

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420209

研究課題名(和文) 摩擦を利用した把持・操りの接触力の不確定性に対する安定性解析とその判別法の確立

研究課題名(英文) Analysis of Uncertainty Contact Force of Robot Grasping and Manipulation with Friction Force

研究代表者

相山 康道 (Aiyama, Yasumichi)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：60272374

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ロボットマニピュレータが対象物を把持し、ならい作業や挿入作業などの環境との接触を有する作業を行う場合、わずかな位置誤差で過大な接触力が発生しないように、フリージョイントを手首部に導入する手法を提案している。本研究においては、環境接触作業遂行時に、摩擦の影響がある場合にも望みの運動が可能となるか、力学的解析に基づく解析を線形計画問題として解く手法をこれまでの2次元から3次元へと拡張を行った。また、摩擦が組み立てに影響を与える他の例として把持時の位置姿勢誤差の問題を取り上げ、把持位置等が当該誤差に与える影響を解析し、組み付け作業の成否検討手法を構築した。

研究成果の概要(英文)：When a robot manipulator grasps an object and manipulates it with contacting with environment like as insertion, sliding etc., to avoid excessive contact force, we introduce free-joint structure at the wrist part of the manipulator. In this research we have developed a method to analyze an influence of friction force to the manipulation by linear problem method, and we extend this method from 2D to 3D problem. As another example of influence of friction force to manipulation tasks, we chose grasp positioning error problem. When a gripper grasps an object with initial pose error of the object, it may grasp the object with some pose error because of friction force between gripper and the object. We analyze influence of friction force to the pose error and develop a discrimination method if the task will be succeeded or not.

研究分野：ロボット工学

キーワード：マニピュレーション 摩擦 不静定問題 位置制御 ロボット

### 1. 研究開始当初の背景

一般のロボットマニピュレータでは、ロボットハンド(グリッパ)で対象物を把持すると、対象物の運動は完全に拘束される。この状態で対象物が他の物体や環境等と接触すると、さらに拘束が増えることになり、過拘束な状態となる。このためにわずかな位置ずれ等により、過大な接触力が発生し、対象物や周辺環境、マニピュレータ等を破壊する危険が存在する。これに対し代表者は、過大な接触力の原因である過拘束を解消すれば良いと考え、マニピュレータが対象物に与える拘束の自由度を減らすことを提案した。具体的には、対象物が環境等から受ける拘束の自由度と同じ次数の自由度の拘束を手首部、ハンド部で除いてやることにより、位置制御マニピュレータによる環境接触作業が実現可能となることを示した。

ただしこの提案は幾何学的な解析のみによるものであり、実際の操作を行った際には摩擦力の影響で過大な接触力が発生する危険、環境との接触は片側にしか拘束をしないため望みの運動が不可能な場合がある、などの問題が存在する。このために力学的な解析を行い、無限に大きな接触力が発生する危険性の判定、望みの運動方向への操作可能性の判定を行ってきた。

しかし、発生する力には不確定性が存在し、一意に決定することができない、という問題がある。これは環境との接触や位置制御マニピュレータによる拘束が受動的なものであること、能動拘束方向に対してそれと直交する方向に受動的な摩擦力が発生すること、等の原因による。これに対し、これまでに、この解析手法を線形計画問題として定式化することで、2次元空間内作業に対し、ある程度一般的な条件で判定できることを提案した。不静定力の大きさを表すパラメータの最大値、最小値を線形計画法で求めることで、範囲が無限か有限か、望みの方向の力が発生可能か否か、判定できるようになった。

しかしこれは2次元空間内作業に対するものであり、実際の3次元空間内では未だ問題は解決されていない。また、実際に作業を遂行する際には、これらの不確定性の他にも、摩擦による悪影響が多くおよび、作業の失敗につながっていることが問題となっている。

### 2. 研究の目的

本研究の大きな目的の一つは、上記手法(線形計画問題による不確定な接触力の存在範囲の限定、望みの操作の可否判定)を2次元作業空間から3次元作業空間へと拡張することである。これまでに提案してきた手法を3次元に拡張するためには、一般に空間の運動空間の次元よりも接触点・接触力の数が多くなり冗長な接触力となる問題が起こりやすい。また、2次元では摩擦円錐を2本の稜線ベクトルで表現可能であったが、3次元では円錐を多角錐で近似することでしか表

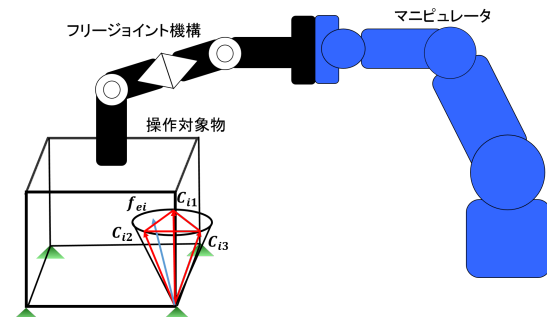
現できないうえ、四角錐以上に近似する場合、接触力を冗長なベクトルの線形和で表現することになる。そこで、接触力が冗長なベクトルの線形和で表現されたときの、物体操作の可否判定手法が必要となる。本研究では、その際にまず必要となる、静止可否判定を行う手法の開発を行う。

また、この他にも摩擦が組み立て作業等へ悪影響を及ぼす状況が考えられる。グリッパで対象物を把持する際に、対象物の初期位置姿勢に誤差があると、掴む際にグリッパのツメと対象物との間の摩擦係数等によっては、対象物がツメと平行とはならず、角度誤差を残したまま把持されてしまう場合がある。この残差により、その後の組み立て作業の成否に悪影響が出る場合がある。そこで本研究では、どのような姿勢誤差が乗る可能性があるのか、組み立て時にできるだけこの誤差による影響を少なくするためには、どのような把持計画をすればよいか、検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 3次元環境接触作業の静止可否判定

下図のように、マニピュレータが環境(床)と接触している操作対象物を誤差吸収用のフリージョイント機構を通して操作する状況を考える。この図の場合、平らな平面と対象物の接触点数は4点と考えられるため冗長となる。さらに、各接触点における摩擦円錐の近似についても図の赤い三角錐のように表現しては、摩擦円錐内の力の多くが三角錐外となり、静止可否判定、操作可否判定に大きな影響を及ぼす懸念がある。

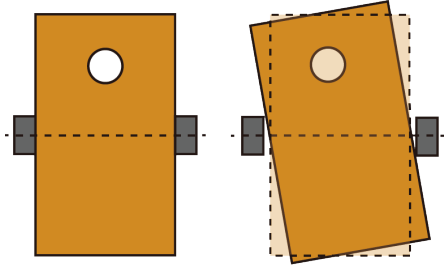


本研究では、接触力が摩擦円錐に入るための条件、各接触点の接触力の合力により静止するか否かの条件について、仮説を立て、力学的な解析等によりその証明をすることで、3次元環境接触作業における静止可否判定手法を構築する。

#### (2) 初期位置姿勢誤差の把持時残差解析

平行グリッパ等を用いて組み立て対象物を把持する際に、ツメの形状としては様々なものがあるが、本研究では最も一般的な幅の短い面形状のツメを考える。このような平行グリッパで対象物を把持する際に、下図のように、理想的には位置姿勢誤差なく把持することが望まれているが、対象物の初期配置に誤差がある場合、摩擦の影響により、把持後(グ

リッパーを閉じた後)に姿勢誤差が生じる場合がある。研究としてはカメラで計測をして誤差なく把持する手法等が提案されているが、計測コストの問題から必ずしもすべての生産システムにとって適した手法ではない。



本研究では、オンラインでの計測をせず、所定の動作のみで把持を行った場合に対象物に残る誤差を解析し、それがその後の組み立て作業の成否に与える影響を、力学的なモデルを構築することで解析する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 3次元環境接触作業の静止可否判定

接触力が摩擦円錐内に存在する条件

「ある接触点において、その接触力がある一組の  $n$  本の冗長な摩擦円錐の稜線ベクトルの正の線形和で表現することができるならば、その接触力は摩擦円錐内に存在する」ことを証明する。そのためには、

**命題1:** 「 $n$  本の冗長な摩擦円錐の稜線ベクトルの線形和で表現された接触力が与えられた時、接触力パラメータが全て正ならば、接触力は摩擦円錐の範囲内に存在すること」

**命題2:** 「ある接触点において、 $n$  本の冗長な摩擦円錐の稜線ベクトルの線形和で表現された接触力が与えられ、その接触力が摩擦円錐内に存在するならば、接触力パラメータが全て正である組み合わせで表現できる」

という2つの命題を解く必要がある。一つ目の命題で  $n$  本の冗長なベクトルを用いても正の線形和ならば摩擦円錐内に存在することが証明され、2つ目の命題で摩擦円錐内にあるならばある一組の正の線形和で表現されることが証明される。

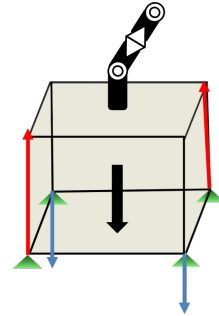
本研究ではこれらの命題に対し、摩擦円錐の稜線ベクトルの線形和として接触力ベクトルを表現する力学モデルを解析し、真であることを証明した。

##### 冗長な接触点数による内力条件の検討

3次元空間における環境接触作業を行う場合、物体の拘束空間の次元に対して接触点数が冗長になる可能性がある。例えば下図のように正方形の物体が環境と面接触しているとすると、重力により物体の運動空間は3次元拘束される。従来研究においては拘束空間の次元数は接触点と同じになるものとして扱っていたが、図のように3次元拘束されていても4点接触として扱われ接触点の数が冗

長になる可能性がある。

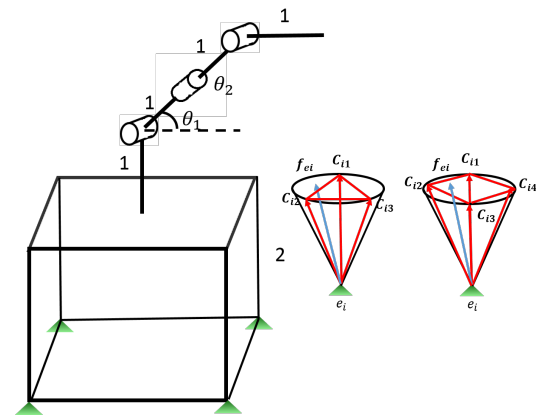
この時各接触点の組み合わせによっては計算上力の大きさが無限大になり過大な内力が発生したと扱われる可能性がある。図のように重力によって発生する力とモーメントと釣り合う力が計算上ありえてしまう場合、実際には過大な内力が発生していないにもかかわらずそのように扱われてしまう。し



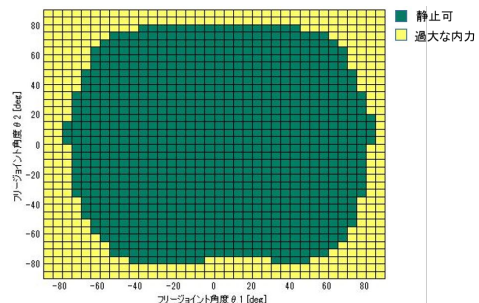
かし本研究では、図のような力の組み合わせは静止条件(接触力はすべて非負)によって事前に弾かれるので冗長な接触点によって力の大きさが無限大になる可能性は排除できる。

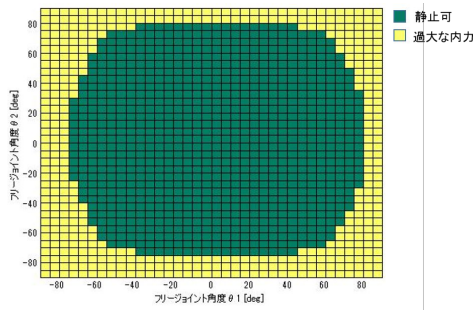
##### 数値解析例

図のようなフリージョイント機構と対象物を用いた3次元モデルについて静止可否判定、及び、過大な接触力の発生危険性の判定を行った。摩擦円錐の近似法として、図のような3角錐近似と4角錐近似を用いた。



このときの結果を下図に示す。上が3角錐近似の場合で、下が4角錐近似である。





(2) 初期位置姿勢誤差の把持時残差解析  
 組み付け作業の失敗原因

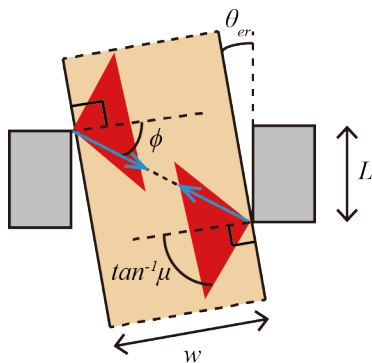
組み付け作業の失敗が発生する原因は、対象物の組み付け部分の誤差が許容範囲外にあるためである。把持は運ばれてきた対象物が理想の位置、つまりパレットの中心に位置していると仮定して作業を行う。しかし、以下の2点からパレット内の対象物の位置姿勢は理想の位置に対して誤差を持ちうる。

- ・パレットは対象物に対して余裕がある
- ・対象物はパレット内で拘束されていない

このため、パレット内で対象物の位置姿勢は一意には定まらず、初期位置姿勢誤差が残る。このため、対象物の組み付け部分にも位置姿勢誤差が発生し、この誤差が作業成功の許容範囲内に存在すれば作業は成功するが、許容範囲から外れた場合には組み付け作業が失敗する。組み付け部分の位置姿勢誤差は、初期位置姿勢誤差、摩擦係数、組み付け部分と把持部の相対位置によって変化する。

把持時に残る誤差のモデル

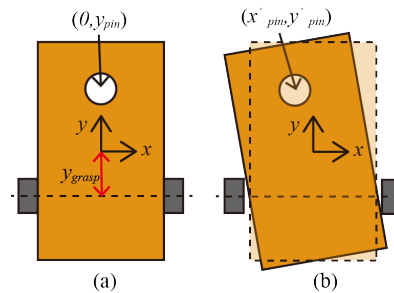
対象物の初期位置姿勢に誤差がある場合、誤差がないものとして平行グリッパで掴みにいくと、下図のように、ツメと対象物の間に姿勢誤差があるままツメが閉じていき、ある摩擦条件のもとでは、それ以上閉じることができなくなり、姿勢誤差が残ったまま把持が完了することになる。



2つのツメからの接触力とそれによるモーメント釣り合う場合、図のように働く力は対向したものとなる。この力が両接触点において摩擦円錐に含まれていると、そのような力が存在可能となり、釣り合うこととなる。

次に、組み付け部分の位置姿勢誤差を解析するために、必要なパラメータを定義する。下図のような把持モデルを用いると、把持位

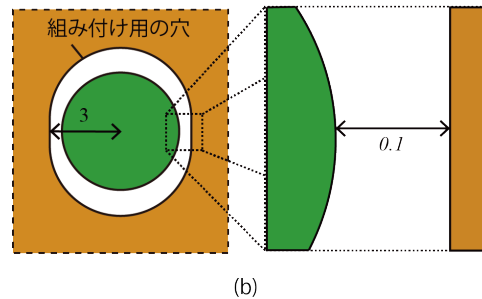
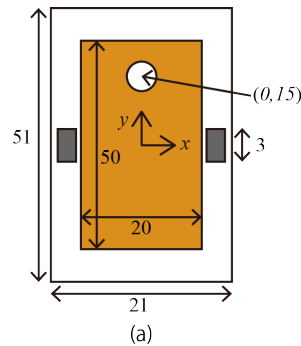
置の座標および、組み付け部分の座標が解析に影響を及ぼすパラメータとなる。



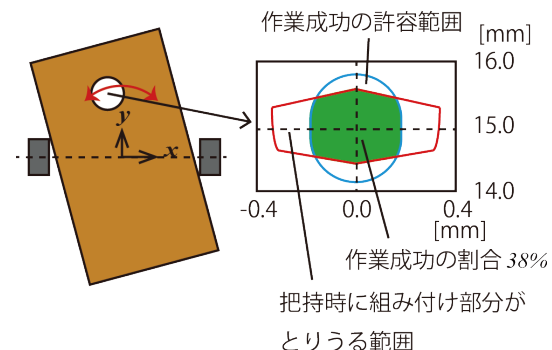
これにより求められる組み付け部分の位置姿勢誤差が、作業に許容される位置姿勢誤差の範囲内であれば作業は成功する、と言える。

シミュレーション

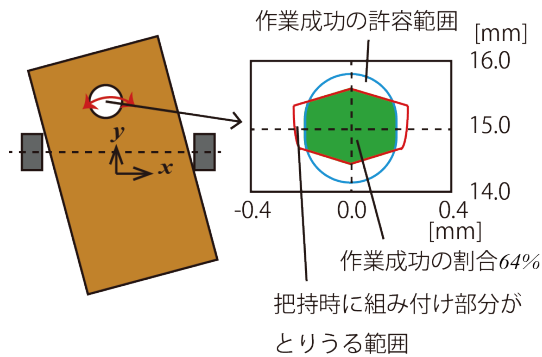
対象物とパレット、グリッパのツメのパラメータを下図のように定める。摩擦係数を0.3とした。これらのパラメータの下で、把持位置のy座標を0, 5, 10, 15[mm]と変化させて、シミュレーションを行った。



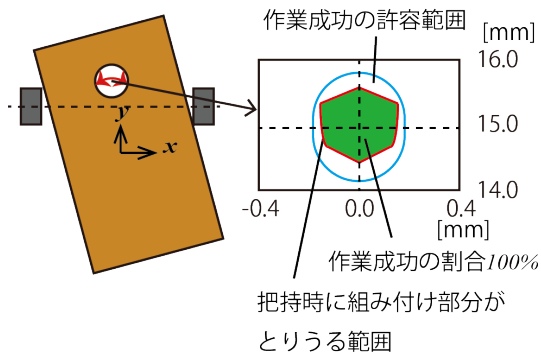
把持時に組み付け部分が取りうる範囲に対して、作業成功の許容範囲に含まれる面積の割合を「作業成功の割合」とする。シミュレーションの結果を下図に示す。



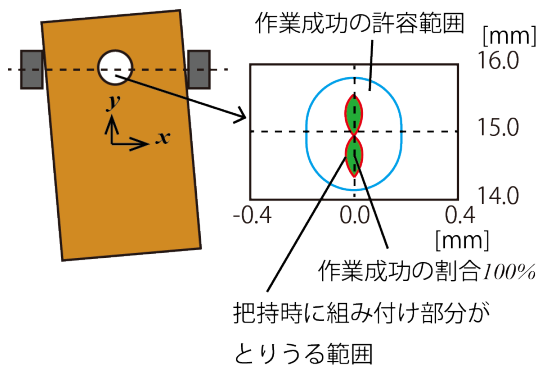
(a) 0mmの場合



(b) 5mm の場合



(c) 10mm の場合



(d) 15mm の場合

### (3) 今後の展開

摩擦による組み立て作業等への不確実性を解析する二例の研究を進めてきた。それぞれの事例について研究が終了したとまでは言えない状況ではあるが、基本的な定式化は完了し、今後はこれらをベースとして、操りの可否、作業の成否の解析を行うシステムを構築していけるものと考えている。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

K.Nagase and Y.Aiyama, Impedance Controller based Obstacle Avoidance with Redundancy of Grasping Pose, J. of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 査読有, Vol.34, 2013, pp. 159-166. <http://csme-journal.nutn.edu.tw/contact.asp>

〔学会発表〕(計 3 件)

A.Suyama and Y.Aiyama. Influence of

Grasping Position to Robot Assembling Task, Proc. of Int. Symp. on Robotics, 2016年6月21~22日, Munich(German).  
 須山晃, 相山康道, 対象物の初期位置姿勢誤差と把持位置が作業の成否に及ぼす影響, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門講演会 2016年6月8~10日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市).  
 K.Sato and Y.Aiyama, Motion Estimation for Environment-Contact Task with Position Controlled Manipulator, Proc. of Int. Symp. on Robotics, 2013年10月24~26日, Seoul(Korea).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ms.esys.tsukuba.ac.jp/>

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

相山 康道 (AIYAMA, Yasumichi)  
 筑波大学・システム情報系・教授  
 研究者番号: 60272374