

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 水野朱音

論文題目：Flexible control mechanisms of human bipedal locomotion

(ヒトの二足歩行の柔軟な制御機構)

身体運動の特徴は、環境や身体自身等の運動を取り巻く状況の不確定な変化に対して、即時的に柔軟に適応することである。例えばヒトの最も基本的な身体運動である歩行では、疲労、突然の障害といった身体変化や、地面の変動、物体との衝突といった環境変化（いわゆる外乱）に対して、歩行パターンが直ちに变化して運動が継続される。このような身体運動の即時的適応性、即ち「制御の柔軟性」の機構を解明することは、身体運動科学において重要な貢献をなすと考えられる。

本論文は、このような観点から、歩行運動をケースとして「柔軟な制御 flexible control」機構を理論的に理解することを目的として行った申請者の研究を、第 1 章に flexible control の定義及び姿勢制御に関する先行研究のレビューおよび研究目的、第 2 章から 5 章に申請者が行った研究の成果、第 6 章に総括論議を加えてまとめたものである。

第 2 章では、バイオメカニクスの観点と神経生理学的観点から適応歩行を考察し、「歩行運動の柔軟な制御は、小脳のプルキンエ細胞を中心とする神経回路が、力学的に不安定な立脚相初期（BSP = the beginning of the stance phase）における膝関節の伸展調整を行うことによって実現される」という仮説を構築し、その仮説に基づいて 2 足歩行モデルを構築した。外乱への即時的適応が可能な 2 足歩行モデルとしては central pattern generator(CPG)と body dynamics との相互作用によってアトラクターとしての歩行パターンを生成する two coupled dynamics model が提出されている（多賀ら 1991）。しかしこのモデルは、単一のアトラクターしか生成できないために、そのアトラクターの安定限界を超えた外乱には適応できない。本研究のモデルは、この two coupled dynamics に姿勢制御系を付加することによって、アトラクターの柔軟な変更を可能にしたもので、適切な姿勢調節信号を CPG に与えておくことによって、外乱に応じた平衡角を自動的に生成して BSP 時の膝関節に与え、膝の伸展程度を調整して、アトラクターを望ましいパターンに自己生成的に誘導することができるのが特徴である。

第 3 章から 5 章では、このモデルに様々な外乱を与えるシミュレーション（数値実験）を行い、モデルの妥当性を検証した。すなわち、1）一側および両側の足関節トルクが突然ゼロに低下した場合（第 3 章：足首が怪我をして地面が蹴れなくなった場合を想定）、2）股

関節部（重心近傍）を突然後方・前方から押された場合（第4章：突然何かに衝突した場合を想定）、3）足関節部に突然前方から外力が加わる場合（第4章：足が何かにぶつかって躓く場合を想定）、及び、4）地面の傾斜が突然負荷される場合及びそれに両足関節トルクレベルがゼロになるという極端に歩行困難な場合（第5章）を取り上げて、従来モデルと本研究のモデルの性能を比較した。その結果、いずれの場合においても、姿勢制御系がない従来モデルに比べて、姿勢制御系を付加した本研究のモデルでは、外乱に対する適応限界が大幅に向上することが明らかとなった。

このように、本研究で提出されたモデルは、突然の身体変化、種々の環境変化、および身体変化と環境変化の同時負荷に対して、外乱負荷のタイミングに関わらず柔軟な適応性を示した。このような柔軟性は、BSP時の姿勢が、歩行パターンの柔軟な変化を誘導するという、単一のストラテジーだけでもたらされた。即ち、歩行周期の特定位相（BSP）における、身体の一部のフォーム（膝関節角度や股関節角度）調整のみで、種々の外乱に対する歩行の柔軟な適応性がもたらされることが証明された。

これらの結果から、第6章（総括論議）において申請者は、本研究の意義を次のようにまとめている。

1）歩行の柔軟な適応性をもたらす姿勢調節が、BSP近傍でのみ有効であったことから、BSP近傍の姿勢は、歩行システムの収束状態を規定すると考えられ、理論的には西浦ら(2003)の指摘したダイナミカルシステムに潜在する「中立状態」近傍の状態に相当すると考えられる（理論的意義）。

2）本研究で構築したモデルは、生理学的に妥当な構造から、妥当な機能を導出したので、今後様々な身体運動の研究に発展利用できると思われる（モデル論的意義）。

3）本研究で提示した適応的ストラテジーの特徴は、システムの将来の状態を決定する拘束条件を、システム自身が、その場に応じて作り出す点である。本研究は、生命システムの「拘束条件の自己生成の仕組み」の一端を解明した点で評価できると思われる（生命科学的意義）。

4）スポーツの分野では、指導者は「コツ」「ポイント」「フォーム」や「型」といった概念を運動学習の効率向上のために用いてきた。これらの概念は、本研究で指摘した身体固有のダイナミクスを利用した適応制御の概念に構造上共通する。従ってこのような制御を研究することは、身体運動科学の今後の重要な課題である（トレーニング科学的意義）。

これらの研究成果は、従来のものとは違う申請者独自のモデルを導入することにより、特定の時点における特定の関節角度すなわち姿勢だけを制御すれば、あとは自動的に状況に応じた動作が遂行されるという、スポーツなどの身体運動における効率的運動制御のメカニズムの存在を理論面から明らかにしたものであり、学術業績として極めて有意義であると認められる。よって、本審査委員会は、本論文は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。