

論文内容の要旨

博士論文題目

CPG-based Rhythmic Manipulation for a Multi-Fingered Hand from Human Observation

(人の操作計測に基づく多指ハンドによる CPG ベース型リズムック
マニピュレーション)

氏名 栗田 雄一

(論文内容の要旨)

本研究は、人のリズムックな操作計測に基づく CPG ベース型マニピュレーションの提案を行う。人は未知の物体を適切に把持することができ、さらに指を協調させて動作させることにより精緻かつ複雑な操作を行うことができる。人の手のような器用な操作を実現する上で実世界で自律的な適応を見せる人や生物の運動を規範とすることを考えたとき、脊髄に存在するリズム生成機構(Central Pattern Generator: CPG)が生物の周期的な運動に深く関わっていることが知られている。近年の研究から、人の手指による操作に関して習熟に伴いリズムックな動作が現れることが報告されており、CPG を用いたマニピュレーションの制御手法は、適応的なマニピュレーションを実現するための有効な手法となり得る。そこで本論文では、リズム生成機構である CPG による制御手法を多指ハンドによるマニピュレーションに適用することで適応的なマニピュレーションを実現することを目的とし、人の手指運動におけるリズムックな性質に関する考察と多指ハンドによる CPG ベース型マニピュレーションの提案と検証を行った。

はじめに、把持運動に先だって行われる把持力計画に着目し、把持運動中の把持/負荷力と指筋電の同時計測を行った。把持に必要な力を運動の事前に計算することで効率的な運動を行うことが可能である。物体重量を変化させた実験から、この力計画に関する考察を行った。つぎに、人の操作中におけるフィードフォワード制御に伴って現れるリズムックな運動に着目し、人が円筒物体を空中で回転させる操作における動作パターンを接触情報から考察した。接触状態から操作における指歩容といもいうべきリズムックな動作パターンを表現することにより、操作におけるリズムックな運

動を形式化することを明らかにした。

以上の結果を鑑み、典型接触パターンとして形式化された回転操作の各指の動作を CPG によって生成した。各指の動作開始指令を CPG により生成された動作パターンにより適切に発行することで、多指ハンドによる回転操作を行わせることができた。提案手法の有効性を確認するためにシミュレータを作成し、人と似た可動域をもつ多指ハンドモデルを用いて CPG ベース型制御による回転操作が可能であることを確認した。

また CPG によるリズムミクな出力は、パラメータによって周期や振幅、位相などが決定する一方で、適切な外部入力を引き込むことでその出力周期を適応的に変更させることができる。神経振動子モデルのフィードバック項に関節角情報を入力することにより、物体の操作による指の関節角の変化から持ち替え周期を適応的に変更する手法を提案した。さらに神経振動子の出力値を物体の目標速度に対応づけることにより、物体径が未知であるために運動の終点が計算できない条件においても目標速度が常に滑らかに変化するように与えることができる。以上の手法を用いて多指ハンドシステムを用いたマニピュレーションを行い、提案手法の有効性を確認した。

本研究によって得られた知見により、人の手指運動におけるリズムミクな性質が明らかになり、また CPG ベース型マニピュレーションの有効性が示されることで、物体に応じた適応的なマニピュレーションを実現するための一手法の確立につながる。この結果は、人の手指のような器用な操作を多指ハンドにより実現するというロボットハンド研究における大目的を達成する上で有効な指針になることが期待される。

(論文審査結果の要旨)

本論文は、リズム生成器 CPG(Central Pattern Generator)を利用することでロバストかつ環境への適応性が高い多指ハンドによるリズムミクなマニピュレーションを実現することを目的として、人のリズムミクな操作の計測から CPG が生成すべき操作のパターンを形式化し、形式化された人の操作パターンを再現する CPG によってマニピュレーションが可能であることを示し、さらに CPG のもつ引き込み特性を利用することで詳細な操作対象物モデルをシステムに与えずとも、対象物に応じた手指の動作を実現できることを多指ハンドシステムによる実験によって示している。本論文の主な成果は以下に要約される。

1. 人の手指を用いた運動について、外部信号に合わせたリズムミクな運動を行わせる条件とリズムミクな運動を強制しない条件において、運動中の手内筋の筋電計測の結果から、人の運動におけるリズムミクな性質の重要性について示している。
2. 物体を把持しながら空中で物体を回転させる動作において人が自然に獲得するリズムミクな運動について、各指に圧力センサをとりつけたゴム手袋を被験者が装着した状態で運動を行うことで各指と物体との接触状態を計測し、接触情報によって回転操作においてリズムミクな挙動が明確に表現できることを示している。またリズムミクな操作の一周期分の接触状態を典型接触パターンとして表現することで、リズムミクな運動を形式化することができることを示している。
3. 形式化された人のリズムミクな操作のパターンを CPG により再現できることを示し、各指に対応づけられた CPG により動作指令を各指に発行することで多指ハンドマニピュレーションを実現する手法の提案を行っている。また物体に対する外乱成分を CPG にフィードバックすることにより、外乱発生時に操作を一旦中断して全指を把持に使用することで把持の安定性を高める手法を提案している。以上の提案手法の妥当性を示すために動力学シミュレーションによる多指ハンドマニピュレーションを行い、人の操作パターンに基づく回転操作が可能であることを示している。
4. CPG の引き込み特性を利用して関節可動限界までの角度余裕を CPG にフィードバックすることにより動作指令の発行周期を適応的に変化させる手法を提案している。また提案した CPG ベース型制御を使って多指ハンド実機による持ち替えを含む回転や並進のマニピュレーションが可能であることを示し、物体サイズに応じて動作指令の発行周期を適応的に変化させることができることを示している。

本論文によって得られた知見により、人の手指運動におけるリズムミクな運動の重要性が明らかになり、また CPG ベース型制御による操作対象物や環境に応じた適応的なマニピュレーションの有効性が示されたことで、人の手指のような器用な操作を多指ロボットハンドにより実現するというロボットハンド研究における目的の達成に大きく貢献している。よって本論文は、博士(工学)の学位論文として価値があるものと認める。