

## 論文内容の要旨

博士論文題目

Revolutionizing Robot Tactile Perception by Vibration Injection  
(振動印加によるロボット触覚センシングの革新)

氏 名

米野 尚斗

(論文内容の要旨)

ロボットが人間に比肩する器用さを獲得するためには、触覚センサの存在は不可欠である。既存の触覚センサは人間のメカニズムを模倣し性能を向上させるアプローチを取っており、時間・空間分解能の向上に着目している。しかしながら、集積回路や運動制御の制約上、ロボットが人間と同じ枠組みで触覚を獲得することには大きな課題がある。特に、触覚の一つである振動覚は工学的に優れた特徴を持つ一方で、触覚探索行動や全体滑りといった物体との摺動運動が生み出す振動を通じてしか触覚情報を取り出せない。そこで本論文では、動的な摺動運動の軌跡ではなく、静的な接触面に影響された柔軟構造の周波数特性変化に着目する。触覚情報を内包した接触面の応力状態は、その弾性を通じて指先の柔軟構造全体の変形を伴うため、触覚情報は間接的に構造の周波数特性として表出することが期待される。本論文では、ロボットは人間と違い、摺動運動にかかわらずアクチュエータによって任意の振動を印加可能であることを利用することで、能動的に伝播させた振動から触覚情報を抽出する。この手法により、振動覚の利点を維持しながらも摺動運動を必要としない新しいロボット触覚のアプローチを提案する。

提案手法の適用事例として、1) 触覚探索行動を伴わない物体認識と、2) 初期滑り検知における把持安定化制御を挙げる。物体認識では、テクスチャや局所形状によって変形した柔軟構造を伝わる印加振動から触覚情報を取得する。これにより通常物体識別で必要とされる摺動運動による触覚探索行動（なぞり動作）を排することが可能となる。検証実験では紙やすりの番手とスリット幅の大きさに対する分類タスクを実施し、なぞり動作の同等以上の精度を発揮す

ることが確認された。初期滑り検知では、物体が把持中に脱落することで発生する摺動運動（全体滑り）に先んじて発生する初期滑りによる接触面の状態変化を、印加振動の伝播特性変化として捉える。圧力分布覚センサによる高次元情報ではなく、振動印加による一次元の時系列信号から初期滑りを捉えることで、より簡素な触覚センシングシステムが実現可能となる。検証実験では 5 種類の材質を持った対象物に対し初期滑りを発生させ、推定された初期滑り進行度に基づいて把持力フィードバック制御を実施し、圧力分布覚センサを上回る性能を発揮することが確認された。これらの適用事例は、提案手法が印加振動の伝播特性から触覚情報を適切に抽出し、ロボットタスクにおいて従来法と同等またはそれを上回る有効性を発揮することを示した。人間の触覚とは異なるメカニズムを有する振動印加手法は、新たなセンシングシステムとしてロボット触覚を再定義することが期待される。

(論文審査結果の要旨)

本論文では、一般的な接触対象物への動的な摺動運動による振動変化ではなく、静的な接触面がもたらす柔軟構造の周波数特性変化に着目した新しいロボット触覚システムを提案した。触覚情報を内包した接触面の応力状態は、その弾性を通じて指先の柔軟構造全体が変形するため、触覚情報は構造の周波数特性として間接的に表出すると考えられる。さらに、ロボットは摺動運動に依存せずアクチュエータを介して任意の振動を印加可能であるため、能動的に伝播させた振動から触覚情報を抽出できる可能性がある。この発想に基づいて、本論文では、振動印加に焦点を当て、振動覚の利点を維持しつつも摺動運動を必要としない新しいロボット触覚のアプローチを提案した。

提案手法の概念検証として、二つの適用事例を示した。一つ目は触覚探索行動を伴わない物体認識である。通常ロボット触覚はテクスチャや局所形状によって変形した柔軟構造を伝わる印加振動から触覚情報を取得する。これにより一般的に物体識別で必要とされる摺動運動による触覚探索行動（なぞり動作）を排除できる。二つ目の事例は初期滑り検知である。物体が把持中に脱落することで発生する摺動運動（全体滑り）に先んじて発生する初期滑りによる接触面の状態変化を、印加振動の伝播特性変化として捉え、振動印加による一次元の時系列信号から読み取ることで、簡素な触覚センシングシステムが実現可能となる。従来、生物およびロボットが対象物体への摺動運動の結果として得ていた触覚情報を、非生物規範の工学アプローチにより、振動モータを用いて能動的に印加することで、同等の触覚情報を収集するというアイデアは、新しいロボット触覚の可能性を開拓している。さらに、個別に実現された触覚システムや実験検証についても、その新規性や有用性の観点から高い学術的価値を有している。

公聴会では、モータコマンドと振動印加の関係性や、印加振動の強度・周波数が与える認識精度への影響、学習モデルのタスク依存性、印加振動の静止摩擦への影響に加えて、その他、提案アプローチの位置づけや限界、拡張性などに関して審査委員との質疑が行われた。その後、最終審査において、各質問への回答および論文への修正について説明が行われ、適切な対応がとられたことを審査員全員で確認した。

本論文は、振動を印加する新しいロボット触覚システムを提案し、2つのロボットタスクにおける検証実験の結果を示した。システム構築から評価実験までを実施していることに鑑み、新規性および有用性の観点から一定の学術的意義があるものと評価できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。