

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主論文の要旨

論文題目 Hand-Arm Robot Manipulation Using Image and Tri-axial Tactile Data
(視覚と三軸触覚データによるハンドアームロボットのマニピュレーション)
氏名 SUKARNUR Che Abdullah

論文内容の要旨

近年のロボットの知能化において、センサ技術はロボットが外部環境を認識して行動の戦略を策定する上で不可欠である。特に触覚センサは、ロボットが作業現場に辿り着いた後に点検・組み立てなどの作業を遂行する上で重要な情報を与える。したがって、移動ロボットの研究が進んだ次の段階として、ロボットに具体的な作業を行わせることを考える際に触覚センサの利用は避けては通れない課題となっている。

視覚センサと触覚センサでは、一度に獲得できる情報量が異なるために、両者の守備範囲が自ずと異なっている。視覚センサでは、広い領域の探索が可能である代わりに、距離情報に変換する際に無視できない誤差を含むことが多い。これに対して、触覚センサは情報の獲得が接触部分に限定されるために探索範囲が視覚に比べて顕著に狭いが、その代わりに接触位置はロボットマニピュレータの運動学で精度よく同定される。ロボットを合理的に運用する上で、触覚と視覚を組み合わせるといふ考え方は重要である。

一方、センサの開発の現状を調査すると、視覚センサについては CCD カメラや CMOS カメラなどほぼ決定版として考えられるセンサが利用できる環境にあるのに対して、触覚については Harmon が 1980 年に触覚の重要性について指摘されてから約 30 年も経過しているにも関わらず未だに決定版として扱えるセンサは見当たらない。これは、触覚センシングがセンサと対象の接触によってなされるために、接触・衝突にまつわる様々な困難性があるためと考えられる。

本論文では、論文の位置付けを明確にするために、まず触覚センサについての調査結果についてまとめた。その中で、接触面に発生する応力ベクトルの分布を精密に捉えることがセンサと対象の接触の物理現象を評価する上で最も合理的であることが示された。その応力ベクトルの分布を計測は、三軸触覚センサによって初めてなし得るために、20 年間の三軸触覚センサの歩みについてサーベイを行った。これまでに、触覚センサの基本原則として半導体の piezo 抵抗変化を計測するもの、およびセンサ素子をゴムとして素子の変形を画像によって計測するものが提案されている。特に後者は、耐衝撃性や馴染みに優れているためにセンサをロボットに装着して運用する上で有利であることがわかった。このため、本論文でもゴム素子の変形を画像によって計測する方式を採用することにした。

次に、触覚データと共に獲得する視覚センシングの研究について、本研究と関連する分野での現状の問題点について調査した。エッジ線抽出の精度を高める研究については、数多くの事例があり既に実際に供されているのに対して、ステレオビジョンによる距離計測は触覚センサによる距離計測に比べて精度が十分でないという問題があることがわかった。ロボットの剛性は高く、特に工業ロボットではモーション・コントロールの精度を高めるために可能な限り高い剛性を確保する設計をしているので、視覚センサの情報のみで行動計画を立てると不意の接触により末端効果器を破損することが十分に予測されることが明らかになった。

以上の触覚・視覚センサの研究開発の現状を鑑みて、本研究では触覚と視覚センサから得られるデータを両方活用して物体形状の獲得や組み立て動作などの作業を実現できる双腕ロボットを研究開発する。本研究の第一の目的として、指先に三軸触覚センサを装着し、ステレオビジョンカメラを搭載した頭部を有する双腕ロボットシステムの開発する。第二に、三軸触覚センサから得られるデータを効率的に活用して得られた情報により環境や把握物の状態を評価して、その結果に基づいて物体手渡し、蓋閉めやピックアンドプレースなどの作業を実現する。第三に、計測範囲が狭いが位置データの精度の高い触覚センサのデータの性質を活用して、広い計測範囲を有する視覚センサから得られた形状データを校正する。

本論文は、4章から構成される。まず1章では、上述の本研究の背景と目的を述べている。触覚センサと視覚センサと利点と欠点を述べた後に、それらの利点欠点を補い合う手法としてセンサフュージョンを紹介している。次に本研究の意義・位置付けを明確にするために、従来の触覚センサに関する文献調査の結果をまとめている。その中で、連続体の力学の観点から三軸触覚センサが触覚センサとして本質的に優れていることを論じている。その後、三軸触覚センサに焦点を当て20年間の歩みと各種三軸触覚センサの原理についてまとめている。さらに、触覚センサと視覚センサのデータフュージョンを行った事例についても代表的なものの四件に絞って紹介している。以上の議論の後に、本研究の目的とその実現に向けてのアプローチの仕方についてまとめている。

第2章では、本研究で使用するセンサとロボットシステムの開発、およびそれを用いて触覚データに基づく反射行動によるタスク遂行の実験について述べている。まず、本ロボットシステムのフィンガが部に合わせて開発した光導波形三軸触覚センサについて述べている。すなわち、この触覚センサは、センサ素子として機能する41個のゴム触子、アクリルドーム、光源装置、ファイバースコープおよびCCDカメラなどから構成される。光源装置の光はアクリルドームに導かれドームを照明する。ゴム触子の先端が対象物体に触れるともう一端がアクリルドームに接触し、垂直力の大きさに比例して輝度値が増加する。また、せん断力成分が大きいほど輝度重心が移動する。これらの輝度値と輝度重心の移動量から垂直力とせん断力をそれぞれ同定することを原理としている。以上で述べた触覚センサを先端に装着したフィンガ二本でハンドを構成し、それを5自由度のアームの先端に装着することによりハンド・アームロボットを製作した。フィンガの自由度は3であるので、根元の自由度を手首の自由度として活用することにより6自由度のアームの動きを実現している。このハンド・アームロボットを二本用意することにより目的の双腕ロボットシステムを完成した。

この章では、ロボットシステムの開発に続いて、環境情報に基づく反射行動により簡単な作業を実現した事例を紹介している。三軸触覚センサによりフィンガに作用する圧覚だけでなく指表面で生じる滑りも計測できるために、物体搬送時に把握した物体が滑り落ちようとしたときに把握力を適度に上昇させる反射行動が可能となる。また、把握した物体をテーブルに置こうとしたとき、上向きの滑りが発生すると同時に把握力を緩めて把握した物体を手放すなどの反射行動も可能となる。さらに、ねじを締めるときに、ねじと指の間で滑りが発生したらねじ

を挟んで持っている二本の指の間隔を狭めるという反射行動によりねじ締めに必要な指先経路を靈等的に獲得できることも可能となる。このほかにも、いくつかの反射行動を実現して、これらを適宜組み合わせることにより、左手でボトルをもち、右手で持ったキャップを閉め入れる組み立て作業を空中で実現することができた。本章では、設計・製作した双腕ロボットシステムの健全性を確認するとともに触覚データ駆動の行動選択の有効性について確認した。

第4章では、パン・チルトの二自由度を有するロボット頭部の設計製作とステレオビジョンカメラの製作、並びにハンド・アームロボットによる物体の外形の獲得実験について述べている。ステレオビジョンによる距離計測の実験では、標準的なステレオビジョンのプログラムとしてOpenCVに収録されているプログラムを用いて距離計測を行った。ロボットハンドの手が届く範囲として、700mmまでの距離に置かれた物体とカメラの間の距離を計測したところ±10mmの誤差が発生した。エッジ線抽出としてロバスト性の高いCannyのアルゴリズムを採用して物体形状の抽出を行ったが、抽出図形の大きさに上述のエラーが含まれるという問題が生じた。これを解消するために、ハンド・アームロボットにより外形をなぞることにより外形を抽出することを試みた。第2章で述べたように、本ロボットの指先で滑りが発生すると把握力を上昇させる行動をとるため、凸形状の物体の探索では過度に把握力が上昇してしまう問題があった。これを解消するために、把握力の上限値と下限値を設け、下限値を下回るときは把握力を上昇させ、上限値を上回ると把握力を減少させるように反射行動を調整した。その結果、把握力の上限値と下限値を可能な限り狭めることにより精度の高い外形走査が可能となった。実験の結果、凸部での形状の誤差が0.5mmと小さかったが凹部に指が入りきらず実際の大きさより5mm程度大きく評価していた。そこで、凸部の形状データをもとに視覚データを較正することにより、凹部と凸部両方に対して精度が高く、さらに触覚センサで走査していない箇所の形状データも視覚データから獲得が可能となること分かった。

最後の第5章では、結論を述べる。本章で得られた結論を以下に要約する。

- ・文献調査から、触覚データから精度の高い距離情報が得られるが、情報の走査範囲に限定されるために狭い範囲の情報しか獲得できない。一方、視覚データの距離情報の精度はそれほど高くないものの、視覚には広い範囲のデータを一括で得られる特性があることなどがわかった。
- ・三軸触覚センサには、圧力分布だけでなくせん断力の分布をも計測できる特性があることから、センサと物体の接触によって生じる現象を忠実に計測できる特性があることから、本研究においても同触覚センサを利用することとした。
- ・触覚センサを先端に装着したフィンガ二本でハンドを構成し、それを5自由度のアームの先端に装着することによりハンド・アームロボットを製作した。フィンガの自由度は3であるので、根元の自由度を手首の自由度として活用することにより6自由度のアームの動きを実現している。このハンド・アームロボットを二本用意することにより目的の双腕ロボットシステムを完成した。
- ・本ロボットシステムによると、三軸触覚センサによりフィンガに作用する圧覚だけでなく指表面で生じる滑りも計測できるために、把握力と滑り力の大きさによって把握力を調整する反射行動が実現できる。いくつかの反射行動を実現して、これらを適宜組み合わせることにより、左手でボトルをもち、右手で持ったキャップを閉め入れる組み立て作業を空中で実現することができた。
- ・物体の外形をなぞるようにするために、把握力の上限値と下限値を設け、下限値を下回るときは把握力を上昇させ、上限値を上回ると把握力を現象させるようにした。この結果と画像計測により得られた外形形状のデータを組み合わせて用いることにより、走査していない箇所の形状データも視覚データから0.5mmの誤差範囲で獲得が可能となること分かった。

本研究の成果は、単に物体形状のデータ獲得について触覚と視覚の融合により精度の向上と計測範囲の拡大に留まっている。今後は、視覚と触覚の協調のレベルを向上することに努め、簡単な指差し指示によりロボットが行動を選択して命令者の意図どおりに動かすことや、人とロボットの間で物体の手渡しができるようにするなどの研究へと発展させたい。