

令和 3 年 8 月 19 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01414

研究課題名(和文) 反射眼球運動の数理モデリングと操作主体感の推定手法への応用

研究課題名(英文) Modeling Reflexive Eye Movements and Its Application to Estimation Method of Sense of Agency

研究代表者

和田 隆広 (Wada, Takahiro)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：30322564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者らが過去に提案している、前庭感覚系による運動知覚機構に基づいた動揺病(酔い)のcybernetic modelに、同じ前庭感覚系(耳石器、半規管等)で表現可能な前庭動眼反射(Vestibulo-Ocular Reflex, 以下VOR)(頭部運動によって生じる反射的眼球運動)を算出できるように発展させることに成功した。また、運動・操作に対して自らが主体的に行っている感覚を表す、操作主体感(SoA)が変化した場合に、提案モデルの特定のパラメータが変化することを明らかにした。また当該モデルに、運動予測の効果を表現する機能を追加することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度自動化システムの使用時には、操作者が操作・運動に対して積極的に関与しているかを知ることが望まれているが、この積極的関与の度合を直接確認する手段が無いという問題があった。本研究で開発された反射眼球運動モデルを用いることで、頭部運動と眼球運動の計測から操作主体感をモデルパラメータとして抽出することの可能性が開かれたことは、学術的に意義高い。またこの成果を発展させることで、操作主体感の推定技術、さらには操作への関与度の推定に繋がると期待されることが社会的意義の高い点である。

研究成果の概要(英文)：In our previous study, we proposed a cybernetic model of motion sickness based on the human motion perception mechanism of the vestibular sensory system. In this study, we developed a computational model of the vestibulo-ocular reflex (VOR) (reflex eye movement caused by head movement), which can be expressed by the same vestibular sensory system (otolith, semicircular canal, etc.) by expanding the motion sickness model. In addition, it was found that certain parameters of the proposed model changed when the sense of subjectivity (SoA), which represents the sense of one's own initiative in performing a movement or operation, changed. Furthermore, we succeeded in adding a function to the model that expresses the effect of human motion prediction.

研究分野：ヒューマンマシンシステム, Biological cybernetics

キーワード：前庭動眼反射 操作主体感 計算モデル

## 1. 研究開始当初の背景

人間が高度に自動化された機械を操作する機会が増えている。一方で、高度自動化システムに対する過度の依存などが懸念されている。そのため、操作者がある操作に対して積極的に関与しているか否かを知ることが望まれている。これまで様々なオペレータモニタリングの研究がなされてきた。画像認識技術などによる行動モニタリングでは意識の脇見などの内部状態が検出しにくく、生体信号計測は信号出現形態の個人差の問題があるなど、決め手に欠けていた。一方、ある操作への積極的関与に対する主観である、操作主体感が認知心理学等で着目されているが、主観評点で評価されており、客観的に定量化する手段については、手つかずの状態であった。

一方、biological cybernetics の分野では、加えられた感覚刺激に対して人間がどのように自己の運動を把握しているのか(自己運動感覚)等を記述する数理モデルが導出されている。研究代表者和田も、回転運動を含む6自由度身体運動における自己運動感覚の数理モデルと、これに基づく酔いの数理モデル6DOF-SVCモデルを提案した。このモデルには、中枢神経系内における身体運動の推定精度を表現するブロックが存在する。これは、人間が中枢神経系で自らの運動指令およびその結果としての身体運動の予測値を計算する、遠心性コピーの効果モデル化したものである。実際、このパラメータ変動によって、動揺病が低減するという計算結果を得ており、車両運転者は酔いにくいという事実と同傾向の結果を得た。遠心性コピーと操作主体感は強い関係にあることからこのモデル構造による、操作主体感の表現を着想した。

加えて、自己運動感覚と、前庭動眼反射(VOR)、視機性反射(OKR)には深い関係を示唆する実験結果が得られており、VORやOKRの数理モデルが提案されている(Merfeld(2002)、Newman(2009)およびNooij et al. (2016))。これらはすべて受動的な身体運動を主に取り扱っており、能動・受動の眼球運動の差異は表現不能であった。

以上から、(1)遠心性コピーを表現できる前庭系モデルと、(2)前庭系、視覚系の自己運動感覚数理モデルを組み合わせることで、操作主体感を数理モデルの枠組みで理解するという着想に至った。さらにこのモデルに(3)反射眼球運動(VOR、OKR)の記述能力を組み合わせることで、能動・受動運動時の反射眼球運動を記述可能な数理モデルが構築でき、これを用いることで、身体運動と眼球運動の計測から、操作主体感を推定することを着想した。

## 2. 研究の目的

以上の背景に鑑み、6DOF-SVCモデルに視覚系感覚器ダイナミクスを導入し、OKR-VOR統合眼球運動ブロックを追加することで、入力(身体運動)、出力(眼球運動)が共に計測可能な値で構成されるOKR-VOR統合数理モデルを構築することを第一の目的とした。さらにこのモデルを用いることで操作主体感SoAを計算論的に理解することを第二の目的とした。さらに運動予測の効果をモデルに導入することを第三の目的とした。

## 3. 研究の方法

### 3.1 遠心性コピーに関連するパーツを有する反射眼球運動モデルの開発と操作主体感の差がVORとモデルパラメータに及ぼす影響の調査

これまでの我々の研究では、頭部運動から動揺病発症率を推定する6DOF-SVCモデルを構築している。このモデルでは、身体動揺の加速度センサ、角速度センサである耳石器、半規管によって知覚された重力方向と、小脳内に構築されたそれら感覚器の内部モデルによって推定された重力方向の差を評価し、その蓄積値によって動揺病発症率(嘔吐発症率)が算出される。このモデルには、中枢神経系に構築された感覚器の内部モデルが含まれているが、内部モデルには自身の運動知覚の精度を表すブロックが存在する。これは遠心性コピーに相当するものであり、操作主体感SoAと関連が強いと考えられるため、これを用いてSoAを記述するブロックを導入する。動揺病SVCモデルの出力は動揺病発症率(MSI)であり、計測が困難な量である。一方、よく用いられるMerfeldの前庭動眼反射の数理モデルは出力が眼球角速度である。また動揺病SVCモデルにはVORに必要な前庭系の基本的な神経信号処理の要素が既に含まれている。そこで、VOR眼球運動の記述機能を動揺病モデルに導入した。

さらに、提案モデルの入力は頭部加速度、角速度、出力は眼球運動である。そこで、作業中における頭部運動およびその際の眼球運動の計測値から、適当な最適化手法によってモデルパラメータを同定することでSoAの検出が可能と考えた。

そこで、能動受動時の頭部運動とVORを計測し、これら計測データから、モデルパラメータ同定を行うことで、能動受動の差がパラメータに現れるかを明らかにすることを目的の一つとした。自ら搭乗する座席がピッチング方向に運動する装置を開発し(立命館新設)、能動条件と、受動的に装置に搭乗している条件において実験を実施した。

### 3.2 操作主体感の差がVORとモデルパラメータに及ぼす影響の調査

3.1節、4.1節で記載の通り、能動受動という操作の有無によってパラメータに差があることが確認された。ここでは能動的操作に限定し、操作主体感を変化させる実験を実施し、VORに差が生じるか、また提案モデルのパラメータに差が出るかを確認した。

### 3.3 運動予測を加味した Cybernetic model の開発

心性コピーや、運動予測に関連するブロックの開発が重要であると着想し、運動予測効果をより積極的にモデリングする研究を実施した。能動運動に限らず周期的な運動の場合は運動が予測しやすく、これが自己運動感覚の精度を向上させるという仮説を、モデルベースの非線形マッピングの一つである Gaussian Process Regression モデルを用いてモデリングすることとした。

## 4. 研究成果

### 4.1 遠心性コピーに関連するパーツを有する反射眼球運動モデルの開発と操作主体感の差がVORとモデルパラメータに及ぼす影響の調査

3.1 の方法を用いてモデルの開発を行った。計測された頭部運動を提案モデルに入力して眼球運動を計算したところ、計測された眼球運動を精度高く再現できることを確認した。さらに、能動条件、受動条件時それぞれにおける頭部運動と眼球運動から自己運動感覚に関するモデルパラメータを同定したところ、条件間でモデルパラメータに有意な差が確認された。また、高精度上下加振器(関西大学既設)をジョイスティックで操作できるように改良し、ジョイスティック操作に対する装置動作の関係を変化させる実験を行い、主観的な操作主体感 SoA と装置動作の遅れの間に相関があることを確認した。

### 4.2 操作主体感の差が VOR とモデルパラメータに及ぼす影響の調査

まず、ジョイスティック操作によりヨー方向に回転する椅子を開発した。さらにその実験装置を用いて、操作主体感を変化させる実験を行った。具体的にはジョイスティック入力角度に対するシート角速度の伝達関数を変化させた。当該伝達関数は一次遅れ系と無駄時間を組み合わせたものとした。操作しやすい伝達関数パラメータ設定を試行錯誤によって探索し、これを操作主体感の高い設定とした。またこれに対して無駄時間を大きくすることで、操作主体感が低い条件を設定した。両者を操作する被験者実験を実施し、頭部運動と眼球運動を計測した。実験で計測した頭部運動と眼球運動を VOR モデルに導入しモデルパラメータ同定をした結果、操作主体感が失われる場合には、自己運動感覚に相当するパラメータが減少することを明らかにした。

また、既設の上下軸加振機を使用して2種類の実験を実施した。すなわち、ハンドル操作による左右へのトラッキング実験を行ない、その画面表示による自車両の左右位置に連動して加振する場合と、位置とは無関係に定常的に加振する条件において実験を実施した。実験参加者の操作量に一次遅れ処理および外乱を施すことにより、操作主体感を変化させた。実験の結果、操作主体感を変化したが、計測した前庭動眼反射には顕著な変化は確認されなかった。

以上は、能動的に行うタスクによる身体運動と、VORの原因となる身体運動が合致する場合にのみ、SoAがVORに影響することを示唆している。

### 4.3 運動予測を加味した Cybernetic model の開発

自己運動感覚モデルを内在する動揺病計算モデルにこれを導入したところ、運動予測がしやすい状況では動揺病が減るという実験結果と同一の傾向を得ることができた。本成果により、運動指令のみならず周期運動などの運動学習に起因する運動予測を同一のモデルで表現できるようになり、両者が混在した場合に互いに分離することを可能になると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takuya Kono, Yuki .Sato, Takahiro Wada	4. 巻 52(19)
2. 論文標題 Model analysis of influence of mental workload on vestibulo-ocular reflex	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 329-334
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ifacol.2019.12.076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Wada Takahiro, Fujisawa Satoru, Doi Shunichi	4. 巻 63
2. 論文標題 Analysis of driver's head tilt using a mathematical model of motion sickness	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Industrial Ergonomics	6. 最初と最後の頁 89～97
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ergon.2016.11.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wada Takahiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Computational Model of Motion Sickness Describing the Effects of Learning Exogenous Motion Dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Systems Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnsys.2021.634604	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 4件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Takuya Kono, Yuki .Sato, Takahiro Wada
2. 発表標題 Model analysis of influence of mental workload on vestibulo-ocular reflex
3. 学会等名 The 14th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshihito Sugiura, Takahiro Wada, Tatsuya.Nagata, Koji Sakai, Yuki Sato
2. 発表標題 Analysing Effect of Vehicle Lean Using Cybernetic Model of Motion Sickness
3. 学会等名 The 14th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hikaru Sato, Takahiro Wada, Yuki Sato
2. 発表標題 Accuracy of Reflex Eye Movement and Motion Sickness
3. 学会等名 Congress on Motion Sickness (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野拓也, 佐藤勇起, 和田隆広
2. 発表標題 運転中の精神負荷が前庭動眼反射に及ぼす影響のモデルパラメータによる解析
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤洸, 佐藤勇起, 和田隆広
2. 発表標題 動揺病の重症度と前庭動眼反射の精度の関係
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田隆広
2. 発表標題 人間の運動知覚と動揺病（乗物酔い）の計算モデルと車両乗員への応用
3. 学会等名 とことんわかる自動車のモデリングと制御2019（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田隆広
2. 発表標題 操縦型機械の快適性・快適性向上に関する研究
3. 学会等名 立命館大学認知科学研究センター認知科学研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田隆広
2. 発表標題 Cybernetic Model of Human Motion Perception toward Human Machine Matching
3. 学会等名 NAISTコロキウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoya Uefune, Takahiro Wada, Takafumi Asao
2. 発表標題 Modulation of Vestibulo-Ocular Reflex by Volition of Machine Operation
3. 学会等名 Proceedings of IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河野拓也, 佐藤勇起, 和田隆広
2. 発表標題 Mental Workloadが前庭動眼反射に及ぼす影響のモデルパラメータによる解析
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉浦敏仁, 和田隆広, 佐藤勇起, 長田 達矢, 坂井 浩二
2. 発表標題 動揺病数理モデルによる車両リーンの動揺病低減効果評価
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryota Kuwahara, Takafumi Asao, Takahiro Wada, Kentaro Kotani, and Satoshi Suzuki
2. 発表標題 Control over Machine Operations Influences the Vestibulo-Ocular Reflex
3. 学会等名 Spring Conference of the Ergonomics Society of Korea and 20th Korea-Japan Joint Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田隆広
2. 発表標題 操縦型機械の快適性向上に関する研究
3. 学会等名 夢源力セミナー, 広島大学コベルコ講座 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田隆広
2. 発表標題 運動予測の効果を表現可能な動揺病計算モデル
3. 学会等名 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野拓也, 佐藤勇起, 和田隆広, 常道大智, 丸谷宜史, 小野良樹
2. 発表標題 精神負荷が反射眼球運動と環境変化に対する反応時間に及ぼす影響の調査
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Sato, Takahiro Wada, Yuuki Kashiwagi, Yuuto Takebayashi
2. 発表標題 Evaluation of operational feeling of rotating seat by the vestibulo-ocular reflex
3. 学会等名 SfN Global Connectome: A Virtual Event, 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Wada
2. 発表標題 Mathematical Model of Motion Sickness: Capturing the Effect of the Prediction of Exogenous Motion
3. 学会等名 SfN Global Connectome: A Virtual Event, 2021
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Yuki Sato, Takahiro Wada, Yuuto Takebayashi, and Yuuki Kashiwagi
2. 発表標題 Evaluation of sense of agency for rotating seat operation by vestibulo-ocular reflex
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 評価装置、制御装置、操作主体感向上システム、評価方法、及びコンピュータプログラム	発明者 和田隆広, 朝尾隆文	権利者 学校法人立命館, 学校法人関西大学
産業財産権の種類、番号 特許、2018-170741	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>ヒューマンロボティクス研究室-Human Robotics Lab.  <a href="http://hr.ci.ritsumeai.ac.jp/">http://hr.ci.ritsumeai.ac.jp/</a></p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	朝尾 隆文  (Asao Takafumi)  (10454597)	関西大学・システム理工学部・助教    (34416)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	佐藤 勇起  (Sato Yuki)  (10635395)	立命館大学・総合科学技術研究機構・研究教員    (34315)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------