

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560298

研究課題名(和文) 不安定系の操作熟達を支援するパラメトリックノイズを応用したインターフェースの開発

研究課題名(英文) Man-Machine Interface for Supporting Acquisition of Dexterity in Unstable System Operation

研究代表者

畠山 省四朗 (Hatakeyama, Shoshiro)

東京電機大学・未来科学部・教授

研究者番号：40138954

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、不安定系操作時に自らの身体の一部を振動させる動作(身体自励運動と呼ぶ)を行うことによって、操作技術が向上する仕組みを明らかにし、その仕組みを操作技術熟達支援インタフェースに組み込むことを目的とする。本研究は3つの段階を踏んで遂行する。まず、身体自励運動が操作に与える影響を明確とすることを旨とし、(1)生体情報からの操作意図推定法の検討、(2)不安定系操作と身体運動の関係をモデル化する手法の検討を行う。その後、(3)身体自励運動の積極的活用による操作熟達改善の実験的検証を行う。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to investigate the effect of body self-excitation on operations of unstable systems, and to introduce the effect to man-machine interface for supporting acquisition of dexterity in unstable systems. This study is conducted by three steps; (1) development of estimation method of operation intention from biological signals, (2) modeling of the relationship between operations of unstable systems and body motion, and (3) experimental verification of the proposed strategy utilizing the body self-excitation effect.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：操作熟達支援 身体自励運動 表面筋電位 パラメトリックノイズ 引き込み現象 操作モデリング H AM バランス動作

1. 研究開始当初の背景

操作に人間が熟達する過程の解析と熟達を支援するメカトロニクスの開発はマン・マシンインタフェースを構成するうえで重要な課題であり、特に棒立て動作や一輪車、自転車操作など特に不安定な対象を操作する場合は操作熟達過程に顕著な差異があることが報告されていた。その中で最も基本的な操作の1つである棒立て操作に関しては、Claremont Univ. のProf. Miltonや大阪工大牛田らなど多くの研究報告がなされていたが、これまでの研究は解析を中心としており、「熟達支援」までの応用には至っていなかった。

一方、ある被験者が棒立て操作をしている最中に、被験者の体の一部(たとえば片足)を意図的に揺らす動作を同時に行わせると、棒立て操作技術が向上するという興味深い体験が報告されていた。しかしながら、研究開始当初では、この現象を十分に説明できる仮説やモデルが示されていなかった。この仕組みを解析し、適切にその現象を利用する器具を開発することで、例えば高齢者の転倒防止や、未熟達者の操作向上を支援することが可能となると推察していた。

そこで、本研究は、上記のような人間操作を解明し、モデル化を行い、そのモデルに基づいた挙動予測、状態推定、制御を行うことで、人間が不安定系を操作する際の操作解析と、解析結果の初心者用操作熟達支援インターフェースへの開発・応用を目指すこととした。厳密な数学モデルを用いて、多くの物理量を測定し、確定的もしくはより直接的な手法を用いた工学的アプローチにより、モデルに基づいたシステム同定、解析・設計など制御工学的なツールを豊富に利用した工学的アプローチによる解析を検討した。

棒立て動作においても、従来研究で用いられていた統計確率的なアプローチにより何か新しい統計的性質を見出したとしても、それを工学的に応用するためには、モデルのように再利用できる知見として構築する必要があり、その意味でモデルに基づいた確定的手法と有機的に連携することで飛躍的に研究を推進できると考えた。

本研究では、人間操作にみられるゆらぎや、注意喚起およびそれに基づく行動が間欠的となる特徴をモデル化する試みとして、「間欠的制御」を提唱し、これを操作を表現する概念モデルとして応用した「ドリフト・アクト制御」の検討と評価を検討した。これにより、統一的なモデルや理論が構築できる可能性を模索していた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、不安定系操作時に、自らの身体の一部を振動させる運動(身体自励運動と呼ぶことにする)もしくは身体自励運動を想定することによって、操作技術が向上する仕組みの解明と、その仕組みを利用し

た初心者の操作技術熟達支援インターフェースの開発、の2点である。具体的には、(a)手の指先に棒を倒立させる棒立て操作、(b)コロの上に板を載せ板上に立つバランス動作を具体例として取上げ、研究を推進する。

仕組み解明においては、人間操作を表現するモデル構築を目指す。「ドリフト・アクト制御」モデル(図1)や「間欠的制御」(図2)モデルへ身体自励運動による影響を含めた新しいモデルを探求する。

その基本的なアイデアとして、パラメトリックノイズモデルがある。パラメトリックノイズモデルとは、棒立て動作において、指と棒との接点を水平ではなく垂直に加振すると、通常棒の倒立状態は不安定平衡点であるが、加振の周波数や振幅によって、倒立状態が平均的に安定平衡点となり棒立てができるという現象を数学モデルで表したときに、そのシステムモデルのパラメータが加振の周波数や振幅に依存する、つまり、パラメトリズされることに由来している。この概念を、ドリフト・アクトモデルや間欠的制御モデルへパラメトリックノイズを含める形で拡張し、対象システム(棒や板、一輪車や自転車)と人間とを含めた系へ身体自励運動を加えた状態をそのモデルで表現できるかを検討する。

人間操作系のモデルが与えられたのであれば、そのモデルに基づき制御工学的な観点から挙動の観測や設計が可能となり、あるタスクに対して最適な身体自励運動を与え方が設計できると考える。この解析、設計に基づいたマン・マシンインタフェースはどのように実現できるのか、また、そのインターフェースを利用することで操作熟達が本当に支援されるかを明らかにする。

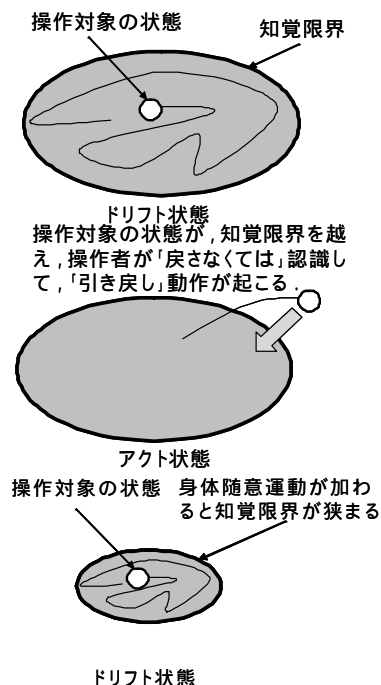


図1: ドリフト-アクトモデル

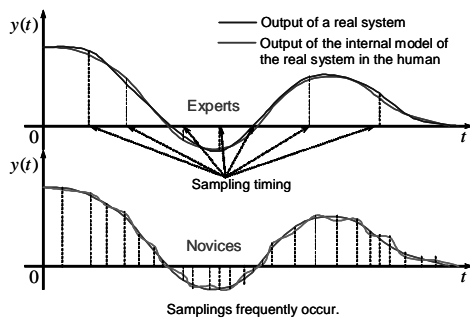


図 2：間欠的制御モデル

3. 研究の方法

本研究は、不安定系操作時に身体自励運動もしくは身体自励運動の想定を行うことによって、操作技術が向上する仕組みの解明と、その仕組みを利用した操作技術熟達支援インターフェースの開発を目指し、H23～H25年度の3年間で下記の具体目標を遂行した。

- (1) 生体情報からの操作意図推定手法の検討
- (2) 不安定系操作と身体運動の関係のモデル化
- (3) 身体自励運動の活用による操作熟達改善の実験的検証

対象とする操作は、先行研究との連続性と、問題の難しさを段階的に引き上げることを意図して、

- (a) 手の指先に棒を倒立させる棒立て操作
- (b) コロの上に乗せ板上に立つバランス動作

とした。人間に不安定系の操作タスクを与え、身体の一部を意図的に運動するよう指示を出したときの、運動指示前の操作、運動指示後、運動をともったときの操作、運動指示後、運動を想定したときの操作、の3つの条件に分けて、操作の計測・解析を行う。

操作計測では、身体運動情報を直接測定するための、多チャンネル表面筋電位計測システム、身体速度・加速度、角速度・角加速度を計測するモバイルシステムを利用し、有機的に結合した身体計測システムを構築し、より総合的な身体情報計測を可能とした。

この計測結果を、「ドリフト・アクト制御」や「間欠的制御」の観点から考察し、身体自励運動を含めたモデルへと拡張することに注力した。モデル導出過程では、棒立て動作におけるモデル化に関する解析を活用した。このモデルを利用し、身体自励運動と不安定系操作の関係を明確化し、これに基づいて設計された身体自励運動を実現できるインターフェースを用いて、身体自励運動の不安定系操作熟達改善への有効性を実験的に検証する。

4. 研究成果

研究目的達成の3つのステップに沿って研究を推進し、以下のような成果を得た。

4.1 生体情報からの操作意図推定

不安定システム操作時の身体運動と身体運動モデルを構築するにあたり、操作を行う身体運動と操作者の操作意図には時間差が生じるため、操作対象の現在の状態と操作者の操作運動を同一時刻で評価することができないという問題が生じた。身体自励運動の不安定操作への影響をモデリングする前段階として、操作運動が行われる前に操作意図を推定する機構が必要となった。

そこで、本研究では、表面筋電位信号に着目した。表面筋電位は筋活動が行われる前に筋内で発生する微弱な電位であり、この電位を皮膚表面で計測してから、それに対応する動作が実際に生じるまでに30～100msの時間差（これを電気力学的遅延：EMDと呼ぶ）がある。このEMDを利用して、操作意図を推定する方式を提案した。

具体的には、図3に示す筋電位センサから表面筋電位を計測し、その時の身体運動（ここでは棒立て操作を意識して手首動作）との関係を動的モデルで表現する、非線形動的モデルによる手法を検討した。

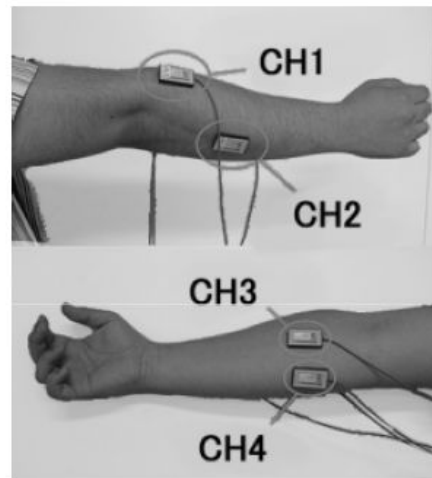


図 3：表面筋電位の計測

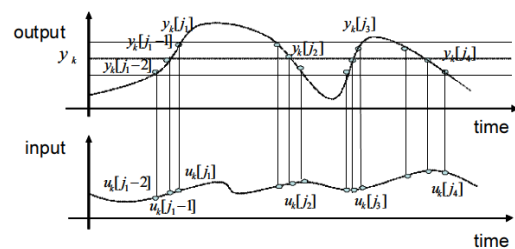


図 4：非線形 DARX モデル

この筋電位-身体運動間の関係を表す動的モデルとして、非線形 DARX モデルを利用することを提案した。非線形 DARX モデルは、モデルの出力値に依存して ARX モデルの係数パラメータが変動するという非線形構造を有している。また、非線形 DARX モデルへの筋電位信号が入力されてから、実際に対応する身体運動が生じるまでの時間差 EMD をむだ時間要素 (D) として記述できるように拡張したものである。(図 4)

この非線形 DARX モデルを利用することで、図 5 に示すように、高い精度で身体運動を 30 ~ 100ms ほど事前に推定することが可能となった。すなわち、30 ~ 100ms ほど事前に操作意図を推定することが可能となった。この成果は、次に述べる棒たて操作の解析に役立てられた。

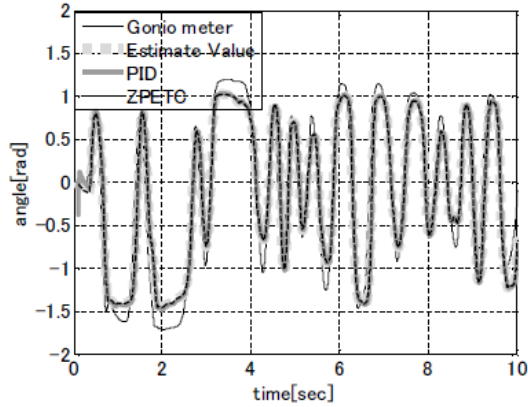


図 5：非線形 DARX による操作意図推定結果

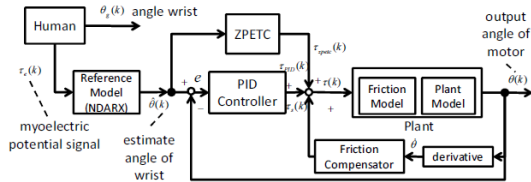


図 6：操作意図推定機構

4.2 棒立て操作における操作モデリングと解析

棒立て操作時の操作モデリングにより、不安定系操作モデルの確立を検討した。図 7 に示す棒立て操作を解析対象とした。



図 7：棒立て操作実験風景

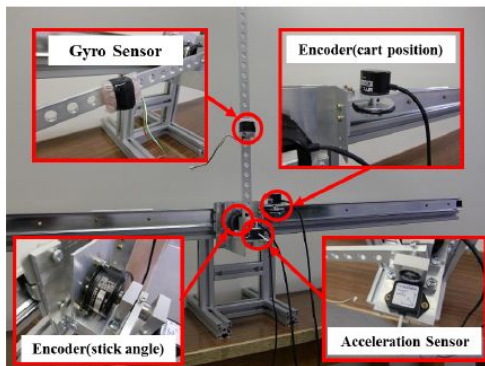


図 8：棒立て操作実験環境

棒立て操作の実験環境を図 8 に示す。この実験装置を利用して棒立て操作のモデリングを行った。

棒立て操作を観察すると、操作者は常に棒立て操作に集中するのではなく、棒を意識的に立てようとする操作と、棒立て操作を意識的に行わない操作の混合によって行われているようであった。さらに操作に熟達するにつれてこれらの操作比率に変化が生じるようであった。

そこで、棒を意識的に立てようとする操作を「Act 動作」、無意識化に行われている操作を「Drift 動作」と区別するモデル(図 9)の構築を検討した。

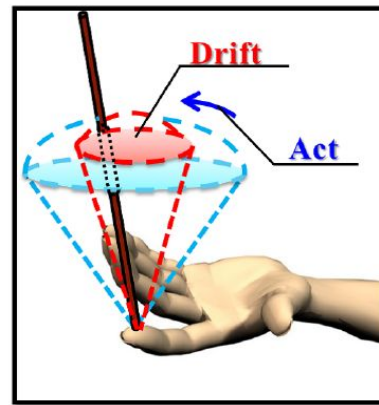


図 9：Drift - Act 動作モデル

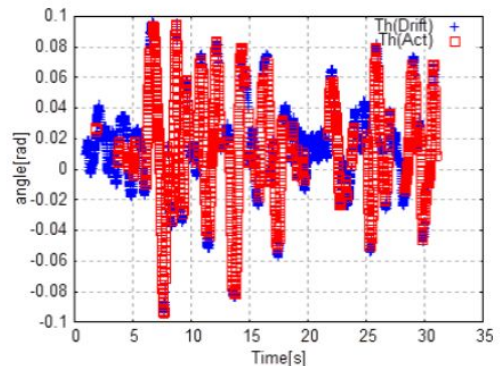


図 10：棒立て操作時の Drift - Act 動作分類結果

ある棒立て操作時の Drift-Act 動作分類の結果を図 10 に示す。この結果より、棒立て操作においては棒の傾斜角度がある閾値を超えると Act 動作が行われ、そうでない状態では Drift 動作が行われていることがわかる。この閾値と Drift 状態の割合が、操作熟達と関係するのではないかとの仮説を立て、操作練習の 1 日目、5 日目のドリフト状態の割合を比較したところ(図 11) 5 日目はほぼ Drift 状態にあり無意識化での棒立て操作が行われていることが見てとれた。

これらの結果によって、不安定系操作時には熟達するにつれて意識的な操作の割合が減少し、無意識的な操作による割合が増加する傾向がみられ、これを熟達指標とできる可能性が示された。

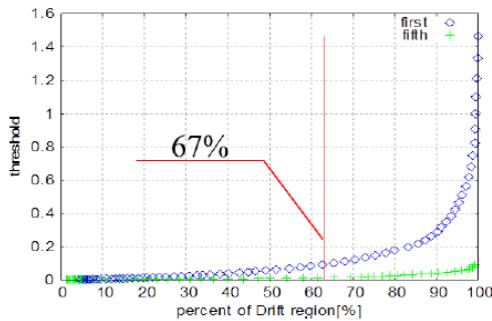


図 11：練習時間と Drift 状態割合

4.3 身体自励運動の積極的活用

不安定系操作のモデリングとその評価指標についての検討をもとに、身体自励運動を不安定操作に積極的に活用することを実験的に検証した。

図 12 に示すバランスボードと呼ばれる、コロの上に板を載せ、その板上でバランスを取る動作を対象とした。



図 12：バランスボード

バランスボード上で、手を振りながらバランス動作を行った場合と、手を振らずにバランス動作を行った場合における、バランス動作比較を行った。4.2 の解析にあるように、バランス動作は意識的に行われる Act 動作と無意識化で行われる Drift 動作によってモデル化することを検証し、その Act 動作と Drift 動作が不安定操作対象の状態（棒立て操作では棒の傾き、バランスボード上のランス動作ではボード上の操作者の姿勢）に応じて決まる傾向が見られたため、本実験においてもバランスボード上の操作者の姿勢を光学的センサによって計測した。

手振り動作（身体自励運動）無の結果を表 1 に、身体自励運動ありの結果を表 2 に示す。

表 1：身体自励運動なし

examinee	Mean	Standard deviation
A1	11	83.2
A2	36	66.6
A3	-7	88.9
A4	5	59.9
A5	31	105.5
A6	-8	56.4
A7	31	93.5
A8	31	92.2
A9	26	97.5

表 2：身体自励運動あり

Examinee	Mean	Standard deviation
A1	-6	58.4
A2	19	55.3
A3	7	88.4
A4	-6	77.6
A5	8	93.0
A6	-13	68.6
A7	23	73.2
A8	6	80.2
A9	21	99.4

比較実験から、身体自励運動を伴う場合には、バランスボード上の姿勢がより安定化することが示された。

以上のように、本研究は不安定系操作に対する身体自励運動の影響を工学的な手法によって解析し、その動作モデルを提案した。提案モデルの有効性は棒立て操作を通し検証された。さらに、身体自励運動を積極的に活用することにより不安定系操作の改善に役立つことも実験的に示された。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 1 件)

林 真道, 小暮 浩史, 浦 和秀, 岩瀬 将美, 貞弘 晃宜, 畠山 省四朗, 澤口 英太: "筋電位の電気力学的遅延を用いた零位相追従型マンマシンインタフェースの開発", 日本ロボット学会論文誌, 査読有, Vol. 30, No. 8, pp. 767/778 (2012)

〔学会発表〕(計 8 件)

Y. Hirata, M. Hayashi and M. Iwase: "Experimental Verification for Maneuverability of Man-Machine Interface Based on EMG," 2013 IEEE/SICE Int. Symposium System Integration, Kobe, Japan, (Dec. 17, 2013)

渡辺 哲矢, 田代 健, 根本 琢磨, 野口 祐太, 宮川 北斗, 吉岡 達也, 仁田 尚人, 岩瀬 将美: "バランスボード上での姿勢安定化に対する手振り動作効果の分析", 第 56 回自動制御連合講演会, 新潟, (2013 年 11 月 16 日)

Masayoshi Ito, Shoshiro Hatakeyama, Masaki Izutsu, "Analysis of a Human Stick Balancing Model with Drift and Act Hypothesis," Proc. of Modeling, Identification and Control, IASTED, February, Innsbruck, Austria (Feb. 11, 2013)

W. Kai, M. Izutsu, S. Hatakeyama, "Consideration concerning Skill Judgment of Inverted Pendulum Stabilization," Proc. of SMC 2012, October, Seoul, Korea, pp. 3045/3050 (Oct. 17, 2012)

平田 康浩, 岩瀬 将美, 林 真道: "筋電位インタフェースの操作性の検証", 第 30 回日本ロボット学会学術講演会, 札幌, RSJ2012AC4C2-1 (2012 年 9 月 20 日)

Masami Iwase, Hiroshi Kogure, Masamichi Hayashi: "Development of Zero-Phase-Tracking Man-Machine Interface with Electro Mechanical Delay," 30th JSST Annual Conference (JSST 2011), Tokyo, Japan (Oct. 23, 2011)

K. Ura, T. Sadahiro, M. Iwase, S. Hatakeyama: "Zero-phase tracking human interface using EMG signals and EMD," 2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA 2011), Denver, USA, pp. 1184/1189 (Sep. 28, 2011)

林 真道, 小暮 浩史, 岩瀬 将美: "筋電位の電気力学的遅延を用いた零位相追従型マンマシンインターフェースの開発", 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 東京, RSJ2011AC1E2-6 (2011 年 9 月 9 日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

畠山 省四朗 (HATAKEYAMA Shoshiro)
東京電機大学・未来科学部・教授
研究者番号: 40138954

(2) 研究分担者

岩瀬 将美 (IWASE Masami)
東京電機大学・未来科学部・准教授
研究者番号: 50339074

井筒 正義 (IZUTSU Masaki)
東京電機大学・未来科学部・助教
研究者番号: 60550580