

報告番号	甲 第 12887 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Neuro-synergy Model Imitating Biological Control Principle and Its Application for Neuro-rehabilitation**
(生物の制御原理を模倣したニューロシナジーモデルの提案およびニューロリハビリテーションへの応用)

氏 名 岡島 正太郎

論 文 内 容 の 要 旨

本博士論文は、人を支援可能なパートナーロボットの実現に必要な要素技術であるロボットの動作生成手法および人の動作支援手法を、生物の情報処理構造に基づき提案するものである。

ロボットという言葉が世に表れて約 100 年が経過し、工業用ロボットが工場で使用されて約 50 年が経過した。1973 年には、早稲田大学が世界で初めてフルスケールのヒューマノイドロボット WABOT-1 を開発した。しかし未だ、人の生活を豊かにするパートナーロボットは実現していない。

ここではパートナーロボットを、人と目的を共有し、その目標を達成するために人と協力するモノと定義する。現在のロボットでは、人と目的を共有し、その目標を達成するために人と協力することは困難である。そこで、人の例を基に、そのような行動生成を実現するために必要な能力を検討する。

例えば、人が協働で重量物を運搬する際、互いが互いの動きを妨害することなく協働作業を行うことが可能である。この時我々は、“重い物を持つ”という抽象的な行動目標を共有し、動作生成が可能であり、ロボットのように運動の方向や関節軌道を指定する必要はない。支援面においては、人が持ちやすいように物体の位置を調節するなど、人の運動を妨害しないような支援が可能である。これらの観点から、(1)動作生成と(2)動作支援の能力が、ロボットに必要であると言える。

人の行動生成においては、生物の制御原理、すなわち生物の情報処理構造が基盤となっている。特に、複雑に変化する環境下での行動生成において重要な役割を担っており、環境および人との相互作用の中で動作を生成し、支援を行う場合も例外ではない。そのため、本博士論文では、生物の情報処理構造に基づき、ロボットの動作生成手法および人の動作支援手法の開発を目指す。

我々は、Neuro-synergy model と呼ばれる階層型制御構造を生物の情報処理構造モデルとして提案している。Neuro-synergy model では、トップダウンプロセスとボトムアッププロセスの組み合わせによって運動制御が行われる。トップダウンプロセスでは、低次元の抽象的行動目標が、階層が下がるにつれて徐々に高次元の詳細な制御信号に分割される。ボトムアッププロセスでは、各階層の制御信号がフィードバックループ（以降、FLと表記する）を形成し、各制御ループが身体を環境に適応させるように制御信号を調整する。

本博士論文では、Neuro-synergy model に基づくロボットの動作生成手法および人の動作支援手法を提案する。動作生成手法においては、低次元な抽象的行動目標から高次元の詳細な制御信号を自動生成する手法の開発を試みる。次に、動作支援手法においては、ロボットによる身体的支援によって人の動作を促進する手法の開発を試みる。特に、人の動作支援においては、脳卒中患者を対象に研究を進める。

第2章では、生物の情報処理構造モデルの1つである Bow tie structure の説明を行い、Bow tie structure の枠組みを拡張した Neuro-synergy model を提案する。Bow tie structure は蝶ネクタイ型の情報処理構造であり、高次元の入出力部と低次元の中間部を持つ。Bow tie structure では高次元の感覚入力徐徐に統合され、抽象的な情報に変換される。そして、抽象的な情報の一部が調節され、“歩く”などの低次元な抽象的行動目標が生成される。その後、抽象的な行動目標は徐々に分割され、筋への高次元の制御入力となる。しかし、Bow tie structure では信号が必ず中間部を経由する必要があるため、人が本来持っている抽象的な行動目標を必要としない反射的な運動を表現できない。そこで、Bow tie structure の枠組みを拡張した Neuro-synergy model を提案する。

Neuro-synergy model は、Bow tie structure の高次元の入出力部を合わせたような階層型構造をしている。入力信号は、階層が上がるにつれて徐々に統合され、Bow tie structure と同様に低次元の抽象的行動目標が生成される。そして、低次元の抽象的行動目標は階層が下がるにつれて徐々に高次元な制御入力へと分割される。各階層は入出力信号間でFLを形成し、各ループは動作を環境へ適応させるように信号の調節を行う。最も下位のFLは、伸張反射などの単純な反射動作を出力するループとして機能している。

第3章では、Neuro-synergy model を模した制御構造を設計し、2自由度の倒立振り子ロボットのバランス制御およびヒューマノイドロボットの歩行制御に適用し、動作生成を行う。制御構造の設計の際、信号の統合・分割部にはロボットの身体的特徴を反映した機械

的振動モードを用いる。機械的振動モードとは、ロボットのダイナミクスから得られるロボットの関節角の空間的パターンのことである。得られた空間的パターンから変換行列を製作し、変換行列を用いることで関節空間とモード空間を変換可能となる。モード空間内の信号調節は、変換行列によってすべての関節角へと反映される。そのため、本研究ではモード空間内の少数のパラメータ調節が、低次元の抽象的行動目標による高次元の制御信号の生成に相当する。FLは、生物規範型学習則の1つである Tacit learning を用いて設計を行う。Tacit learning は、教師信号無しで環境との相互作用の中でロボットの動作を環境へと適用させることができる。

設計した制御構造を2自由度の倒立振子ロボットの外乱に対するバランス制御に適用した。シミュレーションおよび実験において振子は、各関節を個別のFLで調節するだけでは大きな外乱に耐えることができなかつた。しかし、各関節だけでなく、モード空間内の1つのパラメータをFLによって調節することで、より大きな外乱にも耐えることが可能であった。

次に、ヒューマノイドロボットの歩行制御に設計した制御構造を適用した。シミュレーションおよび実験において、各関節にFLを適用することで、ロボットは歩行中のバランスを獲得した。さらに、モード空間内の2つのパラメータを手動で調節することで、各関節動作を気にすることなく前進/後退および左右旋回が可能であった。これらの結果から、ロボットの身体的特徴を反映した変換行列によって変換された空間内の少数のパラメータ調節とFLによる調節、言わばトップダウンプロセスとボトムアッププロセスが同時に実行されることが、動作生成に重要であることが示された。

第4章および第5章では、Neuro-synergy modelの枠組み、すなわちトップダウンプロセスおよびボトムアッププロセスによる制御の枠組みを脳卒中患者へ適用し、動作を促進可能な支援手法の開発を目指す。脳卒中患者は、脳の運動野が損傷しており、意図的に筋を活動させることができない。脳卒中患者が再び運動能力を取り戻すには、リハビリテーションによって損傷した運動野の周辺、感覚野および前頭前野間の接続を強化する必要がある。強化のためには、上記の3つの領域が同時に発火する必要があるとされている。しかし、脳卒中患者は意図的な動作生成ができないため、筋活動に伴う感覚野の発火は望めない。一方で、Neuro-synergy modelの観点から見れば、FLは損傷しておらず、身体的支援によってFLに介入することで運動の促進が期待できる。

第4章では、身体的支援によってFLに介入することで、握り反射を誘発可能な把持トレーニングロボットの開発を行った。この時、把持動作を手指の屈曲、手首の背屈、母指の対立から成る複合的な動作と考え、1つのアクチュエータで3つの動作を同時に達成するロボットを設計した。それに加え、ロボットを用いた把持動作トレーニング時に、弾性体を用いて手のひらを刺激することでFLに介入し、握り反射を誘発可能な構造にした。1名の脳卒中患者にロボットを使用したトレーニングを行ってもらった際、弾性体を用いてFLに

介入することで把持動作を司る筋が活動することを確認した。

第 5 章では、第 4 章の枠組みを拡張し、人の運動を阻害せずに支援可能なロボット制御手法を理論的に設計した。この際、人とロボットをモデル化することで制御器を設計し、安定性を数学的に証明した。また、下肢外骨格ロボットを用いた歩行実験において設計した制御器をロボットに適用した。この時、ロボットは被験者の動作に応じて徐々に支援力を増加し、人の運動を阻害せずに支援ができることを示した。これらの結果から、適切な方法で FL に介入することで、脳卒中患者の運動を促進可能であることが示された。さらに、この手法を患者の意図と組み合わせることで、より効果的なリハビリテーションが達成されることが期待される。

第 6 章では、本博士論文全体のまとめを行う。本博士論文では、Neuro-synergy model に基づくロボットの動作生成手法と人の動作支援手法の開発を行った。結果として、ロボットを対象にした研究および脳卒中患者を対象にした研究の両方において、FL に介入を行うことによって単純な機能的動作が達成されることが確認された。また、複数の単純な機能的動作をトップダウンプロセスと統合することによって、より複雑な機能的動作が達成されることが期待される。さらに、ロボットと人がそれぞれ上位の信号を共有し、環境だけでなく互いの動作に応じて適切な運動を生成することが出来れば、ロボットは相互作用の中でより良い支援が出来ると期待される。