

論文内容の要旨

博士論文題目

人の把持運動における指先固着率に基づく触覚情報処理モデルの提案と検証

氏名

多田 充徳

(論文内容の要旨)

触覚は力覚, 圧覚, 痛覚, 温覚等が複合的に作用する感覚であり, その情報処理機構に関しては未だ解明されていない点が多い. そのため, 多くの潜在的アプリケーションが存在するにも関わらず, 現段階で商業的に実用化されているのは, 接触力/圧センサや, 力覚呈示デバイスのように, 触覚のプリミティブな機能を代行するものでしかない. これに対し, 高度な触覚応用を実現するためには, 人の高次機能に付随する触覚情報処理機構を詳細にモデル化する必要がある. 本研究は, 触覚を必要とする代表的な動作であり, かつ日常生活の基本的な動作でもある物体の把持運動に焦点を当てる. そして, 人が "把持" を遂行する上で, どのような触覚入力の本質的に重要であるのかをモデル化する.

はじめに, 弾性体接触理論に基づく議論を行い, 指先の接触をモデル化する. 接線方向力を加えられた弾性球の接触面には, 局所的な滑り (初期滑り) が周辺から生じる. そして, これが把持力制御と密接な関係を持つことが示唆されている. 本研究では, 接触領域に対する固着領域 (滑りが生じていない領域) の割合を固着率と定義する. これは, 弾性球の一般的な接触状態を表すスカラパラメータである. つまり, 等しい固着率を持つ弾性体は, 接触力と摩擦係数に関らず, 等しい滑り余裕を持つという特徴がある.

次に, 人の固着率知覚可能性を検証するため, その変化に伴う弾性体内歪みエネルギー密度とその速度場変化のシミュレーションを行う. その結果, 歪みエネルギー密度の空間微分が滑り領域を, 歪みエネルギー密度速度の空間微分が滑り領域の伝搬を特徴的に表すことが確認された.

そして, 指先固着率に基づく把持力制御仮説を提案する. 人の把持力は, 把持物体に関わらず同程度の安全率を持つことが示唆されているが, 本研究では把持力制御を行うための触覚入力として指先固着率に着目する. 固着率が一般化された滑り余裕を表すため, それが同程度の値に収束するように把持力を制御すれば, いかなる物体に対しても適切な把持力が実現できるからである.

最後に, この仮説を検証するため, 把持運動中の指先固着率計測実験を行う. 実験では, 被験者に質量と摩擦係数がランダムに変化する計測装置の持ち上げ運動を繰り返し行うように指示する. その結果, どの条件でも数回の試行で固着率が似たような値に落ち着くことが確認された.

以上の結果は, 固着率と等価な情報が触覚受容器で知覚可能であり, かつ実際の把持においても固着率が似たような値に収束することを示唆している. つまり, 提案する把持力制御仮説を強く支持する. また, ロボティクスや VR において, リアルな遠隔操作を実現するためにセンシング/呈示すべき触覚情報を特定する上で有効な指針となる.

(論文審査結果の要旨)

本論文では、把持運動に伴う人の触覚情報処理について述べている。近年、聴覚／視覚に次ぐ第三の情報伝達手段としての触覚が注目を集めているが、接触の有無のようなプリミティブな情報でなく、触感のように高度な触覚情報を伝達するためには本質的な接触情報の検出と呈示が不可欠となる。つまり、人の触覚情報処理を深く理解し、伝達の対象となる運動を遂行する上で不可欠な触覚情報をモデル化する必要がある。このようなモデルは機能モデルと呼ばれるが、本論文では触覚を必要とする代表的な動作であり、かつ日常生活の基本的な動作でもある物体の把持運動に焦点を当て、それに伴い行われる触覚情報処理の機能モデルを構築することを目標とした。具体的には、指先接触面に発生する初期滑りに着目し、(1) 弾性体接触理論に基づく指先接触モデルと人の把持力制御に関する知見を統合することで触覚情報処理モデルを提案し、(2) 実際に把持運動中の指先接触面を計測することでそのモデルの妥当性を検証している。本論文の成果は以下の3点に要約される。

1. 指先接触領域に対する固着領域（滑りが生じていない領域）の割合（本論文ではこれを固着率と定義する）は一般化された滑り余裕を表す。つまり、いかなる接触力／摩擦係数であったとしても固着率が等しければ滑り余裕も等しい。
2. 触覚受容器深さでの歪み分布は固着領域の空間／時間的広がりを特徴的に表す。これは、人の触覚受容器において固着率と等価な情報を符号化し得ることを強く示唆する。つまり、固着率が同一の値に落ち着くように把持力を制御すれば、いかなる物体に対しても適切な把持を実現することができる。本論文ではこのような把持力制御法を指先固着率に基づく把持力制御仮説と呼び、把持運動に伴う一般的な触覚情報処理モデルとして提案する。
3. 把持運動中の指先固着率は、把持物体の特性が変化しても数回の試行を経ればほぼ一定の値となる。この結果は、人の把持力制御において指先接触面における滑り-固着状態の割合が重要な触覚情報となることを強く示唆する。また、提案する把持力制御仮説を強く支持する。

以上に述べたように、本論文では指先接触面に発生する初期滑りに着目し人の把持運動を解析／計測することで、指先固着率に基づく人の把持力制御仮説を提案／検証している。本研究は人の触覚情報処理において、機能モデルの重要性と機能モデル構築のための具体的手法を示した先駆的な研究として評価できる。このアプローチは心理／生理学においてより深く人の触覚情報処理を探究するために有効である。また、本研究で得られた把持運動に伴う触覚情報処理の機能モデルは工学において触覚の検出／呈示を行う上で極めて重要な理論的指針を与える。つまり、本研究は学術、実用の両面での貢献を認めることができる。なお、本論文の主要部分に相当する内容は、学会論文誌1件、査読付国際会議3件として公表されている。

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。