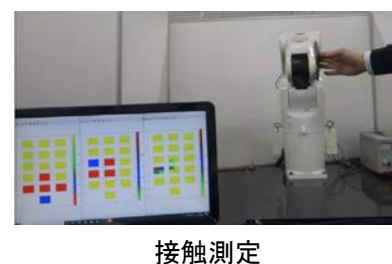


図 6：ToF・自己容量近接覚・触覚センサの測定の様子

(3) エンドエフェクタのためのセーフティライトカーテン

協働ロボットのエンドエフェクタ及びワークの安全対策のために ToF センサを用いたライトカーテンを提案した。試作したライトカーテンは、24 個の ToF センサで構成される。ToF センサは正 24 角形ベースプレートに 15°間隔で設定され、エンドエフェクタに対する角度は 45°である。試作したライトカーテンをロボットアームに実装し、エンドエフェクタ及びワーク周囲の対象を非接触で検出できることを実験で示した(図 7)。また、ライトカーテンで測定した情報によりロボットアームを制御し、予期せぬ衝突を回避できることを実験で示した。これらの成果は、IEEE TEEE (2020 年 12 月)に掲載されている。これらのことより、提案したライトカーテンは、協働ロボットのエンドエフェクタの安全対策として有用であると考えられる。

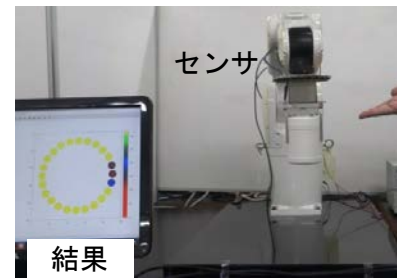


図 7: セーフティライトカーテンの測定の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Tsuji Satoshi、Kohama Teruhiko	4. 巻 22
2. 論文標題 Sensor Module Combining Time-of-Flight With Self-Capacitance Proximity and Tactile Sensors for Robot	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 858～866
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSEN.2021.3130230	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 辻聡史、小浜輝彦	4. 巻 141
2. 論文標題 複数のToFセンサを用いたToF・自己容量複合近接覚・接触センサ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌E	6. 最初と最後の頁 197～204
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejsmas.141.197	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 Tsuji Satoshi、Kohama Teruhiko	4. 巻 20
2. 論文標題 Self-Capacitance Proximity and Tactile Skin Sensor With Shock-Absorbing Structure for a Collaborative Robot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 15075～15084
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSEN.2020.3011701	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 Tsuji Satoshi、Kohama Teruhiko	4. 巻 15
2. 論文標題 A General - Purpose Safety Light Curtain Using ToF Sensor for End Effector on Human Collaborative Robot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1868～1874
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.23258	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 Tsuji Satoshi, Kohama Teruhiko	4. 巻 20
2. 論文標題 Proximity and Contact Sensor for Human Cooperative Robot by Combining Time-of-Flight and Self-Capacitance Sensors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 5519～5526
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSEN.2020.2969653	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 1件)

1. 発表者名 辻聡史、小浜輝彦
2. 発表標題 協働ロボットのためのToF・自己容量近接覚・触覚センサの提案
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会'21
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻聡史、小浜輝彦
2. 発表標題 複数のToFセンサを用いたToF・自己容量複合近接覚センサの提案
3. 学会等名 第37回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム(センサ・マイクロマシン部門大会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻聡史、小浜輝彦
2. 発表標題 協働ロボットのエンドエフェクタのためのToFセンサを用いたライトカーテンの提案
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会'20
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Tsuji, Rei Nakamura, Teruhiko Kohama
2. 発表標題 Development of Expandable Self-Capacitive Proximity and Tactile Sensor Module
3. 学会等名 The 7th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻聡史, 小浜輝彦
2. 発表標題 近接測定のためのToF・静電容量複合センサの提案
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会'19
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

福岡大学研究者情報 https://resweb2.jhk.adm.fukuoka-u.ac.jp/FukuokaUnivHtml/info/5889/R110J.html?P=1617684327042
--

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