

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01296

研究課題名（和文）搭乗型機械システムに対する操作性の計算論的理解と推定手法への応用

研究課題名（英文）Computational Understanding and Estimation of Operational Feeling of Mechanical Systems

研究代表者

和田 隆広（Wada, Takahiro）

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・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）：遠隔操縦ロボット等の操縦性の理解とその定量化手法の研究である。本研究では我々が先行研究で開発した前庭動眼反射のモデルを発展させ、人が機械運動に対して有する運動予測機構を追加することで、このモデルを用いて機械の操作性を計算論的に理解すると共に、操作性の推定手法の構築に挑戦した。操縦の容易さと反射眼球運動の間には一定の関連が存在することを実験的に明らかにした。また、運動知覚の計算モデルの高度化を図り、記述できる運動パラダイムを拡大させた。さらに、限定されたシーンではあるが、操縦性能の異なる機械を操縦した際の操縦性の差を、計算モデルで表現できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、操縦型機械オペレーターの操縦性能とスキルを、反射眼球運動や運動知覚に関連する計算モデルを用いて記述することを目的とした。操縦性という主観的な要素を、人間の知覚-行動ループに関する計算モデルで表現できたことが本研究の学術的意義である。また、これまで主観的な評価に依存していた操縦性の評価を、計測データに基づいて推定できるようになったことは、リアルタイムでの同定や、それを基にした機械のチューニング技術の開発に繋がると期待され、社会的意義を持っている。

研究成果の概要（英文）：This research was based on upon our previous studies where we developed a model of the vestibulo-ocular reflex. We enhanced this model by integrating a motion prediction mechanism that humans possess towards machine movements. Through this model, we computationally understood the operability of machines and attempted to construct a method to estimate operability. We experimentally established a correlation between the ease of operation and reflexive eye movements. Furthermore, we improved the computational model of motion perception, expanding the range of motion paradigms it can describe. Although in a limited context, we confirmed that the computational model could represent differences in operability when operating machines with varying performance levels.

研究分野：Human machine systems, Human robot collaboration

キーワード：機械操作性 反射眼球運動

1. 研究開始当初の背景

遠隔操縦ロボットや、建機や自動車などの運転操作の操作性向上が本研究の対象である。機械の応答性向上や振動低減などの制御技術の点では大いに成果を上げている。さらなる操作性向上が望まれているが、この実現には従来の機械の性能向上に加えて、いよいよ人間による「操作感」の定量化が必要であるが、系統的な取り組みが不十分であった。例えばメンタルストレスによって自律神経系が変化するという仮説などにに基づき、心拍変動などの生体信号から間接的に操作快適性を捉えようとする試みがあったが個人差が大きいという問題があり、また操作性のメカニズムの理解には全く切り込めていなかった。

一方、我々は、科研費基盤B「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」(18H01414)において、これまで主観評価に頼ってきた、「操作主体感」(機械操作への積極的関与に対する主観)の計算モデルによる定量化に成功した。当該研究では、自己運動感覚(加えられた運動刺激によって生じる自分自身の運動に対する感覚)を表現するcybernetic modelに基づいた反射眼球運動モデルを開発し、頭部運動と反射眼球運動の計測値から自己運動感覚の精度に関するパラメータを推定することで、これと関連の強い「操作主体感」を表現することに成功した。これは、操作主体感という操作性に関連する感覚を定量化した重要な一歩であるが、「操作主体感」が高いことが前提である場面における、機械設定等の差による「操作感」の違いという、微妙な差を表すことはこれまで不可能であった。

能動的な機械操作における操作のし易さは、機械の有するダイナミクスに大きく依存する。いわゆる「思い通り」の機械運動とは、中枢神経系に構築されていると考えられる、対象機械のダイナミクスの「内部モデル」が精度高く構築され、これで予想される機械運動が現実と近い状況であると考えられる。通常、この内部モデルを推定することは困難である。しかし、自動車や建機などの搭乗型の機械の場合には、反射眼球運動を出力としたモデルを構築することで内部モデルに関する情報が抽出できるとの着想に至った。つまり、これまで我々が科研費プロジェクトで提案してきた反射眼球運動を含む感覚運動系cybernetic modelを用いて、人が新奇な(新しく、過去にあまり経験の無い)ダイナミクスをもつ機械システム操作において行っている「機械ダイナミクスの内部モデル獲得」のシステム論的理解を深めることで、操作性の定量化に応用できるという着想に至った。

2. 研究の目的

以上の背景に鑑み、我々の反射眼球運動モデルを発展させ、人間と機械を含む系の人間機械系cybernetic modelを構築し、このモデルを用いることで、機械の操作性を計算論的に理解すると共に、操作性の推定手法に繋げることを研究目的とした。

3. 研究の方法

3.1 搭乗型機械の操縦性と眼球運動の関係性の実験的検証

機械操作性を変化させた際のVOR変化を調査する実験を実施した。具体的には、機械設定が異なるものがVORに与える影響を詳細に調査することにした。

6軸モーション装置とゲームエンジンUnityを組み合わせ、独自にピッチモーションつきドライビングシミュレータを開発した。アクセル操作に対する車両前後速度を一次遅れ系、車両加速度から車両ピッチ運動を一次遅れ系でモデル化し、「操作性の良い」条件と時定数を過度に小さくした「操作性の悪い」条件の2条件を設定した。先行車を追従するタスクを設定し、被験者12名に対して実験を実施した。「操作性の良い」条件に比べ、「操作性の悪い」条件では、反射眼球運動の精度が有意に低下することが実験的に確認された。

3.2 機械操作性cybernetic modelの精度向上

操縦性の定量化、推定技術の基礎となる前庭系運動知覚モデルの改良を進めた。まず、VORモデルの基盤となる、self-motion perception部の精度向上に取り組んだ。具体的には、eccentric yaw rotationにおける角速度知覚や、重力知覚の予測精度を、先行研究と比較することで評価した。誤差フィードバック部に用いる積分の有無を変更した複数のモデル構造を準備し、それぞれに対してモデルパラメータの最適化を実施した。その結果、重力推定誤差部にのみ積分を有するモデル(In1)が最も適していることを明らかにした。さらに当該モデルが微分方程式であることから解軌道の振る舞いについて解析したところ、当該In1モデルのみが“適切”な平衡点を有し、この平衡点に対して漸近安定性を有することを示した。なお、眼球運動モデルとしてよく用いられるMerefeld Modelでは状態量の平衡点が状態変数の初期値に依存するという欠点を有していることを明らかにした。我々の知る限り、我々のモデル(In1)が初期値に依存しない“適切な”平衡点を有する運動知覚モデルであることを示した(図1)。

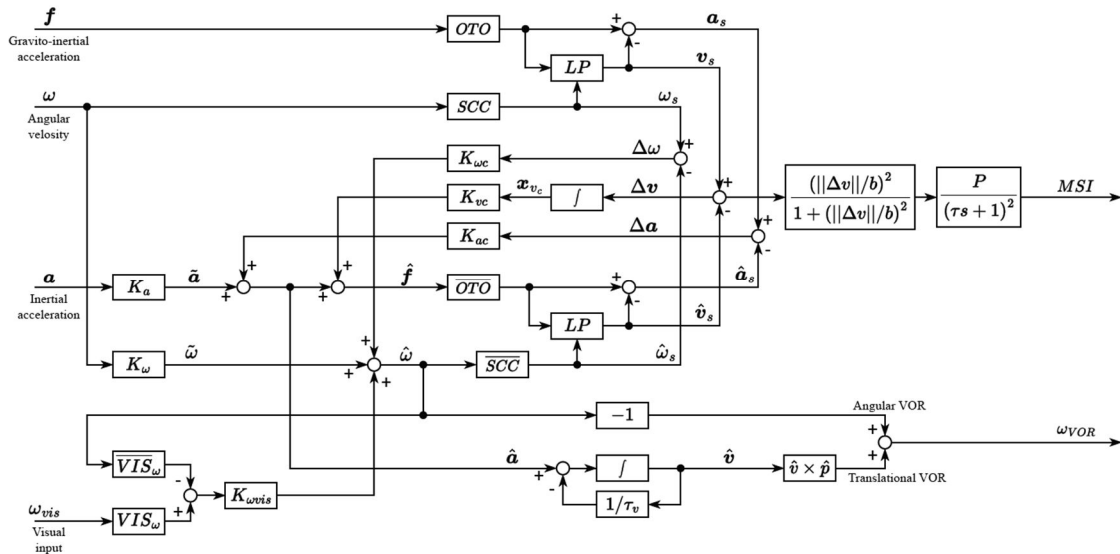


図1：本研究で開発したSubjective Vertical Conflict仮説に基づく運動知覚および反射眼球運動モデル（Inモデル）

3.3 モデルを用いた操作性の評価手法の提案と実験による検証

3.3.1 眼球運動と操作性の関係の実験的検証

前庭動眼反射により操作性の評価をすることを目的とした実験を実施した。実験参加者には、ハンドルを操作することで映像上の障害物を避けるタスクを行ってもらった。また、1試行ごとに操作性に関する主観評価を実施した。実験参加者は大学生および大学院生の5名であった。全ての実験参加者からインフォームドコンセントを得た。

実験装置

実験参加者の頭部を動揺させるために6軸動揺装置（WIZAPPLY社，SIMVR 6DOF）を使用した。CG映像を提示するために、実験参加者の前方にディスプレイを設置した。CG映像と6軸動揺装置を操作するためにゲーム用ハンドル（Logicool社，G29）を使用した。実験中の頭部加速度，頭部角速度，視線ベクトルを計測するために、眼鏡型の視線計測装置（Tobii社，Tobii Pro Glasses 2）を使用した。なお以降の解析では，頭部加速度のデータは使用しなかった。

実験条件

ディスプレイに2車線道路を模擬した映像を提示した。道路上には左右交互に障害物を配置し，ハンドル操作によって，障害物を避けてもらった。単調なハンドル操作にならないように障害物間の距離は40 m～70 mの間を5 m刻みでランダムに配置した。動揺装置は映像上の車両挙動に合わせてロール方向とヨー方向に回転させた。

操作性を低下させるために，操作入力であるハンドル角度に対して4段階（200 ms，400 ms，600 ms，800 ms）の遅れ処理を施したうえで動揺装置と映像を動かした。遅れなし（0 ms）を加えた5条件で実験を行った。条件ごとの繰り返し回数は2回であった。

結果・考察

遅れ時間が0 ms，200 ms，400 msではVORゲインと操作性の主観評価の間に強い相関がみられた（図2）。しかしながら，大きな遅れ時間である600 ms，800 msでは相関が低かった。遅れ時間が大きくなるとハンドル操作が乱れ，視線データに欠損が増える傾向があったことから，これが影響していると考えられる。したがって，あまりにも操作のし難い条件においては，適切な評価をできない可能性が示唆された。

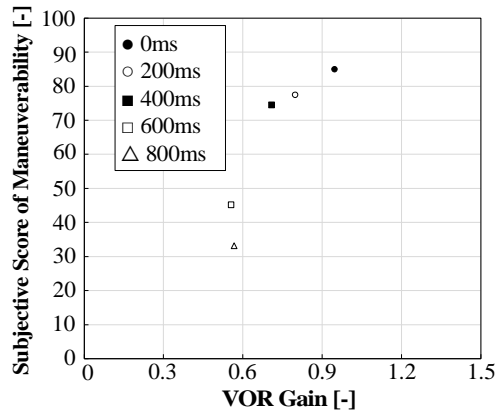


図2 VORゲインと主観的な操作性の関係

3.3.2 モデルによる検証

本プロジェクトで開発した人間機械系cyberneticモデル中に含まれるパラメータによる操作性の評価を実施した。パラメトリックな方法として、Unscented カルマンフィルタ (UKF) を使用した。これまではUKFで必要となる設定値を手動でチューニングしてきたが、より適切なパラメータの推定、モデル化誤差の低減のため、遺伝的アルゴリズムと逐次二次計画法を組み合わせた手法を用いるように改良を施した。図3にモデルパラメータ K_{ω} と操作性の主観評価値との関係を示す。両者の間に強い相関のあることが分かり、モデルパラメータで操作性を評価できる可能性が示唆された。ただし操作性の悪い条件（遅れ時間500 ms）では、推定したモデルパラメータのばらつきが大きかった。これは図1に示したVORゲインの結果と同様に、眼球運動が安定していないことが原因であると考えられる。今後はこのような点を考慮した信号処理方法の実装が課題である。

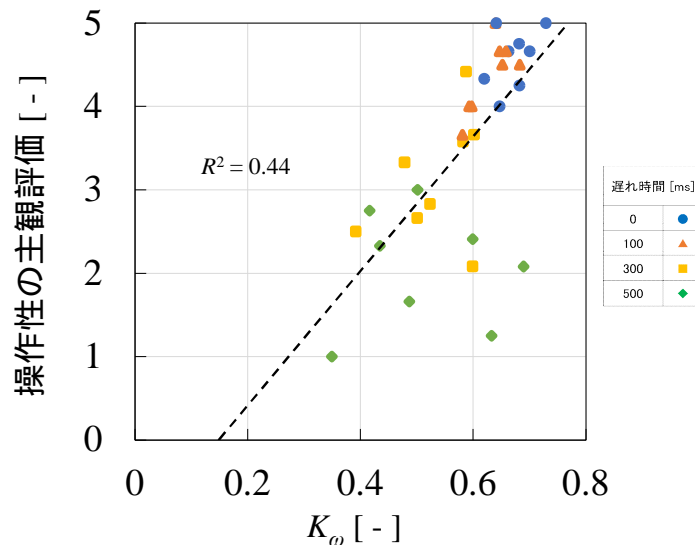


図3 モデルパラメータと主観的な操作性の関係

4. 研究成果

本研究では、搭乗型機械の操作性が高い場合に反射眼球運動の精度が高いことを、実験的に確認した。さらに本研究で新たに開発した運動知覚cybernetic modelのパラメータを用いて、操作性が説明できる可能性を示唆する結果を得た。

このように、運動知覚に関する信号によって内部モデルの精度が表現できる見通しを得た。この結果は、機械操縦性の向上やスキル向上などへの発展が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Tsukasa Suwa, Yuki Sato, Takahiro Wada	4. 巻 vol.3
2. 論文標題 Reducing Motion Sickness When Reading With Head-Mounted Displays By Using See-Through Background Images	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Virtual Reality	6. 最初と最後の頁 ---
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/frvir.2022.910434	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 Hikaru Sato, Yuki Sato, Atsushi Takamatsu, Mitsuhiro Makita, Takahiro Wada	4. 巻 vol.3
2. 論文標題 Earth-Fixed Books Reduce Motion Sickness When Reading With a Head-Mounted Display	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Virtual Reality	6. 最初と最後の頁 ---
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/frvir.2022.909005	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 Yu Yamaguchi, Yuki Okafuji, Takahiro Wada, Kazuomi Murakami, Hiroyuki Ishida	4. 巻 vol.11
2. 論文標題 Estimation of Drivers' Gaze Behavior by Potential Attention when using Human-Machine Interface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 16723-16734
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3192859	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 Tatehara Takumi and Nagahama Akihito and Wada Takahiro	4. 巻 January
2. 論文標題 Online Maneuver Learning and its Real-Time Application to Automated Driving System for Obstacles Avoidance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Intelligent Vehicles	6. 最初と最後の頁 ---
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIV.2022.3146622	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 山口遊, 岡藤勇希, 和田隆広, 村上一臣, 石田裕之	4. 巻 Vol.52, No.5
2. 論文標題 路面描画に影響されるドライバの注視特性の検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 1137-1142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11351/jsaeronbun.52.1137	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 Yuki Okafuji, Toshihito Sugiura, Ryusei Osugi, Chenkai Zhang, Takahiro Wada	4. 巻 June
2. 論文標題 A Machine Learning-based Approach to Analyze Information used for Steering Control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 94239 - 94250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3093337	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 尾杉竜正, 岡藤勇希, 和田隆広	4. 巻 Vol.52, No. 2
2. 論文標題 深層学習を用いた車両の速度制御に関するドライバの認知特性の解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 355-362
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Akihito Nagahama, Takahiro Wada, Daichi Yanagisawa, Katsuhiko Nishinari	4. 巻 570
2. 論文標題 Detection of leader-follower combinations frequently observed in mixed traffic with weak lane-discipline	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	6. 最初と最後の頁 ---
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2021.125789	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 C. Zhang, Y. Okafuji, and T. Wada	4. 巻 Vol. 12, No. 2
2. 論文標題 Reliability evaluation of visualization performance of convolutional neural network models for automated driving	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Automotive Engineering	6. 最初と最後の頁 41-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20485/jsaeijae.12.2_41	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 Kono Takuya, Sato Yuki, Wada Takahiro, Tsunemichi Daichi, Fujiyama Naoyuki, Ono Yoshiki	4. 巻 11
2. 論文標題 Suppression of Vestibulo-Ocular Reflex With Increased Mental Workload While Driving	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 119244 ~ 119253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3326809	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 Liu Hailong, Inoue Shota, Wada Takahiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Subjective Vertical Conflict Model With Visual Vertical: Predicting Motion Sickness on Autonomous Personal Mobility Vehicles	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	6. 最初と最後の頁 1 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TITS.2024.3357170	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16件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Hailong Liu, Shota Inoue, Takahiro Wada
2. 発表標題 Motion Sickness Modeling with Visual Vertical Estimation and Its Application to Autonomous Personal Mobility Vehicles
3. 学会等名 2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiro Wada
2. 発表標題 Modeling Motion Sickness toward Comfortable Automated Vehicles -Motion Sickness to Motion Happiness-
3. 学会等名 IEEE IV 2022 Workshop (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoki Kobayashi and Yuki Sato and Takahiro Wada
2. 発表標題 Investigation of effect of landscape flow on evaluation of mental workload by vestibulo-ocular reflex using VR driving simulator
3. 学会等名 6th International Symposium on Future Active Safety Technology Toward Zero Traffic Accidents (FAST-zero ' 21) (国際学会)
4. 発表年 2021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 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田隆広
2. 発表標題 車両乗り心地に向けた動揺病の数学モデル
3. 学会等名 自動車技術会中部支部第2回技術交流会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田隆広
2. 発表標題 搭乗型・操縦型機械における運動快適性向上に向けて
3. 学会等名 バイオメカニズム学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Wada
2. 発表標題 Modeling Motion Sickness and Its Application to Automated Driving
3. 学会等名 The 2nd Workshop on Motion Comfort in Automated Driving, Delft, The Netherlands (Virtually)（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Sato, Tukasa Suwa, Takahiro Wada
2. 発表標題 Effect of car front camera images presented in the background of a book displayed on a Head-Mounted Display on motion sickness
3. 学会等名 The 46th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tatsuki Otobe, HaiLong Liu, Takahiro Wada, Norimitsu Sakagami
2. 発表標題 Motion Sickness Symptoms in Underwater Robot Operator in Low Visibility Environment
3. 学会等名 International Comfort Congress（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yujiro Tamura, Takahiro Wada, HaiLong Liu
2. 発表標題 Generating Visual Information for Motion Sickness Reduction Using a Computational Model Based on SVC Theory
3. 学会等名 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shota Inoue, Hailong Liu, Takahiro Wada
2. 発表標題 Revisiting Motion Sickness Models Based on SVC Theory Considering Motion Perception
3. 学会等名 WCX SAE World Congress Experience 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 乙部 達生, 劉 海龍, 坂上 憲光, 和田 隆広
2. 発表標題 固視点追加による水中ロボット操縦者の動揺病低減
3. 学会等名 第24回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村 俊介, 劉 海龍, 和田 隆広
2. 発表標題 乗員姿勢制御を考慮した動揺病モデルの快適な車両運動生成への応用
3. 学会等名 第24回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 和田隆広
2. 発表標題 動揺病モデリングと自動運転車への応用
3. 学会等名 自動車技術会主催シンポジウム Cars that think and communicate II - 高度自動運転へ互いにわかりあえるクルマを目指して II - (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahiro Wada
2. 発表標題 Computational Models of Motion Sickness and Their Application to Comfort in Automated Vehicles
3. 学会等名 IEEE ITSC 2023 2ND WORKSHOP ON ARE YOU HAPPY WITH AV USER EXPERIENCE (UX) IN AV-HUMAN INTERACTION (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahiro Wada
2. 発表標題 Computational Models of Motion Sickness and Their Application to Automated Vehicles
3. 学会等名 International Symposium on Advanced Vehicle Technology (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>受賞</p> <p>1. T. Otobe, H. Liu, N. Sakagami, T. Wada, Best Presentation Award, "Motion Sickness Symptoms in Underwater Robot Operator in Low Visibility Environment", International Comfort Congress 2023(2023.9.7)</p> <p>2. 乙部達生, 劉海龍, 坂上憲光(龍谷大学), 和田隆広, 優秀講演賞, "固視点追加による水中ロボット操縦者の動揺病低減", 第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2023), 2023.12</p> <p>3. 井上翔太, 大学院研究奨励賞, "前庭感覚と視覚の情報をを用いて個人毎の動揺病の症状レベルを算出する計算モデルの提案", 自動車技術会(2023.3.7)</p> <p>4. 乙部達生, 劉海龍, 坂上憲光, 和田隆広, SI2022優秀講演賞, "船上における ROV 操縦が動揺病に及ぼす影響", 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(2022.12.23)</p> <p>5. 井上翔太, 劉海龍, 和田隆広, SI2022優秀講演賞, "視覚と前庭感覚を考慮した動揺病の計算モデル", 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(2022.12.23)</p> <p>6. 和田隆広, 技術部門貢献賞, 自動車技術会(2022.8.25)</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)	

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