

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：57301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04699

研究課題名(和文)幾何学的な物体拘束を保証して作業の信頼性を高めるロボットマニピュレーション

研究課題名(英文) Safe Robotic Manipulation with Geometrical Constraint of Objects

研究代表者

横田 諭 (Makita, Satoshi)

佐世保工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号：60580868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では幾何学的拘束(ケーシング)による物体保持を保証した物体操作手法を提案し、ロボットによる作業の信頼性を高めることを目指す。まず物体操作において、多種の対象物に対して得られる三次元画像から物体形状特徴を推定し、物体保持を保証しながら実行できる各種のタスクを計画する。ここでは、マグカップの持ち手のような、穴形状に注目して、形状認識、動作計画を行った。また、物体把持・操作において力学的拘束と幾何学的拘束の異なる条件について、それらを統一的に評価できる指標を提案した。この評価指標により幾何学的拘束を加味した把持・動作計画をすることで、物体操作の確実性を高めることができることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で提案する、幾何学的な囲い込み・閉じ込めを利用する物体操作計画の学術的な意義の一つは、力学条件と幾何学的条件を統一的に扱う、物理的整合性のある評価指標を新たに提案する点にある。これまで力学条件の不確定要素、例えば接触力の変動などに対して高度なセンシングや制御で対応する事例は少なくないが、現実の運用上、それらを有効活用できるハードウェアは現時点では多くない。力学条件に追加する形で幾何学的条件を加味することで、システム構成を変えることなく物体操作の安心感を高めようとするところが本研究の独創的な点である。これにより、ロボットによる作業のさらなる自動化、また家庭内作業への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：This study presents a strategy of robotic manipulation based on caging, geometrical constraints for object grasping and manipulation. The objective of the study is to execute manipulation tasks according to the strategy with higher reliability. First we acquire three dimensional images of objects to recognize geometrical features of the objects for caging constraint. In this study, we focus on loops or holes of objects such as a handle of mug and detect the features to plan robot motion of caging. Second we propose an evaluation index of caging constraints, which is available to evaluate the quality of object constraint by both mechanical and geometrical effects simultaneously. The index is calculated as robustness of objects in grasping and manipulation. The robustness of objects can be equivalent to difficulty of movement of objects, that is, higher robustness ensures to complete firm robotic tasks.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：マニピュレーション 把持 ケーシング 物体操作 動作計画 物体認識 グラスピング 幾何学的拘束

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ロボットによる物体操作(ロボットマニピュレーション)の競技会は国際的には家庭内などの不整備環境での作業を対象とするタスクなどが開催されている。国内では NEDO の「次世代ロボット中核技術プロジェクト」の中の「次世代マニピュレーション」として、スーパーマーケットのレジ作業を想定した「レジチャレンジ」の提案がある[1]。これらの背景にはロボットによる作業支援・代替への社会的要求とこれまで個々の研究機関で各々に取り組んでいたマニピュレーション研究を、統一基準で評価しようとする流れがある。実環境におけるマニピュレーションタスクの実行と統一指標による研究成果の評価は今後も進展するものと考えられる。

これらで設定されるタスクに対する本研究の具体的な方策は、可変形物体の取り扱いや持ち替え動作などを安心して実行できるように、申請者が取り組んでいる「ケーシング (Caging)」による物体拘束をベースとする物体操作手法を考える。ケーシングは位置制御ロボットで対象物を囲い込むことで、閉じた領域から抜け出せないように拘束する手法である[2]。ケーシングは把持の **pre-shaping** としてこれまで広く研究されてきたが、幾何学的拘束の優位性を従来の力学ベースの物体操作に付与することで、より安心な操作を実現できる。これには力学条件と幾何学的条件を統一的に扱う理論を新たに必要とする。

2. 研究の目的

本研究では幾何学的拘束(ケーシング)による物体保持を保証した物体操作手法を提案し、ロボットによる作業の信頼性を高めることを目指す。ケーシングは物体の形状情報のみで計画される動作を位置制御のみで実行できる利点をもつ。物体操作において、多種の対象物に対して得られる RGB-D 画像から物体形状を推定し、物体保持を保証しながら実行できる各種のタスクを計画する。ここでは、対象物が持つ特定の形状的特徴に基づいて動作計画をする。例えばリング形状(ループ)やくびれ形状に応じたケーシング把持をカテゴリ化してそれぞれ十分条件を導出しているので[3]、複雑な形状であっても分割またはトポロジカルな変形をもって多くの対象物に適用できる。さらにケーシング拘束を適用して、力学条件が満たされなくなった場合にも対象物を取りこぼすことを防ぐ物体操作手法を検討する。このとき、力学条件と幾何学的条件を統一的に扱うことで、物体操作に新たな評価関数を導入し、作業成功率を高める方策を考える。これによりロボット構成の再設計、制御の省力化が検討できる。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、以下の研究内容に取り組む。

(1) 対象物の特定形状特徴に基づくケーシング把持

本手法の特徴は申請者らが提案しているケーシング把持形態[3]のうちどれが適用可能かカテゴリ化するための形状特徴を抽出する点である。すなわち特定物体認識のような「それが何であるか」ではなく「どういう形状特徴を有しているか」を点群データから抽出する。この方法はトポロジカルに同相な物体にも広く拡張可能であると考えられる。

(2) 接触力解析に基づく、力学条件と幾何学的条件を統一的に扱う評価指標の導出と把持・操作計画への応用

幾何学的拘束と力学的拘束との、次元の異なる二つの条件を両方とも加味して物体操作計画を立てるためには統一的な評価指標が必要である。対象物への接触力解析[4]から「対象物が物体拘束から離脱して運動するために必要な力」を計算する。幾何拘束されている方向への運動には無限大の力を要すると解釈できるので、この指標を用いて、対象物の運動しにくさを統一的に評価する。力学的にハンドの把持力が同条件の場合にも幾何拘束条件を加味すると最適な把持形態が決定できる。

4. 研究成果

以下に、研究期間内で得られた成果をそれぞれ説明する。

(1) 対象物の特定形状特徴に基づくケーシング把持

まず、特徴的な形状として、穴などのループ形状に注目した。穴などのループ形状を持つ物体に対して、その穴の空いた部分にハンドの指を通してひっかけるようにして、対象物体を拘束する。このとき、ハンドの指先間距離がループの太さより小さければ、対象物がハンドの拘束から抜け出すことはなく、対象物との力学的条件を考慮しなくても物体拘束が可能である[3]。一方で、囲い込みが不十分な場合でも、指をフックのようにひっかけて吊るすことで、重力下では十分に拘束可能である[5]。したがって、まずここでは対象物のループ部分を認識し、指挿入動作を達成する。

テーブルなどの平面上に置かれた対象物を RGB-D カメラで撮影することで、図 1 のような点群を得ることができる。この点群から画像中の最大平面であるテーブルの平面を抽出し、それよりも上部に存在する点群を、対象物の点群として取り扱う(図 2)。次に、この得られた点群を、カメラ平面に対して投影する。この処理によって、点群中に指を通すことのできるループ、すなわち穴が存在すれば、投影後の二次元画像中にもその穴は残り、抽出が容易になる。例えばコッ

ブの縁のように点群ではループを構成しているが貫通していないようなものは、この投影によってそのループが消去されるので、貫通穴だけを効率的に抽出できる。二次元平面に投影した点群に対してメッシュ化処理を施すと、他の三角形と共有している辺と、外側との境界になっている辺に分けることができる。このとき、最外郭のループの内部に入れ子のループが存在すれば、それが物体の穴形状を表すことになる。この穴形状のループを構成する点群を、再度、三次元空間中の位置に戻すことで、三次元ループを構成する点群（図3）が得られる。

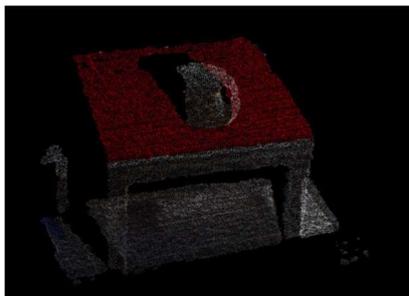


図 1：テーブル上の対象物の点群



図 2：抽出した対象物の点群

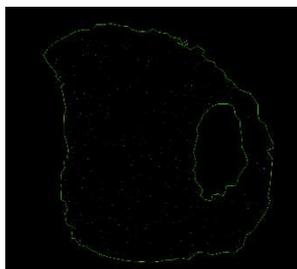


図 3：対象物の持つループ構造

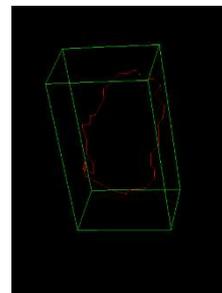


図 4：ループを内包する直方体

次にこの三次元ループに対して指を挿入する位置と方向を決定する。ここで、ループに外接する直方体を考えて（図4）、この直方体の中心を挿入目標位置とする。この点はループが大きくゆがんでいない限り、おおよそループの中央近傍に位置することが期待される。指を挿入する方向ベクトルについてはまず、ループを構成する点群について隣り合う点群へ向かう2本の方向ベクトルの外積を取る。これをループ上のすべての点において演算し、それらを合成することで、ループの曲面性を考慮した挿入方向ベクトルを決定することができる（図5）。

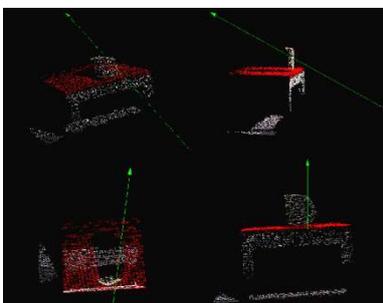


図 5：ループに対する指の挿入方向ベクトル



図 6：計画されたロボットの挿入動作

得られた挿入目標位置と挿入方向ベクトルを用いてロボットの指挿入動作を計画し、図6のようにロボットによる指挿入動作を達成した。また、ケーブルやトートバッグの持ち手などの柔軟物に対しても、ループ形状を抽出することができれば、挿入位置や挿入ベクトルの決定が可能であることを確認した。

(2) 力学条件と幾何学的条件の両方を統一的に評価する指標の導出と把持・操作計画への応用

対象物を幾何学的に囲い込む手法であるケージングは、ロボットハンドによる力学条件によらず物体を抜け出さないように拘束することができる。その一方で、ハンドや対象物の形状によっては完全な幾何拘束を達成できない場合がある。このような場合に、重力や接触力などの外力を考慮すると、対象物の運動しにくさ、すなわちハンドの拘束からの抜け出しにくさには差異があることが考えられる。例えば図7のようなオレンジ色の三角形の指先3つで対象物を拘束するとき、対象物が運動できる方向に重力が働くときに最も運動しやすい。すなわち、重力のはたらく方向に指を添えることで対象物の運動を効果的に抑制できる。このとき、指の存在により幾何学的に拘束されている方向には（指が不動であれば）いかなる力を加えても運動することはできない。したがって、対象物を運動させるのに必要な力の大きさを計算することで、物体の運動しにくさを評価できると考える。これを先行研究では把持のロバスト性の評価[4]としていた。この把持のロバスト性評価に基づいて、幾何学的拘束による運動しにくさと力学的作用による運動しにくさを統一的に評価できる。

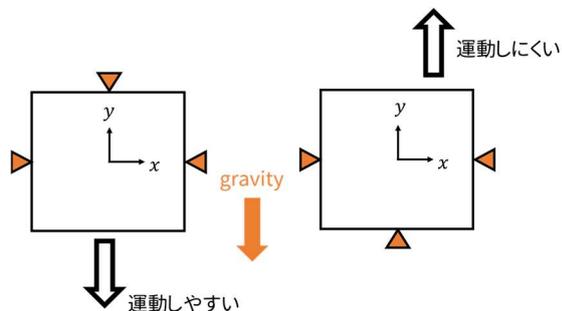


図 7：3つのロボット指（オレンジ）による物体把持

対象物が静止しているとき、対象物に働く接触力および重力などの外力はつり合っている。もし対象物がある方向へ運動させようとするならば、力のつり合いが破綻するだけの外力を加える必要がある。把持のロバスト性の評価値は、外力に対して最も弱い方向について、つり合いを保つことのできる最大の外力の大きさとする。これに基づいてある条件下で図7のケースを計算すると、左の図のロバスト性は10.17、右の図では24.23となる。それぞれの図において外力に対して最も弱い方向は、指が添えられていない開放方向であるが、ここに重力の方向が加味されて、ロバスト性の評価値、すなわち物体が運動するために必要な力の大きさに差が現れた。これをさらに解析すると、例えば同じ2指のハンドによるピンチングにおいても、指をどの位置に置いて挟み込むかによってロバスト性が異なる(図8)。このことから、左図のような指の摩擦に頼る把持方法ではなく、重力などの既知の外力に対して、指を配置して幾何学的に拘束するアプローチが有用であるといえる。

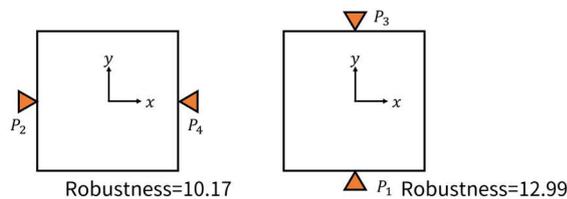


図8: 2本指による挟み込み把持のロバスト性

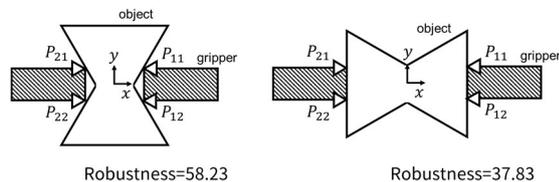


図9: くびれを持つ物体の把持方法とそのロバスト性

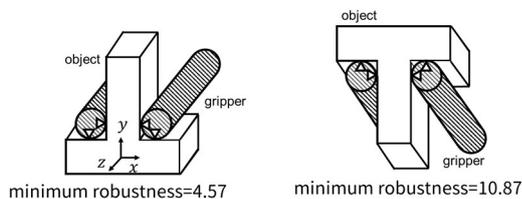


図10: T字型物体の把持姿勢によるロバスト性

図9はくびれ型ケーシングと呼ばれる、対象物の細くなった部分を囲い込むように指を配置する把持手法である。くびれ部分を拘束することで、対象物の上下方向の運動を阻害する。これについて同じ対象物で異なる把持点を与えたときのロバスト性を評価すると、くびれ部分を把持することでロバスト性が高くなることが示された。すなわち、幾何学的拘束(ケーシング)として提案した把持手法についても、従来と同じ力学解析による指標で、その拘束性能を同等に評価できるといえる。

この手法は三次元空間の問題にも拡張しており、平行グリッパでT字型物体を把持することを考えると、平行グリッパに乗せるように物体を保持するほうがロバスト性は高いことが示された(図10)。グリッパは挟み込む方向の力を能動的に制御するが、それと直交する方向には可動しないので、受動的な力を発生する。つまり、ロボット指の非駆動方向を利用して幾何学的な拘束を加味すると、能動的な力拘束との相乗効果が期待できる。

<引用文献>

- [1] 横小路ほか: 把持機能と認識機能の統合による高度なマニピュレーションを実現するための標準的マニピュレーションタスク, 日本ロボット学会学術講演会, RSJ2016AC1B2-06, 2016.
- [2] S. Makita and W. Wan: A survey of robotic caging and its applications, *Advanced Robotics*, 19-20, 1071-1085, 2017.
- [3] 横田ら: 三次元多指ケーシングの十分条件の導出—対称ハンドによる四種類の単純形状物体の拘束—, *日本ロボット学会誌*, 28, 5, 599-605, 2010.
- [4] 横田ら, ロボットマニピュレーションにおける接触力の準静力学的解析—定式化とそのグラフプレス・マニピュレーションのロバスト性評価への応用—, *日本ロボット学会誌*, 31, 10, 1009-1018, 2013.
- [5] J. A. Stork et al.: A Topology-based wObject Representation for Clasping, Latching and Hooking, *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 138-145, 2013.

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 牧原昂志, 横田諭	4. 巻 38
2. 論文標題 把持のロバスト性解析に基づくケーシング拘束の定量的評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 496 ~ 501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7210/jrsj.38.496	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 S. Makita and K. Makihara
2. 発表標題 Homogeneous Quantitative Measure of Caging Grasps with both Geometrical and Mechanical Constraints
3. 学会等名 19th International Conference on Control, Automation and Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横田諭
2. 発表標題 準静的な物体操作における動摩擦力と静止摩擦力の発生可能性
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 牧原昂志, 横田諭
2. 発表標題 把持のロバスト性解析に基づくケーシング拘束の定量的評価
3. 学会等名 第24回ロボティクス・シンポジア
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 牧原昂志, 大坪拓也, 横田諭
2. 発表標題 ループ形状を持つ物体の幾何特徴抽出に基づくケーシング把握計画
3. 学会等名 第23回ロボティクス・シンポジア
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 牧原昂志, 大坪拓也, 横田諭
2. 発表標題 物体の穴形状を利用するケーシング把握の経路生成
3. 学会等名 システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

発表文献リスト https://www.fit.ac.jp/~makita/publication-jp.html 発表スライド https://www.slideshare.net/SatoshiMakita 研究紹介「三次元多指ケーシングの理論と実行」 https://www.fit.ac.jp/~makita/research-jp.html#caging 研究紹介「マニピュレーションの力学」 https://www.fit.ac.jp/~makita/research-jp.html#manipulation

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