

氏名	よしはら ゆうき
授与学位	吉原 佑器 博士（工学）
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）電気・通信工学専攻
学位論文題目	動き易さの規範による腕到達運動の自律的な制御
指導教員	東北大学教授 矢野 雅文
論文審査委員	主査 東北大学教授 矢野 雅文 東北大学教授 石黒 章夫 東北大学教授 吉澤 誠

## 論文内容要旨

生物は変化する環境の中で目的を達成することができる。このためには、1. 身体の運動学的・動力学的性質の変化，2. 初期姿勢の変化，3. ターゲットの移動に応じて適切な運動を実現する必要があるが，その制御スキームはいまだ明らかではない。適応的な運動のためには，身体の冗長性が重要であるという指摘がされてきた。平面内で 3 関節（肩，肘，手首）を用いて行われる腕到達運動は，冗長系の制御問題として最小の構造と捉えられる。そこで本論文では，平面内の腕到達運動を対象とし，これら 3 つの変化に対応できる制御スキームを構築することを目的とする。

腕到達運動では，目標手先位置が与えられる。この位置への到達を実現するためには，目標手先位置から手先変位，手先変位から関節変位を与える指令をそれぞれ計算する必要がある。これらの計算はそれぞれ逆問題となり解が一意に存在しない。よって制御スキームには，解を決定するための何らかの規範を拘束条件として導入する必要がある。これまで，運動全体における最適性を拘束条件とする制御スキームが提案されてきた。このスキームでは，環境や身体の状態を予め・個別のパラメータとして学習し，手先・関節の指令を事前決定することが必要であった。したがって，1-3 の要請をリアルタイムに満たすことは困難であった。このことから，予測不可能に変化する実環境において適切な運動を実現するためには，a. 運動の各瞬間における何らかの適切さを拘束条件とし，b. 環境や身体の状態をリアルタイムかつ統一的な指標によって評価し，c. 手先・関節の指令をリアルタイムに決定するという制御スキームが有効であるという仮説を立てることができる。

この仮説を検証するために，a-c の条件を満たす制御スキームを次のように構築した。まず，手先への

リアルタイムの指令として、目標手先速度ベクトルを仮定した。このベクトルは、手先によってリアルタイムに充足されることで、目標位置への到達が保証されるように設計した。リアルタイムにこのベクトルを充足するためには、環境や身体の状態を考慮して関節の指令を決定する必要がある。例えばある関節に着目したとき、その関節が駆動する腕構造が重い、関節の粘性が高い、疲労している、故障等の場合、ある関節に対する同じ指令が、常に充足できるとは限らない。そこで、身体が持つ関節の冗長性に着目した。関節の冗長性によって、部分的に動きにくい関節がある場合でも、少なくとも2つの関節を有効に機能させることで、目標手先速度ベクトルを常に充足させることが可能となるはずである。このことから、関節へのリアルタイムの指令を決定する拘束条件として、より動き易い関節に目標手先速度ベクトルを優先的に配分するルールを導入した。動き易さの評価のために、各関節に角度・角速度センサを仮定し、これらのセンサ量を目標手先速度ベクトルと比較する指標を導入し、これを動き易さの指標と定義した。動き易さに基づく優先化のために、協調と競合のプロセスを導入した。このプロセスでは、各関節は目標手先速度ベクトルを見ながら、このベクトルを満たすように独立して運動を行うことでセンサ情報を取得する(協調のプロセス)。センサ情報が得られれば、各関節間で動き易さを比較して競合させることで、より動き易い関節へ優先的に目標手先速度ベクトルを配分できる(競合のプロセス)。この制御スキームにおいては、目標手先速度ベクトルを動き易い関節に優先的に配分するルールを拘束条件とし、動き易さの指標が環境や身体の状態を評価しながら、手先や関節の指令がリアルタイムに決定されており、実環境での適応に必要となる a-c の条件を満たしている。以上の制御スキームを、 $m$  個の関節を持つシリアルに結合された腕モデルに対して定式化し、目標手先速度ベクトルから各関節の指令を決定する分散的な制御則を与えた。

この制御則の適応性を調査するために、平面内を動く3リンク-3関節の腕モデルに制御則を適用し、環境や身体の状態を変化させるシミュレーションを行った。

まず、ノーマルの条件として、3リンクの長さ・質量、3関節の粘性を全て同一とし、手先の初期位置を中心とする円上に等間隔に分布した16のターゲットへ向かう腕到達運動を調べた。実現された手先の軌道は、全方向で直線性を維持した。また、この手先軌道は、運動学的に動き易い関節が最も良く働く関節パターンによって実現されていた。この関節パターンは、運動中の姿勢変化に伴い各関節の運動学的な動き易さの大小関係がリアルタイムに変化する中でも、一貫して見られた。この結果は、運動中の動き易さの評価、および動き易さを優先化するプロセスが適切に機能していることを示していた。

次に、計算論的要請1を満たしているかを調べた。ここでは、初めに腕の運動学的性質の変化として、

第1リンクの長さを変化させた。この結果、動き易さの指標は腕の運動学的性質の変化を反映し、関節のパターンも運動学的に動き易い関節を優先したものにシフトした。手先の軌道は全方向でほぼ直線となった。動き易さの指標のパターンをノーマルの条件と同一とした場合では、手先の軌道の直線性は低下し、到達時間の増加が見られた。これらの結果は、リンク構造の変化に適応する上で、運動学的動き易さを優先させるように関節パターンをシフトさせる戦略が有効であることを示していた。続いて、腕の動力学的変化として、肩関節を疲労させた。この結果、動き易さの指標は、肩の動力学的性質の変化を反映し、関節のパターンはより動き易い肘と手首を優勢に用いたものにシフトした。運動中に、突発的に手首を故障させた条件では、関節のパターンは、肩と肘を優勢に用いたものにリアルタイムにシフトした。これらの結果は、身体の動力学的変化に適応する上で、動力学的動き易さを優先させるように、関節パターンをシフトする戦略が有効であることを示していた。このように本制御則では、動き易さの指標が、環境、身体の運動学的・動力学的性質を統合的に評価し、関節の指令がこの評価に基づいてリアルタイムに変化しうるため、これらの予測不可能な変化に対応できることが示された。

さらに、計算論的要請2を満たしているかを、初期姿勢を様々に変化させることで調査した。初期姿勢としては、手先が肩に近い/中程度/遠い条件の3通り、および同じ手先位置に対して、最も手先を動かしやすい腕姿勢/動かしにくい姿勢の2通りの、計6種類の姿勢を選んだ。どの姿勢からでも手先は目標に到達した。一方、動かしにくい初期姿勢、および作業領域境界近傍において、手先軌道が湾曲する傾向が見られた。この傾向をより詳しく調査するために、完全に伸展した姿勢を初期姿勢とした。これは目標手先速度を厳密に充足しうる関節への指令が存在しない特異姿勢として知られている。シミュレーションの結果、手先はこの条件においても目標位置まで到達した。運動開始時には、目標手先速度ベクトル方向と一致しない運動が見られ、運動の後半で一致した運動へのシフトが見られた。これは、開始時は協調のフェーズによって先ず動くことを優先しているために生じていた。この傾向は、動かしにくい初期姿勢、および作業領域境界近傍においても優勢になっていたと考えられる。協調のフェーズは、手先の軌道を湾曲させるが、このフェーズによって完全伸展姿勢からの運動が可能となっていた。これらの結果から、本制御則が初期姿勢の変化に対して有効に機能することが示された。

計算論的要請3が満たされているかを、運動中にターゲットをシフトさせることで調査した。ターゲットシフトによって目標手先速度ベクトルが新たなターゲットに向かうように更新され、関節パターンも新たなターゲットへ向かう上で運動学的に動き易い関節が優勢になるように変化した。結果的に、手先は新たなターゲットへ滑らかに収束した。この結果から、制御則がターゲットの予測不可能な変化に有効に機

能することが確かめられた。

制御則の汎用性を、多関節の腕に適用することで調査した。ここでは、平面内を動く5リンク-5関節の腕モデルに適用した。目標手先速度ベクトルを一定中心、一定半径を持つ回転速度場で与えたところ、手先は円運動を維持した。この結果は、制御則が冗長性の高い系に拡張可能であることを示していた。さらに、運動中に2関節を固着させる変化を起こしたところ、円運動は残りの関節によって維持された。これは身体構造のもつ冗長性によって高い適応性が得られることを示していた。

最後に、運動全体の滑らかさを調査するために、トルク変化率の時間総和を最小化するモデルとの比較を行った。ここでは、3リンク-3関節の腕モデルを用い、16方向の腕到達運動を調査した。得られた手先軌道およびトルクパターンは、2つのモデルで定性的に一致した。一方、トルク変化率のパターンは、提案する制御則では、運動中局所的に大きくなり、この結果、トルク変化率の時間総和も増加した。この増加分は、リアルタイムに環境変化に適応するために必要となるコストと捉えられる。トルク空間の滑らかさを陽に取り扱うことで、このコストを減少させることは今後の課題である。

以上の結果から、予測不可能に変化する実環境において適切な運動を実現するためには、a-cの必要条件を満たす制御スキームが有効であることが分かった。これまでの制御則にとって、計算論的要請1-3を同時に満たすことは難しい問題とされてきた。提案する制御則で、この要請を満たすことができた理由を明らかにするために、各関節に対して分散的に表現した制御則を、ヤコビアンを用いた行列表現に変換し、全体としての機能を解析した。この結果、制御則は、弾性制御・直線性制御の2つのモードを持つことが分かった。ここで弾性制御は、手先を目標位置に対してバネ的力によって近づける制御モードであり、手先の運動方向を目標手先速度ベクトルに近づける作用は持たない。一方、直線性制御は、目標手先速度ベクトルの方向に関する解析的解である。さらに、動き易い関節は弾性制御によって駆動され、動きにくい関節は手先の方向が目標手先速度ベクトルと一致するように、方向を調整する直線性制御によって駆動されることが分かった。これは、制御則が、2つの制御モードを関節毎の動き易さに応じて柔軟に切り替える自律性を持つことを意味していた。この自律性によって、システムは環境や身体の運動学的・動力学的性質、初期姿勢、ターゲットそれぞれの予測不可能な変化に対し、身体や環境の明示的なパラメータを同定・学習することなしに適応することが可能となった。

# 論文審査結果の要旨

ロボティクスの最も重要な課題の一つは複雑に変化する実環境において任意の運動をリアルタイムで可能にする方法の確立である。ロボットの重要な機能は与えられた運動目的を達成することである。運動目的を設定し、それを達成することは逆問題であり、逆問題は一般的には不良設定問題となる。既存の制御スキームでは、運動全体にわたる厳密な最適性を拘束条件としてシステムの外部から与えることで解く方法であるが、これが有効であるためには内部モデルや環境が厳密に記述できることが前提となっている。しかし、予測不可能に変化する実環境下での制御では、必要な拘束条件をシステムの外からリアルタイムで与えることは原理的に不可能である。実環境で自在に運動制御を行う場合は、システム自身が環境変化に応じて自律的に適切な拘束条件をリアルタイムに生成し、それを自律的に充足することが必要となる。著者は腕到達運動を取りあげ、拘束条件の自律生成則として「動き易さの規範」を導入することで、無限定環境下でも適応的に運動制御が可能になるモデルを提案し、シミュレーションを行うことでその有効性を検証している。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は序論であり、運動全体にわたる最適性を用いて運動パターンを決定する既存の最適制御理論や平衡位置制御理論の限界を指摘している。

第2章では、実環境における制御スキームの必要条件を挙げ、動き易さの規範を導入することで従来法に代わって拘束条件を自律的に生成し、自律的に充足する新しい制御方法を提案している。これは運動の各時刻において、目標手先速度を生成し、その目標を達成するために各関節に運動学的動き易さと動力的動き易さを統合する評価指標を導入し、関節間の協調と競合により動き易さ優先のルールを実装している。これは興味のある提案である。

第3章では、提案モデルの有効性をシミュレーションによって検証している。提案モデルは、1) 環境や身体の運動学的・動力的変化に対応できること、2) あらゆる初期状態からの運動が可能であること、3) 運動目標の予測不可能な変化に即応できることを検証しており、実環境における運動制御として注目に値する方法である。

第4章では、提案モデルの制御スキームとしての機能解析を行っている。本モデルは運動開始時や故障が生じたときには弾性制御に一致し、関節間に相互作用がない場合には直線性制御に一致することを示し、通常運動時はこの二つの制御モードが調和して機能することを明らかにしている。これは動き易さの規範に基づいて制御モードを自律的に変更することで、環境変化に対して高い適応性が発現することを示しており、重要な結果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、予測不可能な状況変化に柔軟に適応する腕到達運動の新しい制御方法を考案し、その有効性を検証したもので、ロボット工学、システム制御工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。