

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560285

研究課題名(和文) 高度な把持を実現する複数対象物把握系の安定性解析と最適把持の設計

研究課題名(英文) Stability analysis and optimum position planning for dexterous grasping of multiple objects

研究代表者

山田 貴孝 (YAMADA, Takayoshi)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：00273318

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：多指ロボットハンドには高度な把持と操りを実現する潜在能力がある。この能力を高める研究として、複数対象物を把持する場合の安定性と、この解析結果を基にした最適把持位置の設計を研究した。二次元平面内では、接触点の滑りと転がりを考慮して複数対象物の把持を解析した。把持パラメタの安定性への効果をも明らかにしている。三次元把持の場合には、接触点の滑りと転がりに加え、曲面の幾何学をも考慮して解析した。また、対象物が一つの場合について最適把持位置を設計するアルゴリズムを構築し、数値例を用いて妥当性を確認した。回転関節を有する多指ハンドで把持する場合には回転関節の角度およびリンク長を考慮して解析した。

研究成果の概要(英文)：Multifingered robot hands have the potential to dexterously grasp and manipulate any shaped objects. In this research project, I have investigated the grasp stability of multiple objects and the optimum grasp planning problem based on the analysis. In the planar case, grasps of multiple objects with sliding and rolling contacts between fingers and objects were analyzed. The effects of grasp parameters to the grasp stability were analytically obtained by formulating the partial derivative of the grasp stiffness matrix. In the spatial case, not only the sliding and rolling contacts but also contact surface geometry (metric tensor, curvature and torsion) were considered. An optimum grasp planning algorithm was proposed and its effectiveness was demonstrated by using experimental devices for grasping a single object. In order to include the revolute joints and link lengths of the hands, rotational stiffness model was used. The grasp stiffness matrix was analytically derived on the model.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 知能機械学・機械システム

キーワード：ロボット 多指ハンド 把持の安定性 複数対象物 高度な操り 剛性行列 最適把持の設計

1. 研究開始当初の背景

本研究課題では、多指ロボットハンドの潜在能力を引き出すために、複数対象物把握系の安定性を解析し、高度な作業の実現を目指す(図1)。複数対象物把持には次の利点がある。(1)生産ラインにおいて部品数が多い場合に、複数対象物を把持することで作業時間を短縮できる。(2)災害や事故処理など素早い作業が求められる場合に有効である。

把持安定性解析に関する従来研究において、次のような課題が残されていた。(1)数値を用いて解析結果の妥当性を示しているが、直感的理解のためには可視化が必要である。(2)実用のためには、最適把持を設計する必要がある。(3)実験装置を用いて検証する必要がある。(4)形状誤差や制御誤差のために把持パラメタが変動した場合について把持安定性への影響を明らかにする必要がある。(5)三次元空間内の安定性解析では、単数対象物を把持する場合に限定されている。(6)各指を直交仮想ばねで置き換えて解析しているが、これは指先が並進変位のみを生じる場合に限定していることになる。回転関節で構成されるハンドによる把持について、より正確に安定性を評価するためには、回転関節の効果を解析する必要がある。(7)指先による把持、すなわち握みに限定されている。人間が行なう様々な把持形態についても解析する必要がある。

これらの課題を解決し、実用性を高めることを目指す。本研究課題は、以下のように、他研究と異なる大きな特徴を有する。(1)複数対象物の把握系の安定性を解析する。(2)摩擦が無い場合も解析するため、摩擦が未知の場合でも安定な把握を設計できる。(3)摩擦の有無が混在する場合も評価でき、様々な表面特性の対象物を同時に把持できる。(4)把握系の安定性を表わす剛性行列を解析により導出するため、行列の固有値により安定性を定量的に評価できる。(5)安定および不安定な方向を固有ベクトルにより導出できる。

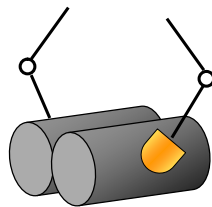


図1. 複数対象物の把持

2. 研究の目的

生産ラインにおける組立作業では、多種多様な形状の部品を組み付ける必要がある。このため、人間の手先の感覚と器用さが求められる。しかし、その多くは図面に従って決められた手順を行う機械的作業である。人

間の精神的・肉体的負担の軽減、一定かつ高品質な製品製造のためにロボットの活用が求められている。

高度な組立作業をロボットで実現するための効果的な装置として、人間の手を模した多関節型の多指ロボットハンドが考えられる。しかし、現在は研究・開発段階であり、実用化には至っていない。これは、多自由度であるために機構および協調した制御が高度であること、指先と対象物の間は接触に依存するために摩擦の有無や形状などの不確かさを伴うこと、などが理由である。このため、把持と操りに関する研究のほとんどは対象物の数が一つに限定されていた。

しかし、マジックやジャグリングに代表されるように人間は多数の対象物を把持し、操ることができる。多指ロボットハンドは高度な作業を実現する潜在能力を有するため、この能力を引き出す研究・開発が必要である。

3. 研究の方法

前述した課題を解決するために、次の方法で研究を行なう。(1)解析結果を可視化するために、動力学シミュレータを用いる。シミュレータ内でリンク系を構築する。接触点での滑りと転がり表現するために、変位や摩擦係数に拘束条件を追加する。(2)従来研究で得られた剛性行列を基に最適把持を設計する。剛性行列の固有値が大きいほど把持は安定する。このため、設計手順は次のようになる。まず、力学的平衡条件を満たす指先位置と指先力を選択する。次に、剛性行列の固有値を大きくする組み合わせを選択する。(3)多自由度ロボットアーム、多指ハンド、カメラを組み合わせた実験装置を構築する。また、カメラから物体画像を取得し、外形と曲率を抽出するアルゴリズムを構築する。さらに、最適把持位置を自動生成するアルゴリズムを構築し、実験装置で検証する。(4)剛性行列が正定であれば把持は安定である。把持パラメタで偏微分した場合に、その行列が準正定であれば、そのパラメタの増加により把持は安定する。このような視点から、把持パラメタの変動の効果を明らかにする。(5)三次元空間内で複数対象物を把持する場合、変位パラメタの数が非常に多くなる。接触点における滑りと転がりの拘束、曲面の幾何学を考慮する必要がある。非常に複雑になる。この点を解決する。(6)回転関節に回転仮想ばねを設定し、指先の回転変位を考慮して安定性を解析する。この場合、指先の位置・姿勢パラメタが冗長となり、指先位置の決定方法が問題となる。これを解決する鍵は、ポテンシャルエネルギーが各指で局所最小になることである。この条件から指先位置の拘束条件および把握系の剛性行列を導出する。(7)包み込み把持の場合には各リンクが対象物と接触するとして、根元リンクから先端リンクへと拘束条件を拡張していく。

4. 研究成果

(1) 把握系の安定性と変位方向は剛性行列の固有値と固有ベクトルにより評価できる。しかし、数値のみでは、その妥当性が直感的に理解し難いという問題点があった。そこで、動力学シミュレータ Open Dynamics Engine (ODE) を用いて、把持モデルを構築し、変位モードを可視化する手法を提案した(図2)。これにより提案解析手法の妥当性が直感的に理解できるようになった。

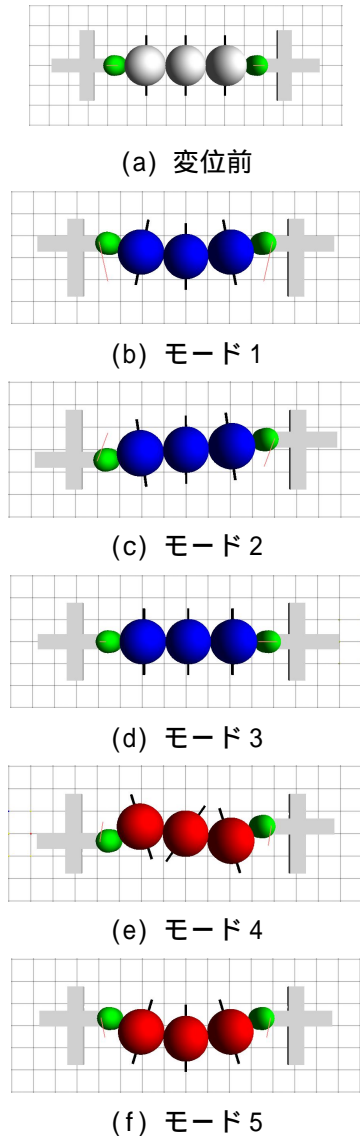
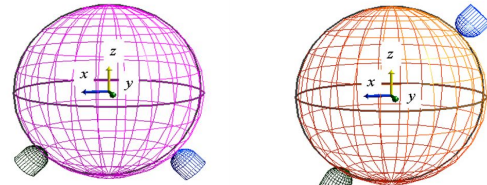


図2. ODE による変位モードの可視化

(2) 三次元空間内で一つの対象物を把持する場合について、最適把持位置の設計アルゴリズムを構築した。アルゴリズムは次の手順である。まず、線形計画問題を用いて、力学的平衡を満たす指先位置と指先力を求める。そして、滑り接触と転がり接触、曲面の幾何学(計量テンソル、曲率、掠率)を考慮し、把持の剛性行列を求め、その固有値と固有ベクトルを求める。次に、多くの方向の外乱に対して安定性が高くなるように、正の固有値

の数が大きい把持を選択する。多くの方向の外乱に対して均等な安定性になるように、正の固有値の中で最大と最小の比を用いて把持を選択する。最後に、大きな外乱に耐えられるように、正の固有値の積が最大になる把持を選択する。数値例を用いて、提案アルゴリズムの有効性を確認した(図3)。



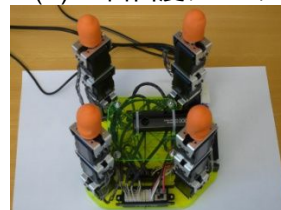
(a) 滑り接触 (b) 転がり接触

図3. 三次元把持の解析結果

(3) 把持安定性を基にした最適把持位置自動生成アルゴリズムの実用を目指し、実験装置(図4)を用いたアルゴリズムの構築と検証実験を行った。実験装置には、4自由度ロボットアーム、掌に小型カメラを装着した4本指ハンドを用いた。物体形状を掌の小型カメラで取得し、外径と曲率を取得するアルゴリズムを構築した。対象物と指先の接触を転がり接触と仮定し、指先力の範囲を摩擦錐で制限した。剛性行列の固有値を成果(3)と同様の手法で評価し、最適把持を導出した。得られた把持位置を実験装置を用いて検証し、妥当であることを確認した(図5)。



(a) 4自由度アーム



(b) 掌にカメラを装備した4本指ハンド

図4. 実験装置



(a) カメラ画像 (b) 把持位置

図5. 三次元把持の解析結果

(4) 把握系の剛性行列には、指の接触点位置、接触の方向、接触点近傍の曲率、指先力、指のばね剛性など、様々な把持パラメタが含

まれる．そこで，二次元把持について，これらのパラメタで剛性行列を偏微分し，把持安定性への把持パラメタの変動の影響を解析により明らかにした．また，影響が生じる変位方向も明らかにした．

(5) 三次元空間内で二対象物を把持する場合(図6)について，接触点近傍の形状として，曲率に加え，掠率，計量テンソルをも導入した．指先と対象物の接触点における滑り・転がりに加え，対象物同士の接触点における滑り・転がりの効果をも考慮した．11行11列の剛性行列を解析により導出した．数値例では剛性行列の固有値により安定性を評価し，固有ベクトルにより変位方向を求め，提案手法の妥当性を確認した．さらに数値計算での利用を考慮し，曲面の幾何学の詳細な計算手順も明らかにした．

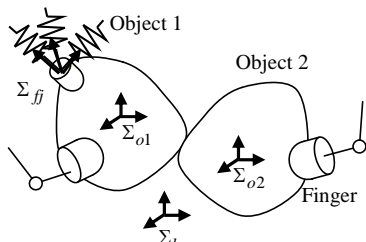


図6. 三次元二対象物の把持

(6) 三次元空間内で複数対象物を把持した場合の安定性を解析した(図7)．指先と対象物との接触点における曲面の幾何学(計量テンソル，曲率，掠率)および滑りと転がりの効果に加え，対象物同士についても，それらの効果を考慮している．そして，剛性行列を解析的に導出した．数値例により，本解析の妥当性を確認した．

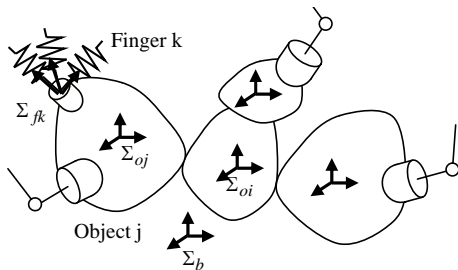


図7. 三次元複数対象物の把持

(7) 回転関節から構成される多指ハンドによる単数対象物把持について安定性を解析した(図8)．指先と対象物の接触の拘束，滑り接触と転がり接触の拘束は非線形となるため問題は複雑になる．この問題点を解決し，剛性行列を導出した．まず，各関節を回転仮想ばねで置き換え，対象物変位と関節角変位の関係を明らかにし，把握系の位置エネルギーを導出した．指先が滑り接触する場合と転がり接触する場合の両方について把持の剛性行列を解析的に導出した．数値例により，関節角の増減と安定性の増減との関係も明らか

かにした．また，回転関節の効果により変位方向に違いが生じることを示し，提案手法の妥当性を確認した．

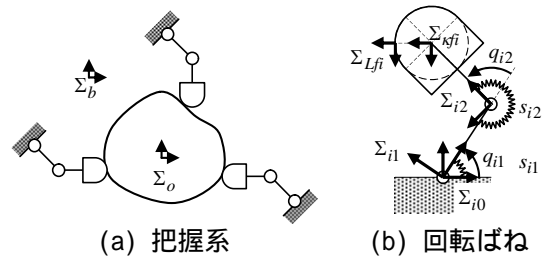


図8. 回転関節を持つ指による把持

(8) 複数対象物を把持した場合を解析した(図9)．指先と対象物との接触に加え，対象物同士の滑り接触と転がり接触の効果を考慮する必要がある．対象物の数に応じてパラメタ数が増加するため，解析は複雑になる．対象物同士の接触位置変位を表わすパラメタを導入した．把握系のポテンシャルエネルギーを定式化し，把握系の剛性行列を導出した．数値例により，提案手法の妥当性を確認した．

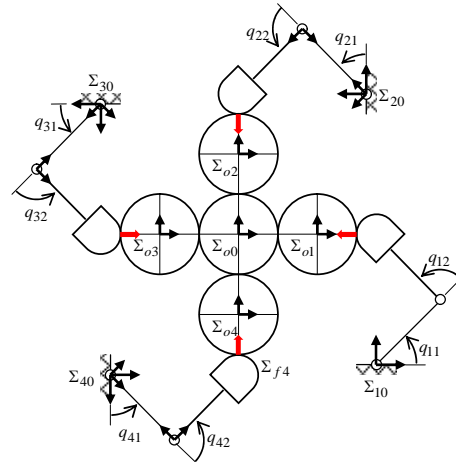


図9. 回転関節指による複数対象物把持

(9) 二次元平面内で単数対象物を包み込み把持する場合の安定性を解析した(図10)．指リンクと対象物との接触の拘束を考慮するため，問題は複雑になる．関節を回転仮想ばねで置き換え，剛性行列を導出した．剛性行列を接触点の曲率で偏微分し，安定性への曲率の影響を明らかにした．さらに，その影響が生じる変位方向を解析により明らかにした．

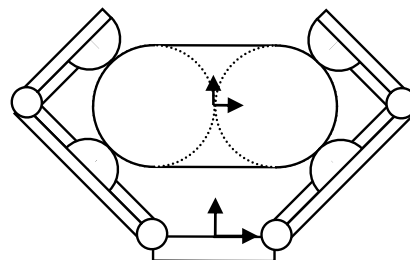


図10. 包み込み把持

(10) 把持対象物の二次近似可動性を解析した。可動性では指先位置を固定し(図11), 対象物表面と指先表面との距離を用いて解析する。対象物の変動と距離との関係を同次変換行列を用いて詳細に表記した(図12)。曲面の幾何学を考慮して解析を行った。そして, 二次近似可動性については, 曲面の幾何学のうち計量テンソルと掠率は影響せず, 曲率のみが影響することを明らかにした。

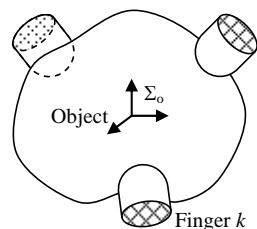


図 11. 治具等による把持

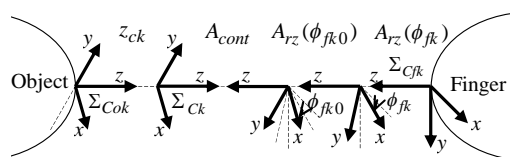


図 12. 座標系の設定

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Takayoshi YAMADA, Toshiya TAKI, Manabu YAMADA, Hidehiko YAMAMOTO, Static Grasp Stability Analysis of Two Spatial Objects Including Contact Surface Geometry, TRANSACTION ON CONTROL AND MECHANICAL SYSTEMS, Vol. 1, No. 5, pp. 218-228, 2012, 査読有

Takayoshi YAMADA, Manabu YAMADA, Hidehiko YAMAMOTO, Static Stability Analysis of a Single Planar Object Grasped by a Multifingered Hand, Journal of Mechanics Engineering and Automation, Vol. 2, No. 10, 2012, pp. 606-627, 査読有

[学会発表](計17件)

Takayoshi YAMADA, Hisahiro TORII, Hidehiko YAMAMOTO, Rolf JOHANSSON, SECOND-ORDER MOBILITY ANALYSIS OF GRASPS CONSIDERING CONTACT SURFACE GEOMETRY, 17th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR2014), Poznan, Poland, 2014年7月21-23日, 査読有

Takayoshi YAMADA, Shotaro NAKANISHI, Hidehiko YAMAMOTO, Rolf Johansson, Identification of Contact Conditions

between Fingers and a Grasped Object by Active Force Sensing, Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2014), Besancon, France, 2014年7月8-11日, 査読有

丹羽建太, 山田貴孝, 山本秀彦, 把持の安定性を基にした二次元最適把持の自動生成, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, ROBOMECH2014 3P2-R03, 富山市総合体育館, 2014年5月28日

白木大介, 山田貴孝, 中西翔太郎, 山本秀彦, 力覚情報を用いたロボットの接触状態の同定, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, ROBOMECH2014 1P1-X10, 富山市総合体育館, 2014年5月26日

Takayoshi YAMADA, Hidehiko YAMAMOTO, Grasp Parameter Effect for Static Grasp Stability of a Single Planar Object, Proceedings of the SICE Annual Conference 2013 (SICE2013), Nagoya University, Nagoya, Japan, pp. 294-300, 2013年9月15日, 査読有

山田貴孝, 山本秀彦, 二次元平面把持の二次近似可動性解析, 第31回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, RSJ2013 AC3G1-04, pp. 1-4, 首都大学東京, 2013年9月6日

山田貴孝, 鳥居久紘, 山本秀彦, 三次元把持の二次近似可動性解析, 第31回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, RSJ2013 AC3G1-06, pp. 1-4, 首都大学東京, 2013年9月6日

山田貴孝, 中西翔太郎, 山本秀彦, 力覚情報を用いた接触状態の同定(指先を既知形状とした場合の同定実験およびOpenGLによる可視化), 第31回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, RSJ2013 AC3L1-07, pp. 1-4, 首都大学東京, 2013年9月6日

山田貴孝, 長谷川真土, 山本秀彦, 把持の安定性を基にした三次元最適把持位置の自動生成, 第31回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, RSJ2013 AC3G3-01, pp. 1-4, 首都大学東京, 2013年9月6日

Takayoshi YAMADA, Hidehiko YAMAMOTO, Grasp Stability Analysis of Multiple Objects including Contact Surface Geometry in 3D, Proceedings of 2013

IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA2013), Takamatsu, Japan, pp. 36-43, 2013年8月4日, 査読有

白木大介, 山田貴孝, 山本秀彦, 力覚情報を用いた接触状態の同定(種類別推定の計算量の低減), 日本機械学会東海支部第62期総会講演会講演論文集, No. 123, pp. 45-46, 三重大学, 2013年3月18-19日

中西翔太郎, 山田貴孝, 山本秀彦, 力覚情報を用いた接触状態の同定(OpenGLを用いた実験結果の可視化), 日本機械学会東海支部第62期総会講演会講演論文集, No. 122, pp. 43-44, 三重大学, 2013年3月18-19日

Takayoshi YAMADA, Manabu YAMADA, Hidehiko YAMAMOTO, Stability Analysis of Multiple Objects Grasped by Multifingered Hands with Revolute Joints in 2D, 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA2012), pp. 1785-1792, Chengdu, China, 2012年8月8日, 査読有

鳥居久紘, 山田貴孝, 山本秀彦, 二次元平面内における単一対象物包み込み把持の安定性解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門, 1A1-K05, pp. 1-4, アクトシティ浜松, 2012年5月28日

Takayoshi YAMADA, Toshiya TAKI, Manabu YAMADA, Hidehiko YAMAMOTO, Grasp Stability Analysis of Two Objects by Considering Contact Surface Geometry in 3D, International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2011), Phuket, Thailand, pp. 1108-1115, 2011年12月9日, 査読有

林和成, 山田貴孝, 山本秀彦, 二次元複数対象物把握系の安定性解析(シミュレータを用いた変位モードの可視化), 第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD, RSJ2011 AC3E1-4, 芝浦工業大学豊洲キャンパス, 2011年9月9日

Takayoshi YAMADA, Manabu YAMADA, Hidehiko YAMAMOTO, Stability Analysis of A Single Object Grasped by A Multifingered Hand with Angular Joints in 2D, International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA2011), Beijing, China,

pp. 1457-1464, 2011年8月10日, 査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 貴孝 (YAMADA, Takayoshi)
岐阜大学・工学部・准教授
研究者番号: 00273318

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

山本 秀彦 (YAMAMOTO, Hidehiko)
岐阜大学・工学部・教授
研究者番号: 20243363

山田 学 (YAMADA, Manabu)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 40242903