

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12072

研究課題名（和文）近接覚センサに基づく非接触の触探索動作による高精度物体形状認識手法の開発

研究課題名（英文）Development of high-precision object shape recognition method using non-contact exploration based on proximity sensors

研究代表者

鈴木 陽介（Yosuke, Suzuki）

金沢大学・フロンティア工学系・准教授

研究者番号：20582331

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：この研究では、ロボットが人の代替となり器用な手作業を行うための、指先のセンサの開発とこれを用いた未知物体の形状認識技術の開発を行った。指先のセンサは非接触のまま近傍の物体を認識でき、物体との意図せぬ接触を避けながら周囲をなぞることで、手探りするように物体形状を推定することができる。研究成果として、様々な用途で使用可能なセンサ設計を実現した。また、局所的な曲率推定と併せた全体形状推定を行うことで推定精度を向上させる手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医療・福祉や農業など生活基盤を支える仕事は多くの手作業を含み、ロボットによる代替を行うには未知の物体であっても器用に扱う能力が必要と考えられる。物体を器用に操るには物体の形状を正確に認識する必要がある。本研究成果は、ロボットが指先の感覚を用いて物体の形状を認識することを可能とするものである。指先で探るため視覚のような死角が少なく、また意図せぬ接触を避けられるため安全性にも寄与する。指先のセンサは様々なロボットに実装しやすいモジュール設計を採用しており、汎用性も高いと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a fingertip sensor and a shape recognition technique for unknown objects to enable a robot to perform dexterous manipulation in place of a human. The fingertip sensor can recognize nearby objects without contact, and can estimate the shape of an object by tracing its circumference while avoiding unintentional contact with the object, as if groping. As a result of our research, we have realized a sensor design that can be used in a variety of applications. We have also developed a method to improve the estimation accuracy by estimating the overall shape in combination with local curvature estimation.

研究分野：ロボティクス

キーワード：近接覚センサ 点群生成 ロボットハンド 形状認識

## 1. 研究開始当初の背景

物体把持・操りの問題は、ロボットの利用範囲が拡大されるに伴い、環境や対象物の数値モデルが不確定性を含む場合への対応が求められている。不確定な対象との接触の問題は、機構の柔軟性により緩和する手法が多く用いられる。しかし、医療・福祉や農業など、社会基盤を支える手作業を代替するにはより精密な把持・操りの能力が必要と考えられる。これを可能とするには、物体一つ一つに対する抽象化を伴わない詳細な物体形状モデルが必要とされるが、物体把持・操りのための実用的な 3 次元形状認識技術が不十分であった。一方、本研究代表者はロボットの指先に搭載した近接覚センサによる非接触センシングに基づく 3 次元点群形式での物体形状認識技術を提案していた。

## 2. 研究の目的

この研究では、近接覚センシングに基づいて未知物体に対する無死角・高精度・高密度の点群を生成する手法の開発を目的とした。具体的には、多指ロボットハンドの全ての指先に光の反射を用いた近接覚センサを搭載し、物体の周囲を近距離かつ非接触でなぞる(非接触手探り動作と呼ぶ)ことで、多様な方向から物体表面が存在する座標を取得する手法の開発である。そのため、未知物体との距離を維持するための近接覚情報に基づく運動制御技術と、各時刻の近接覚情報から局所的な物体表面形状を推定する技術を含む、統合的な制御システムの開発を本研究の目的とした。

## 3. 研究の方法

研究課題として、第一に高精度 3 次元形状モデルを構築可能な近接覚センサおよび情報処理システムの開発、第二に非接触手探り動作の制御アルゴリズムの開発を設定した。前者に関して、高応答の反射的な接触回避制御のための高サンプリングレートおよび反射光分布から局所形状を認識するための十分な解像度を有する近接覚センサと処理システムの設計を行った。このとき、光学素子の指向特性と位置関係が重要な設計パラメータとなる。さらに指先としての機能やセンサの汎用性も考慮して機構と回路の詳細設計を行った。後者に関して、未知物体に対して網羅的かつ十分な密度の点群情報を適応的かつ合目的に収集するためのプランニングが重要と考えられる。そこで、触探索の過程で情報欠落部分を逐次推定して効率的に全体を探索する方法、また、物体把持・操りを実行する上で重要となる特徴的な局所形状などの関心領域に基づき探索する方法の開発を行うことを計画した。

## 4. 研究成果

課題 1 のセンサ開発として、近接覚情報に基づく反射動作生成 / シンプルな制御則による接近・接触動作生成 / 対象物表面の局所形状認識を実現するためのセンサ設計開発を行った(図 1a)。このセンサは球冠形状の指先に被覆実装可能であり、ロール・ピッチの 2 方向に  $\pm 40^\circ$  の検出範囲を持つように設計された。広い検出範囲と等方性ある指先形状により、接近物体の方位を検出して反射的な動作生成による接近状態の制御が容易となるようにした。また、センサ表面を透明樹脂で覆うことで、生活空間でのタスク遂行において問題となる水濡れや破損のリスクに対応した。これは透明樹脂内部での赤外光の反射経路を制限する設計によって達成された。

また、さらなる改良として、(a) 物体形状をより詳細に取得するための LED 素子の追加実装、(b) Time-of-Flight 方式の近接覚素子との統合を行った。特に改良(b)は重要であり、これまでの光の反射強度によって物体形状を推定する手法で欠点となる反射率の影響を、Time-of-Flight 方式と併用することで補正するものである。ここで、上記補正を実行する条件ごとの補正精度に関する実験調査を行い、実機の把持プロセスを想定したアプローチ過程での最適な補正条件に関する研究成果を得た。

最終的に、センサシステムの様々なロボットプラットフォームへの展開を可能とするためのモジュール型設計を可能とした。近接覚センサ部、透明カバー部、追加センサ部およびベース部を用途や利用環境に応じて選択可能とした(図 1b)。

課題 2 の 3 次元形状取得について、まず、ある時刻において近接覚センサが観測している対象物表面上の局所領域における曲率を精度良く推定する手法の開発を進めた。その理由は、近接覚センサの出力値から空間上の対象物表面を示す点群を生成する際の精度において、曲率の存在によるキャリブレーション誤差の影響が大きいためである。そこで未知形状の対象物に対して、点群生成と局所曲率推定に基づく補正を繰り返し行う手法を開発した(図 2)。また、非接触による探索動作を行う際に物体表面との成す角の影響を考慮した点群生成の補正の導入を行った。

結果として部分的な精度向上は確認されたが、局所曲率推定には主にハードウェアに起因するばらつきの影響への対応が重要であるという課題が発見された。

上記課題に対応するため、取得した点群の誤差を考慮した物体表面形状推定を新たな問題として設定した。触探索の進展に伴い追加される点群から統計的に物体表面を推定し、点群が疎な領域への探索動作を計画するための手法に関する開発を進めた。



図1 開発した近接覚センサ (a: 近接覚センサ外観, b: モジュール型設計)

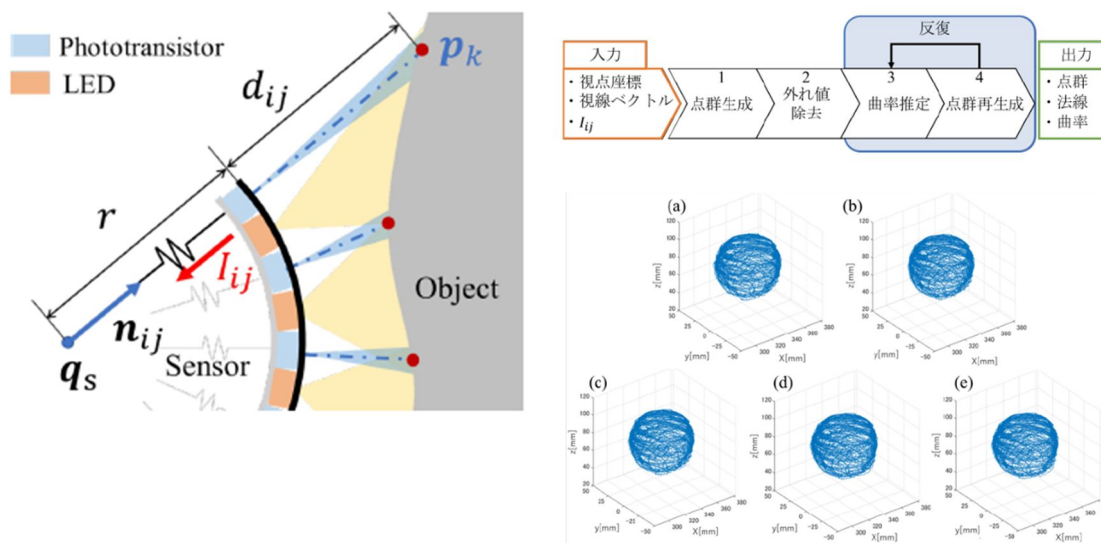


図2 局所曲率推定に基づく点群生成の流れおよび結果の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Suzuki Yosuke, Yoshida Ryoya, Tsuji Tokuo, Nishimura Toshihiro, Watanabe Tetsuyou	4. 巻 7
2. 論文標題 Grasping Strategy for Unknown Objects Based on Real-Time Grasp-Stability Evaluation Using Proximity Sensing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 8643 ~ 8650
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2022.3188885	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 Suzuki Yosuke, Yoshida Ryoya, Tsuji Tokuo, Nishimura Toshihiro, Watanabe Tetsuyou	4. 巻 35
2. 論文標題 Local Curvature Estimation and Grasp Stability Prediction Based on Proximity Sensors on a Multi-Fingered Robot Hand	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1340 ~ 1353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2023.p1340	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木陽介, 吉田涼哉, 辻徳生, 西村斉寛, 渡辺哲陽
2. 発表標題 近接覚センサを搭載した多指ロボットハンドによる局所形状計測と把持安定性予測
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022 in Sapporo
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木宥, 鈴木陽介, 西村斉寛, 辻徳生, 渡辺哲陽
2. 発表標題 近接覚センシングに基づく3次元形状再構成 - 対象物の曲率およびセンサとの相対姿勢を考慮した補正による点群の高精度化 -
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 佐々木宥、鈴木陽介、辻徳生、渡辺哲陽
2. 発表標題 近接覚センシングに基づく局所的な曲率を考慮した 3 次元形状再構成
3. 学会等名 第22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 2021年

1. 発表者名 鈴木陽介
2. 発表標題 球冠状指先表面に実装可能な階層式近接覚センサの開発
3. 学会等名 第22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 2021年

1. 発表者名 鈴木陽介
2. 発表標題 反射光強度とTime-of-Flightを併用した近接覚センサの距離推定精度の検証
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2023 in Nagoya
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木陽介, 伊藤崇良, 坂井響
2. 発表標題 エンドエフェクタ用半球状近接覚センサモジュールの開発
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
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
---------	---------