



Title	ヒト手先によるスティックバランスの間欠制御モデルと運動揺らぎの非ガウス性に関する研究
Author(s)	吉川, 直也
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/55901
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。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。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (吉 川 直 也)

論文題名

ヒト手先によるスティックバランスの間欠制御モデルと運動揺らぎの非ガウス性に関する研究

論文内容の要旨

ヒト手先スティックバランス課題は、ヒト手先や指先の上にスティックを倒立振り子様に載せ、手先を動かすことでスティックが倒れないように安定化する制御課題である。この課題の熟練者では、スティックの姿勢を修正する動作の発生時間間隔の揺らぎがべき乗則に従う間欠性を示すこと、およびスティックの運動加速度が非ガウス性分布を示すことが知られている。本研究は、フィードバック時間遅れや知覚の不確実性といった不安定化要因が存在するにも関わらず、スティックの直立姿勢を安定化しつつ間欠性と非ガウス性を伴う運動揺らぎを生成する中枢神経系の運動制御機構を明らかにすることを目的とした。制御機構の候補の一つはヒト静止立位姿勢制御機構として提案されている間欠フィードバック制御仮説である。これは神経フィードバック制御が作用していないときの直立姿勢がサドル型不安定平衡点であり、その安定多様体近傍に位置する状態点は一過性に直立姿勢に接近する性質を巧みに利用する制御戦略である。本研究は、指先スティックバランスを単純化したヒト手先による台車型倒立振り子 (cart-inverted pendulum; CIP) の安定化制御課題を対象とし、熟練者が獲得した制御戦略を探った。まず CIP 制御課題時のスティックと手先の運動計測を行い、非ガウス性指標を含む 5 つの指標を用いて計測された運動揺らぎの間欠性と非ガウス性を定量化に特徴付けた。次に、持続的制御器および間欠制御器を用いた CIP 制御モデルを構築し、その安定性解析およびノイズ存在下における動態シミュレーションを行った。制御モデルの動態を計測実験の場合と同様に特徴付け、計測された系の動態を最もよく再現する制御器および制御パラメータの同定を行った。その結果、熟練者の振舞いは間欠制御モデルによって良く再現されることを示した。間欠制御モデルの動態解析に基づき、熟練者が獲得したスキルは台車に加える力をスティックの状態に依存して適切にオン・オフするタイミングであることを明らかにした。以上の結果は、ヒト神経系は間欠制御戦略を用いて振り子の直立姿勢の安定化を実現している可能性を示唆する。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (吉 川 直 也)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教 授 野 村 泰 伸
	副 査	教 授 大 城 理
	副 査	教 授 田 中 正 夫

論文審査の結果の要旨

スティックバランスは、ヒト手先や指先上に倒立振り様に剛体スティックを載せ、手先を動かすことでスティックが倒れないように安定化する課題であり、ヒト中枢神経系が不安定な制御対象を安定化するための運動制御戦略の探索に用いられる。この課題の熟練者の手先動作は間欠的で、その発生時間間隔の揺らぎはベキ乗則に従う。また、手先の加速度は非ガウス性の分布を示す。こうした運動揺らぎの特性は運動機能・運動スキルを反映した指標である可能性がある。さらに、ヒト静止立位時の姿勢動揺も類似の指標で特徴付けられることが知られている。したがって、スティックバランスで現れる運動揺らぎの発生と背後にある姿勢安定化の神経制御メカニズムを解明することは、神経科学的な興味のみならず、脳神経疾患に伴う運動障害の発現メカニズムの理解と臨床医学における障害診断と治療の定量化にとっても極めて重要である。本論文は、フィードバック時間遅れや知覚の不確実性といった不安定化要因が存在するにも関わらず、スティックの直立姿勢を安定化しつつ間欠性と非ガウス性を伴う運動揺らぎを生成する中枢神経系の運動制御機構を明らかにすることを目的としたものである。特に、制御機構の候補としてヒト静止立位姿勢制御機構として提案されている間欠フィードバック制御仮説を考察している。この仮説は神経フィードバック制御が作用していないときの直立姿勢がサドル型不安定平衡点であり、その安定多様体近傍に位置する状態点は一過性に直立姿勢に接近する性質を巧みに利用する制御戦略である。本論文は、課題中のスティックと手先の運動計測と、得られた時系列データの数理解析、持続的制御器および間欠制御器を用いた本制御課題の数理解析とその安定性解析、および計測データを最もよく再現する制御器および制御パラメータの同定を行っている。その結果、運動揺らぎの非ガウス性を含む熟練者の振舞いは、間欠制御モデルによって最も良く再現され、熟練者が獲得したスキル・制御戦略は、スティック下端に加える力をスティックの状態に依存して適切にオン・オフするタイミングであることを明らかにした。この結果は、ヒト神経系が不安定な制御対象を安定化するために間欠制御戦略を用いている可能性を示唆するものであり、将来的には運動障害に関わる臨床医学の深化にも貢献することが期待され、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。