

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 ティエティエルコブ ズミトリー (Dzmitry Tsetserukou)

本論文は「Whole-Sensitive Anthropomorphic Robot Arm Based on Optical Torque Sensing Technique and Its Control Algorithm Providing Compliant Interaction with Environment (光学式全軸トルクセンサアームと外界とのコンプライアントなインタラクションが可能な制御アルゴリズムの研究)」と題し、5章からなる。従来の産業用ロボットにおいては、ロボットが工場のような構造化された環境で利用されるため、人間とのインタラクションを起こさないようにすることで安全を確保してきた。しかし、ロボットの活用場面が広がるにつれ、生活空間など構造化されていない環境で、人間とのインタラクションが起きうる状況下でロボットを利用するための技術が求められている。それに対する取り組みも始まっているが、多くの一般的なロボットアームにおいては、手先でしかロボットと人間の安全なインタラクションが実現されていない。また、そのようなロボットアームの手先に使用される歪ゲージを用いた従来の6軸力センサは、ノイズが大きく、大型で壊れやすく高価であるという欠点を有している。本論文では、手首のみならず肘や肩も含めた腕全体において環境とロボットの安全なインタラクションを可能とするために、新型の光学式トルクセンサに基づくローカルインピーダンス制御を実現することにある。新型センサの開発とそれを用いた制御手法の提案という独自の方法を提案し、かつ実際のシステムを構成することで、構造化されていない環境下での動的なインタラクション可能なシステム開発という困難な問題解決の糸口を明確にし、その有効性を示すことにより実用への道を拓いている。

第1章「Introduction (序論)」は緒言で、小型軽量でノイズに強い関節トルクセンサを開発し、それを全軸に搭載したロボットアームを設計し実装して、かつ各軸で衝突などの際にインピーダンスを低めて柔らかな対応可能なインピーダンス制御を実現して、構造化されていない環境での動的なインタラクションが可能なシステムを志向するという本研究の目的と立場と意義を明らかにしている。

第2章は、「Optical Torque Sensor Development (光学式トルクセンサの開発)」と題し、トルクセンサのための変位計測方式として、従来から用いられている歪ゲージ、ピエゾ素子、静電容量などを用いる電気方式やLVDTやホール素子などを用いる電磁方式に替えて、超小型のフォトインタラプタを用いた光学的な方式を提案している。トルクセンサに於いては変形が、ごく微小であることに着目すると、フォトインタラプタの特性のうちの線形部分を利用できる。構造の最適化のため、スポーク構造によるバネ、リング形状のバネ、及び準リング形状のバネを、有限要素法を用いて解析し比較している。その結果、スポーク構造によるバネでは、固有周波数も5.25kHzと他の方式の2.7kHz、1.37kHz に比べ高く、トーションステイフネスも、219.8Nm/radと他の方式の115.9Nm/rad、117.0 Nm/radより硬く、しかも他の方式が、10.0mmや7.5mmであるのに対し厚み6.5mmという薄型のトルクセンサを研究開発している。新型の光学式トルクセンサは従来の市販の6軸力センサと比べても、薄型かつ軽量であるのに加え電磁ノイズへの耐性があり、また製作しやすいという特長を持ち、さらに高い線形性・解像度を有している。さらに、フォトインタラプタの出力の高い線形性により、キャリブレーション手順が非常に簡略化されるとしている。なお、センサに用いるフォトインタラプタは超小型であるため、センサのバネ構造部分に容易に内蔵することが可能である。さら

に、人間型ロボットアームに組み込むために、選択したスポーク方式を持ちハーモニックドライブに直接組み込み可能なセンサを設計している。ヒステリシスを避けるため放電加工で製作し12.5Nm、10.5Nm、4.5Nmという必要なトルクを満たすセンサを実現している。特に、第3軸と第4軸に用いる4.5Nmのセンサでは、感度0.317V/Nm、分解能0.00395Nmで厚さ5mm、直径37mm、質量34.95gを実現している。

第3章は「Design of the New Whole-Sensitive Anthropomorphic Robot Arm (全軸のトルクを計測する人間型ロボットアームの設計)」と題し、第2章で得られた光学式トルクセンサを各軸に組み込んだ4軸の人間型ロボットアームを設計し試作している。腕は円筒構造とし、人間型ということから標準的な人間の腕のサイズである上腕長0.308m、直径0.08m、前腕長0.241m、直径0.06mとして、肩に、ピッチ、ロール、ヨーの3軸を配し、肘に1軸の合計4軸を持つ。

第4章は「Joint Impedance Control (関節インピーダンス制御)」と題し、ロボットアームの各軸にインピーダンス制御を行って柔らかな応答を実現している。インピーダンス制御としては、PD制御による位置制御をベースとしたインピーダンス制御法を用いている。ただし、このインピーダンスの設定をトルクセンサで計測した結果によって変化させる。その変化のための方式として、人間と環境の自然な引き合い押し合いの際に、人間の力と硬さの間に指数関数的な関係があることに着目し、ロボットと人間がインタラクションする際の硬さをトルクの指数関数として減少させる方式を提案している。その効果を高めるため閾値をもうけて閾値を越した分に対して大きな減少をもたらすように工夫している。例えば、肘の軸のインピーダンス制御の実効慣性を $0.1\text{kgm}^2$ に設定し、閾値を0.6Nmとして実験を行なったところ、人とインタラクションのない自由な運動では、実効バネ定数が10Nm/radで、実効ダンピングが $2.1\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$ という良好な運動特性を実現しつつ、人間とインタラクションしている際には、例えば1Nmのトルクを受けている場合には、実効バネ定数を6Nm/radまで自動的に調整しその移行も滑らかであるとしている。しかし、自由な空間運動からインタラクションに移る際に滑らかに移行できる場合だけではなく、不意の衝突が生じる場合もある。衝突に対しても対応するため、トルクの時間変化を計測し、それが閾値を越えると指数関数的な硬さの急激な減少を行い、かつ衝突後の振動を止めるため大きなダンピングを与える、人間の反射に似た応答アルゴリズムを提案し、実験でその有効性を確認している。

第5章「Conclusion(結論)」は結論で、本論文の結論をまとめ、今後を展望している。

以上これを要するに、本論文では、超小型フォトインタラプタを使用した光学的な方法を提案し、構造の最適化のために有限要素法を用いて解析し、その結果に基づいて実際に厚み5mmという薄型トルクセンサを研究開発している。薄型かつ軽量、電磁ノイズへの耐性があり、また製作しやすいという特長を持ち、さらに高い線形性・解像度を有している。開発した新型の光学式トルクセンサを組み込んだ人間型ロボットアームを新たに設計し、このロボットアームの各関節に内蔵された光学式トルクセンサの出力を用いてローカルインピーダンス制御を実現した。これにより、人間等によって外部から力が加わった場合でも、その環境とロボットの安全で柔らかいインタラクションを可能とするために、インテリジェント可変インピーダンス制御を提案し実装している。このように、ロボットの安全な動作を実現するための人間型ロボットアームの開発とその実環境への適用方法の有効性を示して実用への道を拓いたものであって、システム情報学特に計測工学及びロボット工学に貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。