

令和元年6月21日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06179

研究課題名(和文) 高度な作業を実現する複数対象物把持の解析と設計

研究課題名(英文) Analysis and design of grasping multiple objects for realization of advanced tasks

研究代表者

山田 貴孝 (YAMADA, Takayoshi)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：00273318

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)：ロボットハンドは様々な形状を把持できる。本研究課題では、多指ハンド把握系の安定性解析と最適把持位置の設計を行った。(1)デプスカメラで3次元点群を取得し、2次元把持位置の生成とロボットハンドによる把持を行った。(2)把持の安定性は、把持の剛性行列を求め、その固有値と固有ベクトルを用いて評価することができる。把持位置を表すパラメータを用いて、剛性行列を偏微分することで、把持位置パラメータの変動と剛性行列の変動との関係を明らかにした。(3)二次元平面内の包み込み把持の安定性を解析した。関節変位だけでなく、指の腹の変位にもばね特性を設定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生産工程では、組立作業を始めとする様々な作業が求められている。その多くは、予め手順が決められた機械的作業である。このため、作業には精神的・肉体的負担が大きい。作業者がこれまで行ってきた一連の作業には、様々な対象物のハンドリング作業が含まれている。人間の手は様々な形状の対象物を器用に把持できる。作業を自動化するためには、人間の手に似た多関節型の多指ハンドが有効と考えられる。多指ハンドを活用するためには、ハンドリングの特性を解析することが重要である。そこで、本研究課題では、多指ハンド把握系の安定性を解析した。この安定性の観点から、最適把持の設計にも取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：A multi-fingered hand can grasp various shaped objects. In this research project, grasp stability analysis of a multi-fingered hand was analyzed and design of the optimum grasping position was performed. (1) A three-dimensional point cloud was acquired with a depth camera, and a two-dimensional grasp position was generated and then grasped by a robot hand. (2) The grasp stability can be evaluated by calculating the grasp stiffness matrix and using its eigenvalues and eigenvectors. By partially differentiating the stiffness matrix using parameters representing the grasp position, we clarified the relationship between the variation of the grasp position parameter and the variation of the stiffness matrix. (3) We analyzed the stability of the enveloping grasp in two dimensions. The spring characteristics were set not only for joint displacement but also for finger surface displacement.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ロボット 多指ハンド 把握系の安定性 接触状態の同定 組立作業 柔軟物の作業

1. 研究開始当初の背景

人間の手は、様々な形状の対象物を器用に把持し、操ることが出来る。さらに、複数対象物をも器用に把持し、操ることができる。人間は、このような能力を用いて、組立作業を始めとする様々な作業を実現している。生産工程では、一連の様々な作業により構成されているが、その多くは手順の決められた機械的作業である。今なお、多くの工程を人間の作業者が行っており、精神的・肉体的負担が大きい。生産工程において、人間のような器用さを用いて作業を実現するためには、人間の手に似た多関節型の多指ハンドが有効と考えられる。そこで、本研究課題では、多指ハンド把握系の安定性を解析する課題に取り組んだ。従来研究の多くは、次のような問題点や解決すべき課題がある。指先と対象物との接触が転がりに限定されている。また、把持の誤差解析は扱われていない。機械油などで部品表面が滑りやすい場合や、氷のように摩擦係数が小さい場合には、滑り接触として適切な把持を設計する必要がある。表面特性の事前情報が無く、摩擦係数が未知の場合、滑り接触と仮定して、安定な把持を設計する必要がある。ただし、転がり接触の方が安定性が高いことを理論的に証明する必要がある。

2. 研究の目的

人間の手は複数の対象物を器用に把持し、操ることができる。人間の手に似た多関節型の多指ロボットハンドには、同様の器用さを実現する潜在能力がある。この能力を引き出し、高度な作業を実現し、ハンドリング作業の効率化を目指すため、次の研究課題を実施する。

- (1) 多指ロボットハンドにより把持された対象物について、把持の安定性を解析する。
- (2) 把持の誤差解析を行い、把持パラメタの変動の効果を明らかにする。
- (3) それらの成果を基に、適切な把持を自動生成する手法を開発する。

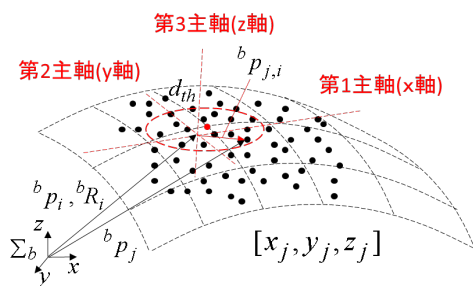
3. 研究の方法

一連の様々な作業において、任意形状の対象物を把持することを想定し、ロボットハンドには多関節型の多指ハンドを対象とする。仮想的なばね特性を多指ハンドの関節に設定する。把持対象物の位置・姿勢変位および多指ハンドのリンク系の変位を同次変換行列を用いて詳細に導出する。対象物表面および指表面の形状を曲率を用いて表現する。さらに、接触の拘束条件を用いて、対象物変位と関節変位との関係を明らかにする。接触点での滑りあるいは転がりを考慮し、把握系のポテンシャル・エネルギーを導出する。把握系の独立変数を明らかにし、ポテンシャル・エネルギーの一階偏微分より力・モーメントを、二階偏微分より剛性行列を導出する。接触点近傍の曲率の影響、指の腹の柔らかさの影響も解析する。

4. 研究成果

本研究課題を通して、次の研究成果を得た。

ロボットハンドは多様な形状を把持できる。しかし、安定性を考慮した把持を行うには、最適把持位置の生成が重要である。デプスカメラで3次元点群を取得し、2次元把持位置の生成とロボットハンドによる把持を行った。また、3Dモデルを生成し、探索に適した対象物形状のデータ点群を生成することで、実際の物体に対する3次元最適把持位置を生成した。



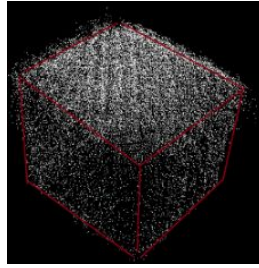
(a) 点群と対象物表面の表現



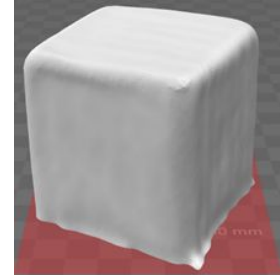
(b) 実験システム



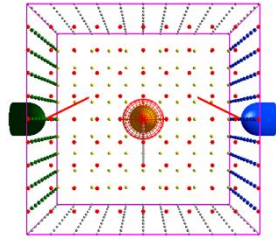
(c) 対象物の例



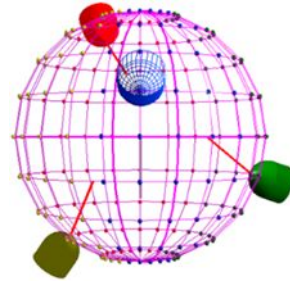
(d) Depth カメラで取得された点群



(e) 表面の視覚化



(f) 立方体形状の最適把持位置の例

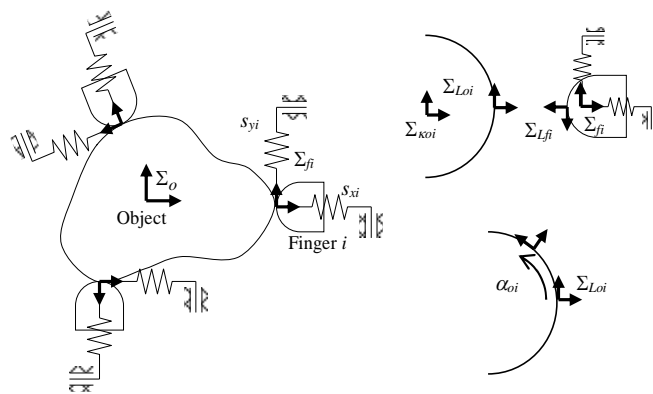


(g) 休憩場物体の最適把持位置の例

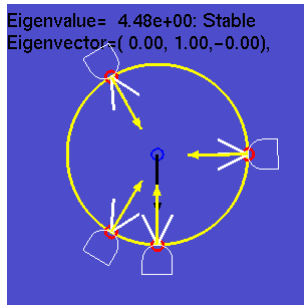
図 1 : 3次元点群と最適把持位置

これまで人間が行ってきた高度な作業を，ロボット支援により行うには，人間が持つ手先の器用さの実現が必要である．特に，組立作業などの複雑な作業を支援するには，接触状態の検出と制御が不可欠である．そこで，本研究では，ロボットアームのセンシング動作を模擬する装置を構築した．そして，多指ハンドの各指先のセンサを用いて，把持対象物と外部環境との接触状態を同定する問題を扱った．

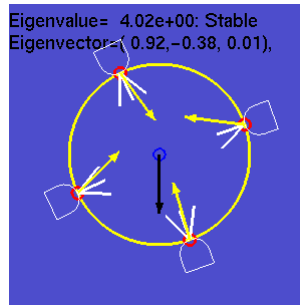
把持の安定性は，把持の剛性行列を求め，その固有値と固有ベクトルを用いて評価することができる．把持位置を表すパラメタを用いて，剛性行列を偏微分することで，把持位置パラメタの変動と剛性行列の変動との関係を明らかにした．把持の安定性が向上する方向に，把持位置を自動調整するアルゴリズムを提案した．数値例を用いて提案手法の有効性を確認した．実際に RGB カメラ，ロボットハンド，ロボットアームを用いた実験では，物体形状を画像から取得し，把持パラメタとして計算に必要な対象物表面の法線ベクトルを算出した．提案手法を用いて最適把持位置を自動生成し，実験で有効性を確認した．



(a) 二次元把握系の設定と指先位置のパラメタ



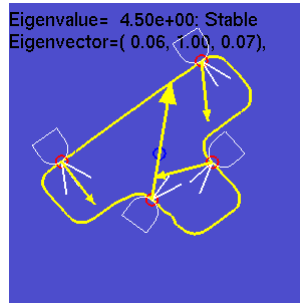
(c) 初期設定の把持位置



(d) 最適化された把持位置



(g) 実験に用いた T 型パイプ



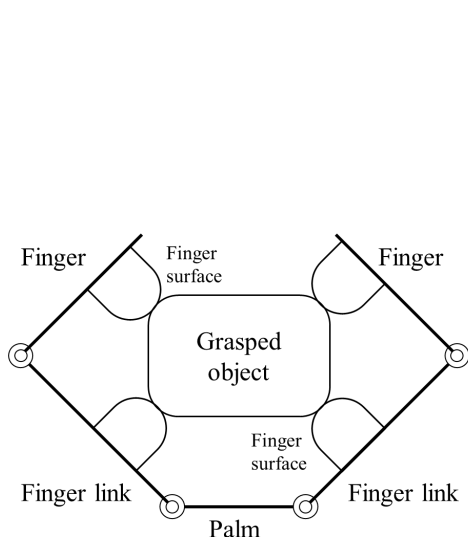
(h) T 型パイプの形状認識と最適把持

図 2：提案手法を用いた把持位置の最適化

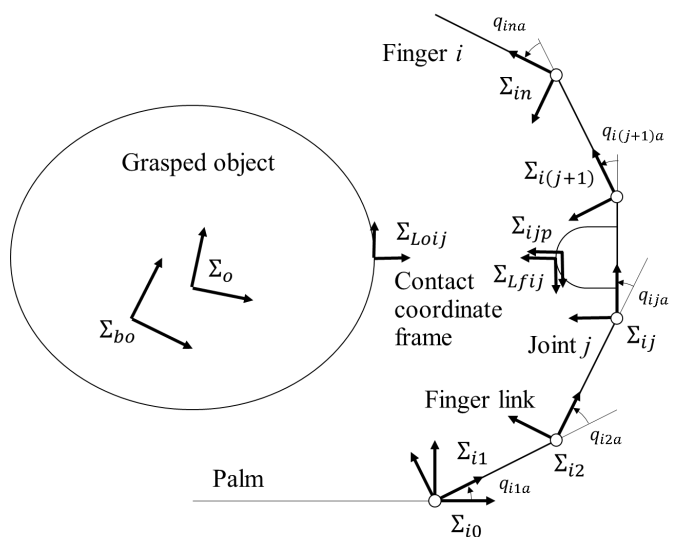
ノイズを含む 6 軸力から、接触点位置と接触力の両方を推定した。接触の種類を点接触と仮定し、モーメント成分のノイズと力成分のノイズの両方を考慮した、最小化問題を用いた。接触点位置の候補を力の作用線として推定した。さらに、接触力を解析的に導出した。接触点位置と接触力は、評価関数に含まれる重み係数のみに依存し、その特性を明らかにした。

掌に小型 RGB-D カメラを装着し、指先に 6 軸力センサを搭載した 4 指 12 自由度ハンドを使用して工具を把持し、ボルトを締め付ける作業を研究した。また、その前段階である治具設置方法の改善を研究した。治具設置方法の改善では治具の位置修正動作に関して時間の短縮を行うことができた。また、実機を用いてボルト締め付けの実験を行い、ボルトを窪みの奥まで締め付ける事に成功した。しかし、確実ではなく、ボルト頭と工具の位置が合わないことにより失敗することがあった。

二次元平面内の包み込み把持の安定性を解析した。関節変位だけでなく、指の腹の変位にもばね特性を設定した。指リンクと把持対象物との接触の拘束条件を導出し、独立な変数を明らかにした。その独立変数を用いて、把握系のポテンシャル・エネルギーを導出した。そして、滑り接触の場合について、一階偏微分より力・モーメントを、二階偏微分より剛性行列を求めた。剛性行列を接触点近傍の曲率で偏微分することで、曲率の効果を明らかにした。



(a) 包み込み把持のモデル



(b) 対象物と指リンクの座標系の設定

図 3：包み込み把持の解析

深層学習を用いて、指先と把持対象物との接触点位置と接触方向を推定する研究を行った。接触種類は点、ソフトフィンガ、線、面の4種類である。ハンド指先を9つの領域に分割し、領域ごとに接触の有無を推定した。学習データはハンド指先のセンサで取得される6軸力覚データを模して作成した。深層学習には全結合のDNNを用いた。入力層は60ユニット、出力層は9ユニット、正誤判定は分割された領域ごとに行った。全体で91.8%という精度で推定が可能であり、接触状態の同定に深層学習を用いることの有用性を示した。

ロボットを用いた治具自動組立の研究を行った。掌にRGB-Dカメラを装着した4指12自由度ハンドを使用し、LINEMODを用いた画像処理により密着状態の複数の治具を認識する手法に取り組んだ。治具を正確に認識できない場合は指で治具を押し、ずらすことで正確に認識できるようにした。その結果、密着状態の複数の治具も認識、識別をすることが可能となった。

バラ積み状態の金属製ベアリング部品をカメラ画像から検出する研究を実施した。画像の中から最も把持が容易と思われる部品を人が選択し、底面楕円の中心座標(横軸,縦軸),長軸,短軸,回転角度の五つのパラメータを正解ラベルとして設定した。ユニット数や層数が異なるネットワークを用いて実験し、比較した。計算量の低減を図るためファインチューニングを適用した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

(1) Takayoshi Yamada, Kenta Niwa, Hidehiko Yamamoto, Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, Automatic generation of grasp positions using the partial differentiation of the grasp stiffness matrix, Journal of Robotics and Mechatronic Systems, Vol. 2, No. 2, pp. 1-15, 2017年, ISSN 2399-1550

[学会発表](計15件)

(1) 山田貴孝, 岸佑樹, 佐藤惇哉, 伊藤和晃, 山本秀彦, 摩擦なし二次元包み込み把持の安定性解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 (ROBOMECH2019), 2P1-H05, 2019年

(2) 高田峻佑, 山田貴孝, 佐藤惇哉, 伊藤和晃, 山本秀彦, 4指12自由度ハンドによる治具の自動組立の研究(密着状態の治具の認識と整列作業), ROBOMECH2019, 2P1-R09, 2019年

(3) 中村優祐, 山田貴孝, 佐藤惇哉, 伊藤和晃, 山本秀彦, 深層学習を用いた接触領域の推定に関する基礎研究, 日本機械学会東海学生会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2019 (TEC19) 第50回学生員卒業研究発表講演会, 7A24, 2019年

(4) 高田峻佑, 山田貴孝, 佐藤惇哉, 伊藤和晃, 山本秀彦, 掌にカメラを装着した4指12自由度ハンドによる密着状態の治具の認識, TEC19, 7P31, 2019年

(5) Shinji Kondo, Takayoshi Yamada, Junya Sato, Kazuaki Ito, Hidehiko Yamamoto, Development of an Opposed Type Master Device using a Parallel Link Robot and Study on Teleoperation, IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2019), V2-12, 2019年

(6) Yoshiaki Ichikawa, Takayoshi Yamada, Junya Sato, Kazuaki Ito, Hidehiko Yamamoto, Motoharu Fujihara, Satoshi Kawaguchi, Takehiko Suzuki, Jin Izawa, IPM Insertion Using Force Sense and Visual Feedback Control, SAMCON2019, V2-3, 2019年

(7) 柴田和明, 山田貴孝, 佐藤惇哉, 伊藤和晃, 指先に6軸力覚センサを搭載した4指12自由度ハンドによる工具を用いたボルトの締め付けの研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 (ROBOMECH2018), 1A1-A04, 2018年

(8) 二村芳宏, 原田聡也, 山田貴孝, 佐藤惇哉, 山本秀彦, 指先力覚センサを搭載した4指12自由度ハンドによるボルトおよび治具の組立作業の研究, SICE Life Engineering Symposium 2017 (LE2017), 3B1-3, 2017年

(9) Takayoshi YAMADA, Junya SATO, Kazuaki ITO, Hidehiko YAMAMOTO, Contact point estimation from contaminated force and moment, LE2017, 3B1-4, 2017年

(10) 松尾健斗, 村上栄将, 山田貴孝, 佐藤惇哉, 山本秀彦, 川崎晴久, 毛利哲也, Unityと4

指ハンドを用いた仮想物体の力覚提示に関する研究，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 in Fukushima (ROBOMECH2017)，2A1-K09，2017 年

(11) 市川慶明，風間淳，山田貴孝，佐藤惇哉，山本秀彦，点群で与えられた 3D モデルに基づいた 3 次元最適把持の自動生成の研究，Robomech2017，2P1-C11，2017 年

(12) 近藤真二，村上栄将，山田貴孝，佐藤惇哉，山本秀彦，毛利哲也，川崎晴久，視覚と力覚の提示および接触点位置の推定を伴う遠隔操作による組立作業の研究，ROBOMECH2017，2P1-N05，2017 年

(13) 福島雅史，山田貴孝，山本秀彦，川崎晴久，毛利哲也，把持対象物と外部環境との接触状態の同定実験（指先の力覚センサを用いた場合），日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 in Yokohama (ROBOMECH2016)，1A2-19a3，2016 年

(14) 二村芳宏，橋本保聡，山田貴孝，山本秀彦，掌にカメラを装着した 4 指 12 自由度ハンドによるボルトおよび治具の組立の研究，ROBOMECH2016，1P1-09a4，2016 年

(15) 村上栄将，山田貴孝，山本秀彦，川崎晴久，毛利哲也，力覚情報の提示と接触パラメタの同定を伴う多指ハンドの遠隔操作の研究，ROBOMECH2016，1P1-19a6，2016 年

〔図書〕(計 1 件)

(1) 山田貴孝，毛利哲也，三村宣治，山本秀彦，6 軸力センサを用いた接触状態検出とロボットの知能化，機械の研究，69 巻 9 号，p752-761，2017 年

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし

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：山本 秀彦

ローマ字氏名：YAMAMOTO Hidehiko

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。