

Title	Studies on Emergence and Breakdown of Human Motor Coordination based on Nonlinear Dynamical System Theory
Author(s)	浅井, 義之
Citation	大阪大学, 2003, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/44350
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	あさ い よし ゆき 浅 井 義 之
博士の専攻分野の名称	博 士 (工 学)
学位記番号	第 1 7 9 1 5 号
学位授与年月日	平成 15 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 基礎工学研究科システム人間系専攻
学位論文名	Studies on Emergence and Breakdown of Human Motor Coordination based on Nonlinear Dynamical System Theory (非線形力学系理論に基づくヒトの協調運動生成とその崩壊に関する研究)
論文審査委員	(主査) 教授 佐藤 俊輔 (副査) 教授 若林 克三 教授 杉本 信正 教授 潮 俊光 助教授 野村 泰伸

論 文 内 容 の 要 旨

周期的な運動中の筋活動を支配する運動神経の交番的な発火活動の生成には中枢パターン生成器 (CPG) と呼ばれる神経回路が関わっていると考えられている。CPG 神経網の詳細な構造は未解明だが、脊髄 CPG が電氣的または化学的な刺激の強度に応じて複数の協調的な振動パターンを生成できることが示されている。このような交番的な発火活動の生成機構を説明するために、相互抑制性に複数の half-center が対称的に結合した half-center モデルが用いられている。half-center モデルは CPG 神経網を直感的に簡略化したもので、1つの half-center は神経細胞の集団から成る。本論文で提起する主要な 2つの問題は、この古典的でかつ現代でも CPG 研究の主要な位置を占める half-center モデルのダイナミクスに関係する。第 1 の問いは、構造的に予想されるように half-center モデルはいつでも交番的な活動を生成するのか、ということである。ここでは 2つの BVP 方程式が相互結合する half-center モデルが中心的な役割を果たす。half-center モデルを具体的に非線形微分方程式で書き下したとき、モデルにおける振動パターンは“分岐”を経て発生する。分岐とは、あるパラメータの変化によって系が突然質的に異なるダイナミクスを示す現象である。我々はモデルの分岐構造を明らかにすることで、第 1 の問いにアプローチする。第 2 の問いは、CPG を含むヒトの運動制御系が分岐を示す力学系として捉えられるか、ということである。ここで我々はパーキンソン病患者の運動中に見られる肢間協調性の乱れに注目する。先ほどのモデルが生成するダイナミクスを臨床計測データと比較する。モデルが含む上位中枢からの制御信号の強度をあらゆるパラメータを調節することでモデルが臨床データを非常によく再現できることを示す。これは乱れを伴う肢間協調が分岐により現れることを示唆する。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

歩行は周期的な運動であるが、下肢の筋がそれを支配する運動神経の交番的な発火活動によって刺激を受けて生成される。一方、運動神経の交番的な発火活動は脊髄にある神経回路の一種である中枢パターン生成器 (CPG) が生成

するといわれている。生理学的研究によれば脊髄 CPG は電氣的または化学的 な刺激の強度に応じて様々な協調的な振動パターンを生成するが、CPG 回路の詳細な構造は解明されていない。運動神経の交番的な発火活動を説明するために、左右一対の神経回路（それぞれ half-center と呼ぶ）が対称的に相互抑制結合した CPG モデルが提案された。この CPG モデルは構造から交番的な活動を生成すると予想されるが、モデルの構造とそれが生成する振動パターン 間の関係は単純ではなく、half-center モデルのダイナミクスに深く関わっている。

本論文は、この関係を数理的に解析することで CPG を中心とした生体運動パターンの生成機構に迫るもので、4 章からなる。第 1 章は準備の章である。half-center を Bonhoeffer-van der Pol 方程式でモデル化し、それらを相互抑制的に結合する。さらに各 half-center は高次運動中枢からの下行信号によって制御され、それぞれの出力が、下肢の運動神経の発火させ歩行運動が生成されると考える。この CPG モデルは 4 変数の非線形力学系として表される。half-center を表す方程式における対称性のやぶれや、信号強度の変化に伴って生じる CPG 力学系の解の分岐が、下肢の運動パターンの多様性につながると考える。

第 2 章では、完全に左右対称な状況でパラメータ（結合強度、信号強度など）の変化による CPG 力学系モデルの解の分岐を調べた。力学系の正規形を求めることで、この CPG モデルが示す解の挙動は、half-center を表すオシレーター の力学系にかかわらず、決まってしまうに分類されることを示した。CPG モデルの振る舞いは大別すれば協調的な振動パターンの生成と、その崩壊である。CPG モデルの左右対称性を保ったままで力学パラメータの値を調節し、また各 half-center に入力する下行信号の強度を変えることで、モデルは同相振動、逆相振動を生成する。これを協調的な振動パターンと呼ぶ。また、CPG モデルが完全に左右対称であっても協調性が崩壊することを示した。これは、CPG が内包する特徴的な性質で、対称なモデルが対称性のやぶれを創発しうることを示す。

第 3 章では、協調性の崩壊をパーキンソン病患者の（左右独立に動く）ペダルこぎ運動にみられる肢間協調性の乱れ現象に結びつける。CPG モデルにおいて、協調性の崩壊は 2 つの half-center への下行信号の強度差によっても生じる。医学臨床データに見られる患者の非協調的および脱協調的ペダルこぎ運動パターンを、CPG モデルの振動パターンがよく再現すること、とくに CPG モデルに入力する 2 つの下行信号の強度とその強度差が協調的振動パターンとその崩壊過程に重要な役割を果たすことを示した。これは、ヒトのくりかえし運動における非協調的および脱協調的な運動パターンの成因となりうることを示唆している。

第 4 章は結論と将来の展開についてあてた。

以上のように、本論文はヒトの運動パターンの生成・制御を司る神経系の振る舞いが、非線形力学系の分岐現象の立場から理解できることを示唆したもので、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。