

	ながた かずゆき		
氏 名	永田 和之		
授 与 学 位	博士 (工学)		
学位授与年月日	平成11年12月8日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項		
最 終 学 歴	昭和61年3月 東北大学工学部精密工学科 卒業		
学 位 論 文 題 目	ロボットハンドによる物体操作と接触センシングに関する研究		
学 位 審 査 委 員	主査 東北大学教授 内山 勝	東北大学教授 小菅 一弘	
	東北大学教授 江村 超	東北大学教授 中野 栄二	

論文内容要旨

第1章 序論

ロボットの物体操作能力を高めるため、ロボットハンドによる把握操作の研究が多く行なわれている。特に多指ハンドは、複数の指と多自由度を有することから、柔軟な把握操作が可能となり、これまで多くの研究が行なわれてきた。多指ハンドによる把握操作は、主に把握理論に基づき、予め把持物体モデルと初期把持点を与え、オープンループ制御により実現されている。しかし、現実には摩擦係数の不確定性や、滑べり・転がりによる接触点の移動が存在するため、把持物体モデルと初期把持点を与えたとしても誤差が累積し、把握が破綻する場合がある。また、実世界にある様々な物体の一つ一つを予めモデル化し、システムに蓄えることは、膨大な労力とコストを必要とし、現実的ではない。実世界でロボットハンドによる把握操作を行なうためには、物体認識の過程と物体操作の過程を並列的・循環的に行い、接触点位置、把持物体モデル、把握状態をロボットハンドの把握制御系にフィードバックするセンサベースなロボットハンドシステムが必要となる。物体認識の過程と物体操作の過程を融合したセンサベースな物体操作は、ロボットの活躍の場の拡大に伴う多種多様な物体の把握操作を可能にするものと期待される。

また、実世界で把握操作を行なう場合、作業の難易度に応じてロボットハンドを使い分けることが望ましい。例えば、空中での持ち替え操作のように高度な物体操作では、多指ハンドのような多自由度機構を用いなければ実現できない。一方、固定軸回りの回転操作のように比較的単純な操作は、多指ハンドのような複雑な操作系を用いるよりも、機能を限定した単純な機構のハンドによる方が実用的である。

本研究の目的は、実世界で柔軟な物体操作が行なえる把握操作技術を開発することである。本研究では、力覚センサの誤差の影響を考慮した接触点センシング手法の確立、高度な把握操作実現のための、接触点センシングをベースとしたセンサベースな多指ハンドシステムの構築、単純な物体操作を効率良く実行するための、機能を限定した単純な機構の指先に回転テーブルを有するハンドの開発を行なう。

第2章 力覚による接触点検出

接触点情報は、物体認識、把握状態検出にも用いられ、ロボットハンドによる把握操作において最も重要な情報である。本章では、力覚により高精度で接触点を検出するためのセンシング手法について述べる。力覚により接触点を検出するアルゴリズムとして、把持物体の頂点を外部環境と接触させたときの接触頂点を検出するアルゴリズムと、Salisbury, Bicchiにより提案された、ハンド指先と把持物体との間の接触点を検出するアルゴリズムがある。

本章では、まず把持物体が多面体であるとき、その頂点を外部環境と接触させたときの接触頂点位置を力覚により求めるアルゴリズムを提案した。また、本アルゴリズムにおいて、力覚データの誤差が接触頂点位置誤差に与える影響を調べ、誤差評価を定めるとともに、高精度で接触頂点を検出するための測定条件を明らかにした。

次に、ハンド指先と把持物体との間の接触点を高精度で検出するためのセンシング手法について検討した。まず、多指ハンドの把握制御に必要な指先力を検出するために、多指ハンドの指に挿入可能な小型6軸力覚センサを開発した。また、Salisbury, Bicchiにより提案された、指と対象物との間の接触点を検出するア

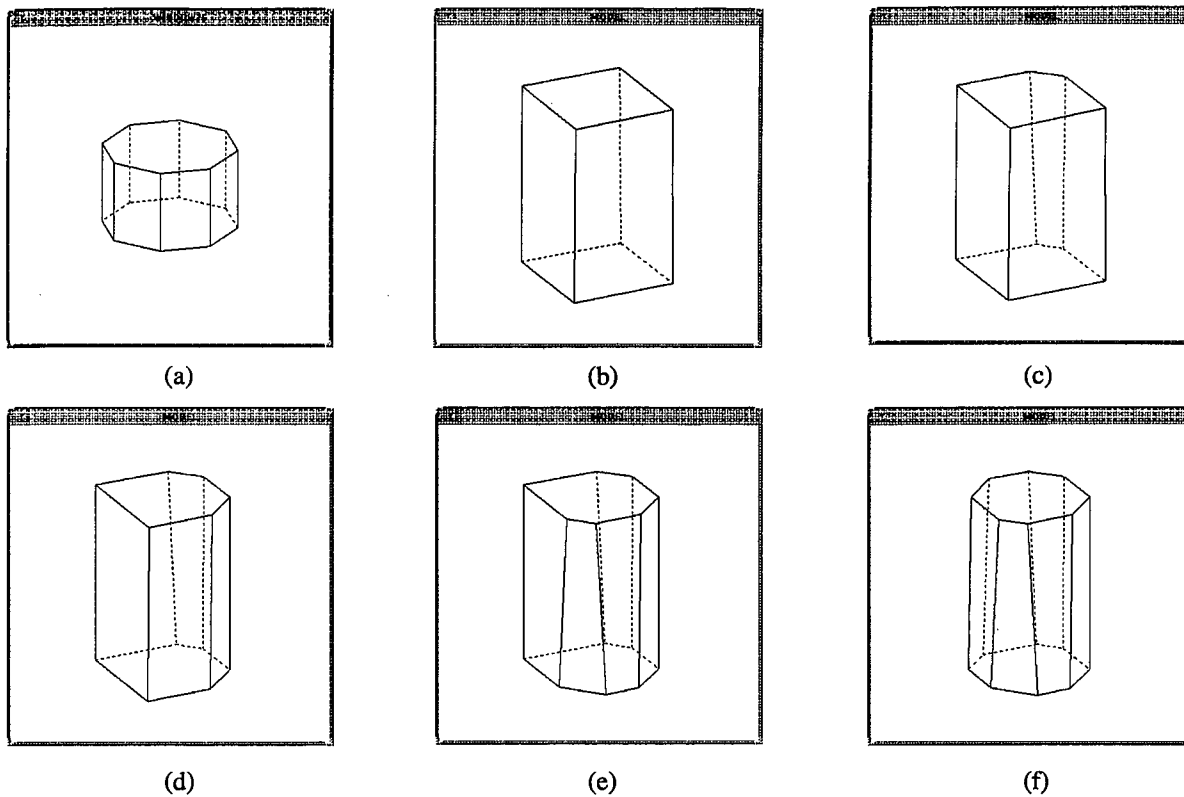


Fig. 1 Experimental results of acquiring an object model, (a): the geometrical model of the grasped object, (b): initial model acquired by initial grasping, (c)–(f): the model acquired by manipulation with the multifingered hand.

ルゴリズムについて、力覚センサの歪み出力の誤差が接触点位置誤差に与える影響を調べ、誤差評価を導くとともに、高精度で接触点を検出するための測定条件を明らかにした。その結果、センシングの立場から見た把持力の大きさの設定指針を得ることができた。

第3章 接触情報による把握位置姿勢推定

ロボットハンドで物体操作を行なうためには、把持物体の位置姿勢を検出し、操作に伴う把握状態の変化を制御系にフィードバックする必要がある。これまで、把握位置姿勢を推定する研究として、ロボットハンドの指に触覚センサを装備し、指と把持物体との接触により得られる複数の局所情報を利用する研究が多く行なわれている。これらの研究は、多指ハンドのように、指と対象物との接触が空間的に配置できることを前提としており、平行グリップによる把持に適用できるアルゴリズムは少ない。

本章では、指と把持物体との間の接触情報を利用するのではなく、把持物体と外部環境との間の接触情報を利用した把握状態推定手法を提案した。本手法は、把持物体が多面体である場合について、探り動作により、その頂点を外部環境と接触させ、第2章で述べた力覚による方法やロボットの関節角情報を用いて接触頂点位置を検出し、把持物体モデル上の頂点と照合して、ハンド座標系—把持物体座標系間の変換パラメータをニュートン法により求めるものである。本手法は、指に特別な触覚センサを装備することなく、ロボットに標準的に装備されている力覚センサや関節角センサを用いて把握状態が推定できることに特徴がある。また、本手法は、多指ハンドによる把持ばかりでなく、平行グリップで把持した物体の把握位置姿勢推定にも適用することができる。

第4章 多指ハンドによる物体操作と把持物体モデル獲得

我々の身の回りには、意匠をこらした様々な物体が存在する。ロボットハンドで把握操作を行なうためには対象物モデルが必要となるが、多種多様な物体の一つ一つを予めモデル化し、システムに蓄えることは、膨大な労力とコストを必要とし、現実的ではない。これら多様な物体を扱うためには、把握操作の過程で対象物情報を獲得することが望ましい。

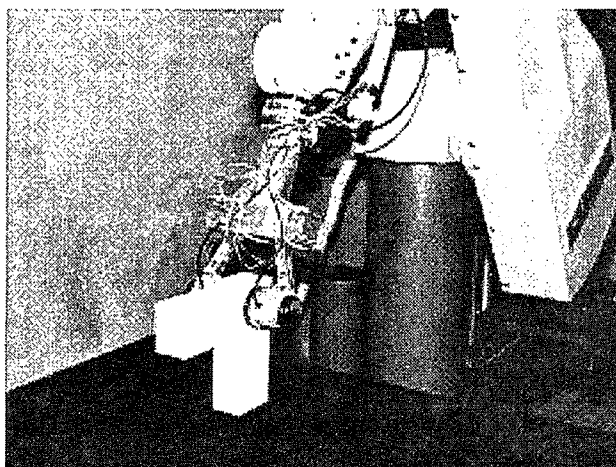


Fig.2 Pivot operation with the gripper which has turntable at each fingertip.

本章では、多指ハンドによる物体操作の過程と対象物認識の過程を並列的・循環的に行ない、把持物体の形状モデルを獲得しつつ物体操作を行なう多指ハンドシステムを構築した。まず、多指ハンドの指を、物体を安定に把持するための指（把持指）と物体操作のために移動する指（操作指）に分類し、把持指の数に応じて、物体操作モードと把持力パターンのセットを用意した。本多指ハンドシステムは、予め対象物に関する情報が十分得られていなくても、接触点情報のみを用いて物体操作モードと把持力パターンの選択が行える。接触点においては、指先表面と対象物表面は法線ベクトルを共有することから、対象物の接触面が計算できる。このことから、把持物体が多面体である場合には、指先力覚情報から計算される接触面を組み合わせることで、把持物体を表現することができる。そこで、物体操作時における各指の接触面の移動を観察し、指が新たな面に移動すると、その面を把持物体モデルに付加することで、物体操作の過程で把持物体モデルをインクリメンタルに獲得するアルゴリズムを開発した。獲得された形状モデルは把持物体の位置姿勢の計算に用いられ、次のステップの物体操作に利用される。接触面の移動は、(a)接触法線の変化、(b)法線間の角度、(c)重心と接触面の距離により監視した。Fig. 1に把持物体モデル獲得の実験結果を示す。本手法は、物体操作を行ないながら把持物体モデルを獲得するので、実世界にある様々な物体の把握操作を可能にするとともに、把握操作に必要な冗長な情報は獲得しないという特徴がある。

第5章 指先に回転テーブルを有するハンドの開発と物体操作

人間の手を観察すると、2本指で対象物をつまみ、固定軸回りの回転操作など、単純な操作を行なっている場合が多い。このような単純な物体操作は、多指ハンドのような複雑な操作系によるのではなく、機能を限定した単純な機構のハンドによる方が実用的である。

本章では、比較的単純な物体操作を対象とした、指先に回転テーブルを有するハンドの機構と、本ハンドにより実現される物体操作について述べる。本ハンドは平行グリッパの各指先に、小型超音波モータにより駆動される回転テーブルを設けたもので、回転テーブルは回転角と回転速度を制御することができる。

本ハンドによる操りは、回転テーブル中心軸回りの回転操作の他に、外部環境の拘束を利用することで様々な操作が行なえる。本章では、低次対偶で置かれている物体の操りについて、具体的に、ナットの回転操作、直方体ブロックの平面上での滑らし操作、長竿の引き出し操作を取り上げ、準静力学的解析から、これら物体操作を実現するための条件を求めた。また、それぞれの操作について実機による実験を行ない、従来の平行グリッパの各指先に1自由度の回転機構を付加した単純な機構のハンドでも、外部環境の拘束を利用することで様々な操りが実現できることを実証した。Fig. 2に本ハンドによる持ち替え操作の様子を示す。

第6章 結論

実世界で柔軟な物体操作が行なえる把握操作技術の開発を目指し、力覚による接触点センシングをベースとしたセンサベースな多指ハンドシステムの構築と、単純な機構で確実に物体操作が行なえるロボットハンドの開発に焦点をしばり研究を行なってきた。本章では、各章ごとにその要点をまとめた。

審査結果の要旨

ロボットの活躍の場が拡大するに伴い、取り扱う対象物が多様化し、ハンドの把握操作能力向上への要求が高まっている。このような要求に応えるため、著者は、柔軟な把握操作技術の開発を目的として、力覚により高精度で接触点を検出するためのセンシング手法、および物体の接触頂点情報を利用した把握状態推定手法を提案するとともに、これらの手法を統合し、物体操作の過程と対象物認識の過程を並列的かつ循環的に行う多指ハンドシステムを提案、構築した。さらに、指先に回転テーブルを有し、単純な操作を効率的に実行する新しいタイプのロボットハンドを開発し、その有効性を検証した。本論文は、以上の研究成果についてまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、多指ハンドの指先に挿入可能な小型力覚センサの開発について述べるとともに、力覚による接触点検出アルゴリズムの誤差評価式を導いている。この評価式に基づき、高精度で接触点を検出するための測定条件を示し、その有効性を実験的に検証している。

第3章では、第2章の結果に基づき、多面体と外部環境との間の接触頂点情報を用いて把握状態を推定する手法を提案し、その有効性を実験的に検証している。この手法は、平行グリップで把握した物体の把握状態推定にも適用でき、独創的な手法である。

第4章では、多指ハンドによる物体操作の過程と対象物認識の過程を並列的かつ循環的に行い、把握物体の形状モデルを獲得しつつ物体操作を行う多指ハンドシステムを提案、構築し、その有効性を実験により検証している。これは高度なシステム統合である。

第5章では、並行グリップの指先に回転自由度を付加することにより物体操作を可能としたロボットハンドを提案し、低次対偶で置かれた物体の把握操作を効率的に実現している。このハンドは、新しいタイプのハンドとして注目される。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、ロボットハンドによる把握操作に関し、力覚により接触点を検出するためのセンシング手法、および物体の接触頂点情報を利用した把握状態推定手法を提案し、さらに、これらの手法を統合し、柔軟な把握操作が可能な多指ハンドシステムを提案、構築するとともに、単純な操作を効率的に実行する新しいタイプのロボットハンドの開発について述べたもので、その成果はロボット工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。