

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00371

研究課題名(和文)複数物体の最密充填と安定性を制御する詰込みに関する研究

研究課題名(英文) Study on closest packing of multiple objects and packing considering its stability

研究代表者

音田 弘 (Onda, Hiromu)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号：40356746

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：物体同士が密に接触する詰込みの安定性解析とそれに基づく作業計画法を行うために、詰込まれた一つの対象物にどのような力が働くかを計測するセンサモジュールを開発し、過渡状態・最終状態の力分布を計測する。触覚センサを対象物の表面上に配置したセンサモジュールを作成し、対象物の配置順序を変更しながら計測を行いその違いを計測する。この実際の測定値を得て、順序を変更した際の力分布の推移の計測を行う。摩擦のある場合の力分布は一般には一意に決まらず、不等式で表された区間等が求まるだけであるが、その範囲内での力分布の推定を、測定値を入れたシミュレーションによるモデル化により推測を可能とする。

研究成果の概要(英文)：In order to analyze the stability of stuffing where objects are in close contact with each other and the work planning method based on it, we developed a sensor module that measures what kind of force acts on one packed object, Measure the force distribution in the final state. We create a sensor module in which a tactile sensor is placed on the surface of the object, measure it while changing the placement order of the object, and measure the difference. Obtain this actual measured value and measure the transition of the force distribution when the order is changed. In general, the force distribution in the case of friction is not uniquely determined, but only the section or the like represented by the inequality is obtained, but estimation of the force distribution within that range is modeled by simulation with measured values It makes inference possible.

研究分野：ロボティクス

キーワード：マニピュレーション ロボット 作業計画

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、ホームデリバリ・物流等に現れる一般的な形状を持つ物体の密な詰込を、ロボットでより充填率を高く(最密充填)行うための作業計画法の研究である。ロボットを用いた物流の自動化において、一部自動化が進んでいるパレットや同種の容器の詰込やその応用で対応できる詰込を除けば、一般的な形状を持つ容器の中身の詰込は未だ人によって行われている。宅配便による食材等のデリバリにおける詰込も同様に人によって行われている。このような一般的な形状を持つ詰込の自動化を行うには、詰込のための知能と技能が必要である。また、人が考えるよりも高い充填率でスペースに物を詰込む問題は、最密充填の最適化計画として計算機が人に勝る場合も多い。一方で、把持可能性・把持安定性のようなロボットの身体性に関わる扱いと複数の詰込対象物の作業途中過程の物理的安定性のような対象物に関わる幾何的観点以外の扱いが実際の詰込作業には必要である[1][2]。詰込作業途中過程の対象物の安定性を考慮し、ロボットの身体性を考慮してそのスペースや可能な把持姿勢を計画し実際に詰込みが可能かを計算することは、計算量の観点からも、また、その実際に考慮すべき現象の理解とそれに基づく技能の構成という観点からも、現状では困難である。対象物の途中過程での安定性を扱うのに、動力学シミュレーションを使用することが考えられるが、現状のこれらのシミュレーションでは、実際の作業の途中過程の配置の力分布や安定性を解析するのは困難で、現象に即したモデルと定式化が必要である。このためには、既存のモデルと実際の現象との違いを正しく認識し、モデルを修正してその有効性を評価もしくは推定する方法と、ロボットの作業計画時に再利用性のある解析可能な過渡状態のモデル化を行う技術が必須である。ここでの再利用性とは、モデルのマイナーチェンジ等の摂動によっても、正しい予測ができることを意味する。具体的には、作業中のポテンシャルエネルギー・力分布に注目した解析による実測データに基づく過渡現象の理解と、データ同化の手法を利用した動力学シミュレーションによる最密充填と過渡状態の安定性のモデル化と予測を可能とし、ロボットの身体性を考慮しかつ最密充填と過渡状態の安定性を実現する詰込手法の基礎を確立する。ロボットの身体性と順序に依存して変化する安定性を考慮し、かつ、未だ不明なその過程を明らかにするロボットの研究は国内外ともに見られない。最密充填に関する研究は離散幾何やオペレーションズリサーチ(OR)によって行われているが、物体の幾何のみを考慮しているものが殆どでロボットの指が入るかどうか、安定的に把持できるかを考慮したものは殆どない[3][4]。[3]では離散幾何やORでの扱い[4]と同様に幾何的な対象物のみでの配置が考慮され、GA

により複数の準最適解が見出だされることに重点が置かれている。また、複数対象物の過渡現象における安定性についても、直方体に関するもの、JENGAを扱う観点が異なる研究でしか考慮されていない。本研究では、一般的な形状を扱うために、曲面(二次曲面)を含むモデルを考慮し、ころがりと摩擦による安定性について、一般的な形状を扱うための基礎とする。この結果によって、一般的な形状を近似し、一般的な形状を持つ物体の最密充填を行う際の安定性について、ポテンシャルや力分布によって評価できる枠組みを確立する。摩擦の存在によって、詰込手順の順序の違いによる過渡状態の力分布の違いやその安定性への影響は、特別な場合以外は知られていないが[5]、それを実際に計測してそのメカニズムを明らかにし、安定性の評価が可能なるモデル化を行う。詰込手順を変えて、過渡状態および最終状態の力分布を計測し、手順の変更に応じて変化する最密充填作業の安定性についての、評価尺度の基礎を確立する。本研究では、作業の成否として最終結果に現れる、順序に依存して変化する対象物の安定性と、主に作業を実現するために必要な身体性の扱いとを、過渡状態の計測による新しい知見とシミュレーションを併用したデータ同化を用いて定式化を行うことにより、ロボットによる密な詰込作業を考えるための定量的な評価と作業計画を可能としようとするものである。

[1] H. Onda, "Formulation of packing problem applying densest packing algorithms to planning of packing for robot," Proc. of IECON2012, pp. 2693-2700, 2012.

[2] Hiromu Onda: Stability Analysis of Densest Packing of Objects Using Partial Order Representation of Feasible Procedural Sequences, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8810, pp.424-437, 2014.

[3] T. Kawakami, M Minagawa, and Y. Kakazu, "Auto Tuning of 3-D Packing Rules Using Genetic Algorithms," Proc of Int. Workshop. on Intelligent Robots and Systems (IROS'91), pp. 1319-1324, 1991.

[4] C. O. Lopez and J. E. Beasley, "A heuristic for the circle packing problem with a variety of containers," European Journal of Operational Research vol. 214, pp. 512-525, 2011.

[5] J. Grindlay and A. H. Opie, "Contact force distribution in a pile of rigid disks," Physical Review E, vol. 51, no. 1, pp. 718-723, 1995.

## 2. 研究の目的

本研究は、物体同士が密に接触する詰込みの安定性解析とそれに基づく作業計画法について、作業の力学的解析とシミュレーション

ンを元に最密充填と過渡状態の安定性を実現する詰込手法の基礎を確立することを目的とする。密な詰込を実際に行うために、ロボットの身体性を考慮し、かつ、対象の配置順序に依存して変わる途中過程の安定性を考慮した、失敗による手戻りのない密な詰込を実現するところに特色がある。ある特別な手順を取った場合に順序による力分布が変化すること[5]とその安定性が変化することが示されている。一方で、ころがりと曲面を含む詰込の実際の途中過程でどのように分布が変化し、安定性が変わるのかを計測して研究した例はない。この点について計測手段を開発してその実際の分布を明らかにする点に独創性がある。本研究の結果は、今まで認識されていなかった手順の違いによる安定性の変化を明らかにし、作業の成功・失敗への実際の寄与を評価し、困難な配置が容易になる手順の存在と容易な配置が困難になる手順の存在を明らかにし、順序による安定性の変化の寄与の定量化に基づいて作業手順の計画方法を与える。本研究の意義は、手順に依存する安定性への影響を明らかにし、手順を変えることで難易度を変える事を可能とし、作業の失敗(不安定性)が何によるかを明確に特定できていなかった問題について、新しい切り口と計画法の基礎技術を与える事である。

### 3. 研究の方法

物体同士が密に接触する詰込みの安定性解析とそれに基づく作業計画法について、作業の力学的解析とシミュレーションを元に最密充填と過渡状態の安定性の実現度の定量的評価を行い、その可能性と限界を明らかにする。ロボットで実現可能な条件(把持可能性)をどの程度まで考慮するかは、得られる結果とトレードオフの結果にある。すべてを考慮すれば誤りはないが計算量は爆発的に増加し、全く考慮しなければほとんどの計算が最終的に失敗し、見かけの枝刈りによる恩恵を全く受けられなくなる。一方、複数の対象物からなる詰込はそれらの過渡・最終状態の安定性を考慮する必要があり、その途中過程の過渡状態の安定性は、摩擦が存在する場合に詰込みや積載の順序に従って変化することがわかっている。だが、理論的にわかっているそのパターンは特徴的な場合のみに限られ、一般の場合のその実際の変化については、理論的にも実験的にもその解析のための計測方法も含めて研究されていない。本研究で扱う作業計画を行うには、これら2つの実現可能性を考慮した計画法が必要となるため、対象物の一つにセンサを仕込んで、密に接触する複数物体について過渡状態の力分布を計測する装置を開発し計測し、過渡状態の力分布と安定性を実際に計測する。

研究期間内に、この考え方に基づく最密充填される詰込みや積載の順序に従って変化する過渡状態の安定性の基礎的な解析法を開発し、力分布を適切に制御しながら安定な順序を実現する基本的な作業手順の導出と、曲面を持つ物体を詰め込む実証実験と解析結果の評価(理論値と予測される結果との比較)を行う。

### 4. 研究成果

物体同士が密に接触する詰込みの安定性解析とそれに基づく作業計画法を行うために、詰込まれた一つの対象物にどのような力が働くかを計測するセンサモジュールを開発し、過渡状態・最終状態の力分布を計測した。触覚センサを対象物の表面上に配置したセンサモジュールを作成し、対象物の配置順序を変更しながら計測を行いその違いを計測した。この実際の測定値を得て、順序を変更した際の力分布の推移の計測を行った。摩擦のある場合の力分布は一般には一意に決まらず、不等式で表された区間等が求まるだけであるが、その範囲内での力分布の推定を、測定値を入れたシミュレーションによるモデル化により推測を可能とした。力分布変化と安定性を考慮した作業計画法の作成した。具体的には、力分布の変化と、それに基づく安定性を考慮して、円筒形の対象物の支えのモデル化を拡張し、多面体で表される対象物についても扱えるように拡張を行った。複数個のセンサモジュールによる詰込順序を変更した際の力分布の計測した。複数個のセンサモジュールを利用して、詰込順序を変更した各詰込手順について、力分布を計測可能とした。

Choreonoid[6]の動力学シミュレータを利用して、詰込物体の詰込み時の挙動をシミュレーションした。詰込については引力によって物体を接触させ、随時その位置を摂動しながら最密充填位置を探すといった最適化問題を解くことになる。これでできた詰込パターンについて、安定性をChoreonoidの動力学シミュレーションで考慮して、配置計画を行うアルゴリズムを作成した。

詰込を行うためには、所定の位置へ配置するための技能、他の既に配置された物体を動かさないで接触させる技能、他の物体の隙間に配置する等の技能を必要とする。また、容器の壁や隅に接触させて配置したり、壁に沿って他の物体に接するまで動かすなどの技能[4]も必要となる。これらの必要とされる技能は、詰込む容器や領域にロボットがどうアクセスできるかに依存する。把持できる場所がどこで、どの程度の力で把持が可能でその位置・姿勢を保持できるかも、重要な点である。

条件	詳細	
対象物の特徴	ワレモノ, 脆弱な部分の有無, 袋, パラ, 箱, ...	
ロボットの特徴	グリッパ形状 (力をかけれる方向), マニピュレータの特性 (自由度配置, 双腕等), センサの有無	
詰込作業・目標状態の仕様	位置姿勢の指定	整列, パタン, 仕様, 拘束条件の有無
	接触	他と当たってはならない, 傷をつけてはならない等
	重さ	重さの偏りが少ない
	充填率	最密充填, 隙間の扱い
	強度計算の必要性	有無
	仕切り, 緩衝材	有無
まわりとの相互作用	相互作用の有無, 安定性	
スペースを空ける	1個分のスペースを空ける, 直方体のスペースを空ける, モノの形状のスペースを空ける	

これらの配置技能のプリミティブのどれを選択し実装して使用可能にし,それを計画段階にどのくらい考慮に入れるかによって,前段の大域的計画や局所的計画の結果も変わってくる.

詰込に関する諸条件を,詰込の目標状態もしくは詰込の仕様として整理すると,表1のような項目が挙げられる.対象物の特徴,ロボットの特徴,詰込作業の仕様を考慮して,作業を計画・実行できることが要求される.そして,コスト等から決まる使用できるセンサの制限,環境整備の自由度,作業の成功率,ロバスト性が考慮される段階になれば,さらに制約は厳しくなる.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)  
件)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

音田 弘 (Onda Hiromu )

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号: 40356746