

# 博士学位論文審査要旨

2008年1月15日

論文題目： 分布型3軸力センサを用いたマニピュレーションシステムに関する研究

学位申請者： 伊藤 彰人

審査委員：

主査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	辻内 伸好
副査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	小泉 孝之
副査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	横川 隆一

要 旨：

現在、ロボットに関する様々な研究、開発が行われている。なかでも、産業用ロボットにおける技術の向上は目覚ましい。高速・高精度化された自動生産システムでは、品質の向上、コストの削減、多品種少量生産など産業界の様々な要求に応え、数多くの産業用ロボットが活躍している。その一方で、近年多発している火災や地震などの災害現場において活躍する救助ロボットや、少子高齢化社会を目前に控えた医療・介護分野での作業を行う人間支援型ロボットなど、高度な分野についてもロボットの需要が高まっている。これらは、現在、研究段階であり、実現には至っていないが、今後、災害救助や介護・福祉などの新しい分野に、ロボットの活躍の場が広がっていくことが期待されている。このようなロボットのエンドエフェクタとして、人の手を模倣した多指ハンドが注目されており、多指ハンドを用いた様々な材質、大きさの対象物の把持、把持対象物を目標軌道に沿って運動させる操り等に関する研究が数多く行われている。このようなマニピュレーションにおいては、指先力を制御する必要があるため、これを計測するロボット指用触覚センサが重要となる。

現在市販されている触覚センサは力覚センサが主であり、ロボットハンドによる安定把持や、把持物体の操り動作などのマニピュレーションを行う際に、ハンドと対象物体間で生じる滑りを相対変位として正確に計測することは出来ない。このようなセンサを用いた把持や操りでは、力の作用点、物体との接触条件などに仮定を設けなくてはならず、人が備える『器用な手』に比べ、ロボットハンドの器用さは圧倒的に劣ると言わざるを得ない。よって、力の作用点、滑りを計測できるセンサを開発することができれば、様々な仮定を設ける必要がなくなり、ロボットハンドの器用さは飛躍的に向上すると考えられる。

そこで、本論文では、力センサのセンシング能力の向上、ロボットハンドの器用さの向上を目的とし、力の作用点、滑りに注目し、垂直力とせん断力を計測できる小型センサ素子を多数配列したロボット指用分布型3軸力センサを開発している。また、この分布型3軸力センサを用いたマニピュレーションシステムを構築している。

本論文は全6章から構成される。第1章は緒論である。

第2章では、垂直力とせん断力を計測可能であり、小型化できる3軸力センサ素子の構造を提案し、その機能検証モデルを試作している。この機能検証モデルは目標となる寸法の5倍のモデルであり、その寸法は長さ25[mm]、幅25[mm]、高さ10[mm]である。この機能検証モデルを用いた有限要素解析及び試作機による実験を行い、本センサ素子における基本性能を検証している。そして、機能検証モデルを多数配列した分布型3軸力センサを開発している。

第3章では、分布型3軸力センサを用いた触覚情報処理技術を開発している。高度なマニピュレーションを実現するためには、ロボットハンドの指先に作用する作用力、作用モーメント、力の作用点を計測する必要がある。さらに、センサと接触物体間に生じる滑りを検出することが不可欠である。第2章で試作した分布型3軸力センサは作用する力を3分力の分布情報として計測できるので、各センサ素子の出力をもとにセンサ全体に作用する作用力、センサ平面に垂直な軸周りの作用モーメントを求め、滑りを検出する触覚情報処理アルゴリズムを開発している。そして、本研究で試作した分布型3軸力センサの機能検証モデルを用いて、開発した触覚情報アルゴリズムの有効性を検証している。

第4章では、第2章で示したセンサ素子の機能検証モデルの小型化を行い、ロボット指用分布型3軸力センサを開発している。開発したロボット指用分布型3軸力センサに使用するセンサ素子の大きさは、長さ5.0[mm]、幅5.0[mm]、高さ1.0[mm]である。センサ素子は、衝撃力により簡単に塑性変形し、破損しないよう、剛性に注意を払う必要がある。しかし、センサ素子の剛性を高くすると、センサとしての感度が悪化する。従って、第4章では、歪ゲージ感度、力覚感度、条件数の3つの評価値を用いて小型センサ素子の起歪部の構造評価を行い、センサ素子の基本性能の検証を行っている。そして、この小型センサ素子を用いたロボット指用分布型3軸力センサを開発している。

第5章では、本研究で開発したロボット指用分布型3軸力センサを搭載したロボットハンドにおける物体把持制御系を構築している。このロボットハンドを用いた物体把持実験を行い、本研究で開発したロボット指用分布型3軸力センサの有効性を評価している。制御系の構築に関しては、位置制御に基づくコンプライアンス制御を用いた把持制御系を設計している。コンプライアンス制御を用いることで、制御モードを切り換えることなく自由、拘束両空間に対処することが可能となるため、位置と力のハイブリッド制御などの手法に比べて作業計画を単純化できる。また、実際にハンドを使用する場合には、把持対象物に作用する外乱や質量変化などによって生じる滑りに対応する必要がある。よって、第5章では滑りに対応可能な把持制御系を構築し、その有効性を検証している。

第6章は、本研究の総括およびまとめである。

本研究の成果は、近い将来、多くの分野で活躍するであろうロボットの高性能化に寄与するものであり、学術的ならびに工学的に高く評価できる。従って本論文は、博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める。

## 総合試験結果の要旨

2008年1月15日

論文題目： 分布型3軸力センサを用いたマニピュレーションシステムに関する研究

学位申請者： 伊藤 彰人

審査委員：

主査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	辻内 伸好
副査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	小泉 孝之
副査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	横川 隆一

要 旨：

本論文の提出者は、本大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を2005年3月に修了し、2005年に同博士課程（後期課程）に入学し、各年度において真摯に研究に取り組み、優れた成果を挙げている。また英語の語学試験に合格し、ドイツ語についても十分な能力を有すると認定されている。

本論文の主たる内容は、Proc. of IEEE IROS2004 pp.331-336, Proc. of IEEE IROS2005 pp.1650-1655, 日本機械学会論文集C編 72巻721号 pp.2721-2726, Proc. of IEEE IECON2006 pp.3046-3051, 同志社大学理工学研究報告第48巻第3号 pp86-94, Proc. of IEEE ROBI02007 pp.1309-1314に掲載され、すでに十分な評価を受けている。

昨年12月22日午前10時より約1時間半にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により、論文に関連する諸問題につき口答試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力ならびに語学力は十分であることが確認できた。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士学位論文審査要旨

2008年1月15日

論文題目： 分布型3軸力センサを用いたマニピュレーションシステムに関する研究

学位申請者： 伊藤 彰人

審査委員：

主査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	辻内 伸好
副査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	小泉 孝之
副査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	横川 隆一

要 旨：

現在、ロボットに関する様々な研究、開発が行われている。なかでも、産業用ロボットにおける技術の向上は目覚ましい。高速・高精度化された自動生産システムでは、品質の向上、コストの削減、多品種少量生産など産業界の様々な要求に応え、数多くの産業用ロボットが活躍している。その一方で、近年多発している火災や地震などの災害現場において活躍する救助ロボットや、少子高齢化社会を目前に控えた医療・介護分野での作業を行う人間支援型ロボットなど、高度な分野についてもロボットの需要が高まっている。これらは、現在、研究段階であり、実現には至っていないが、今後、災害救助や介護・福祉などの新しい分野に、ロボットの活躍の場が広がっていくことが期待されている。このようなロボットのエンドエフェクタとして、人の手を模倣した多指ハンドが注目されており、多指ハンドを用いた様々な材質、大きさの対象物の把持、把持対象物を目標軌道に沿って運動させる操り等に関する研究が数多く行われている。このようなマニピュレーションにおいては、指先力を制御する必要があるため、これを計測するロボット指用触覚センサが重要となる。

現在市販されている触覚センサは力覚センサが主であり、ロボットハンドによる安定把持や、把持物体の操り動作などのマニピュレーションを行う際に、ハンドと対象物体間で生じる滑りを相対変位として正確に計測することは出来ない。このようなセンサを用いた把持や操りでは、力の作用点、物体との接触条件などに仮定を設けなくてはならず、人が備える『器用な手』に比べ、ロボットハンドの器用さは圧倒的に劣ると言わざるを得ない。よって、力の作用点、滑りを計測できるセンサを開発することができれば、様々な仮定を設ける必要がなくなり、ロボットハンドの器用さは飛躍的に向上すると考えられる。

そこで、本論文では、力センサのセンシング能力の向上、ロボットハンドの器用さの向上を目的とし、力の作用点、滑りに注目し、垂直力とせん断力を計測できる小型センサ素子を多数配列したロボット指用分布型3軸力センサを開発している。また、この分布型3軸力センサを用いたマニピュレーションシステムを構築している。

本論文は全6章から構成される。第1章は緒論である。

第2章では、垂直力とせん断力を計測可能であり、小型化できる3軸力センサ素子の構造を提案し、その機能検証モデルを試作している。この機能検証モデルは目標となる寸法の5倍のモデルであり、その寸法は長さ25[mm]、幅25[mm]、高さ10[mm]である。この機能検証モデルを用いた有限要素解析及び試作機による実験を行い、本センサ素子における基本性能を検証している。そして、機能検証モデルを多数配列した分布型3軸力センサを開発している。

第3章では、分布型3軸力センサを用いた触覚情報処理技術を開発している。高度なマニピュレーションを実現するためには、ロボットハンドの指先に作用する作用力、作用モーメント、力の作用点を計測する必要がある。さらに、センサと接触物体間に生じる滑りを検出することが不可欠である。第2章で試作した分布型3軸力センサは作用する力を3分力の分布情報として計測できるので、各センサ素子の出力をもとにセンサ全体に作用する作用力、センサ平面に垂直な軸周りの作用モーメントを求め、滑りを検出する触覚情報処理アルゴリズムを開発している。そして、本研究で試作した分布型3軸力センサの機能検証モデルを用いて、開発した触覚情報アルゴリズムの有効性を検証している。

第4章では、第2章で示したセンサ素子の機能検証モデルの小型化を行い、ロボット指用分布型3軸力センサを開発している。開発したロボット指用分布型3軸力センサに使用するセンサ素子の大きさは、長さ5.0[mm]、幅5.0[mm]、高さ1.0[mm]である。センサ素子は、衝撃力により簡単に塑性変形し、破損しないよう、剛性に注意を払う必要がある。しかし、センサ素子の剛性を高くすると、センサとしての感度が悪化する。従って、第4章では、歪ゲージ感度、力覚感度、条件数の3つの評価値を用いて小型センサ素子の起歪部の構造評価を行い、センサ素子の基本性能の検証を行っている。そして、この小型センサ素子を用いたロボット指用分布型3軸力センサを開発している。

第5章では、本研究で開発したロボット指用分布型3軸力センサを搭載したロボットハンドにおける物体把持制御系を構築している。このロボットハンドを用いた物体把持実験を行い、本研究で開発したロボット指用分布型3軸力センサの有効性を評価している。制御系の構築に関しては、位置制御に基づくコンプライアンス制御を用いた把持制御系を設計している。コンプライアンス制御を用いることで、制御モードを切り換えることなく自由、拘束両空間に対処することが可能となるため、位置と力のハイブリッド制御などの手法に比べて作業計画を単純化できる。また、実際にハンドを使用する場合には、把持対象物に作用する外乱や質量変化などによって生じる滑りに対応する必要がある。よって、第5章では滑りに対応可能な把持制御系を構築し、その有効性を検証している。

第6章は、本研究の総括およびまとめである。

本研究の成果は、近い将来、多くの分野で活躍するであろうロボットの高性能化に寄与するものであり、学術的ならびに工学的に高く評価できる。従って本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。