Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00241

Received date : 23 July, 2021

Accepted date : 16 December, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 24 December, 2021

MRを用いた福祉車両の操縦支援システムに対する NASA-TLXを用いた初心者の障害物回避操作の訓練回数ごとの習熟分析

松永 信智^{*1}, 中村 怜央^{*2}, 武内 雄大^{*3}, 岡島 寛^{*4}

Learning analysis of obstacle avoidance to beginners at trial times using NASA-TLX for drive assist system of welfare vehicle using Mixed Reality

Nobutomo MATSUNAGA^{*1}, Reo NAKAMURA^{*2}, Yudai TAKEUCHI^{*3}
and Hiroshi OKAJIMA^{*4}

^{*1,*4} Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University
2-39-1 Kurokami, Chuo-ku, Kumamoto 860-8555, Japan

^{*2,*3} Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University
2-39-1 Kurokami, Chuo-ku, Kumamoto 860-8555, Japan

Abstract

Recently, welfare vehicles are widely used among the aged. However, it is not easy for inexperienced beginners or the aged to control the welfare vehicle in the narrow place. For the problem, the driving assistance system was proposed in which a virtual vehicle is projected on head mounted display (HMD) and controlled by a third person viewpoint. However, as a user wears HMD to control the virtual vehicle, the driving situation of the virtual vehicle was not visible from outsiders and the appropriate guidance was not provided to beginners. In order to get the driving skill of the vehicle more quickly, it is important to utilize the mixed reality (MR) space using the virtual object and to provide timely guidance while checking the movements of the virtual vehicle. In this paper, we propose a drive assist system of welfare vehicle for beginners using Mixed Reality. A virtual course that automatically displays virtual objects using MR is constructed and the virtual space is shared with the instructor. To evaluate the practice of the driving skill for beginners, NASA task load index (NASA-TLX) is used for quantifying the mental work-load. As a result, proposed method suppresses the weighted workload (WWL) score, and it is clarified that the driving skill is improved in a smaller number of trials.

Key words : Welfare vehicle, Virtual platoon, Mixed reality, NASA-TLX, WWL score, Driving skill

1. 緒 言

超高齢化社会に伴い、電動の福祉車両の需要が増加している。福祉車両は高齢者や身障者が福祉施設や病院などの屋内で利用する場合が多い。屋内の走行領域は十分広いとは言えず、操縦に慣れていない利用者は狭い通路や歩行者や障害物の存在するような複雑な環境下での操縦を強いられる。電動福祉車両の操縦においては、システムの操縦性の改善や自動運転の応用についての研究が行われてきた(松本, 2009, 和田, 2009, Zengin et al., 2013, 安藤, 2015, 上松他, 2018, 松永他, 2018, 大門他, 2019)。しかし、歩行者空間はさまざまな障害物や移動体との混合交通となるため福祉車両に対しては自動運転だけでは対処出来ないケースもあり、手動操縦を支援するニーズも高いのが現状である。

No.21-00241 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00241]

^{*1} 正員, 熊本大学大学院先端科学研究部 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1)

^{*2} 学生員, 熊本大学大学院自然科学教育部

^{*3} 熊本大学大学院自然科学教育部

^{*4} 熊本大学大学院先端科学研究部

E-mail of corresponding author: matunaga@cs.kumamoto-u.ac.jp

福祉車両の手動操縦の支援に関しては、近年ヴァーチャルリアリティ(VR)、拡張現実(AR)、複合現実(MR)などを利用したナビゲーションの研究が注目されている。VRはCGの仮想世界を利用する技術、ARは現実世界に仮想世界を重ねて拡張する技術であり、MRは環境情報を獲得し実世界と仮想世界を融合させることに特徴がある(Carmigniani et al., 2011, Blokdyk, 2018)。福祉車両へのVRの応用例として、車椅子のトレーニングシステム(John et al., 2018)や、複雑な屋内環境をナビゲートする実用的なシステム(Oliveira et al., 2016)が提案されている。VRを使うことで実際に操縦する前に安全な仮想空間で走行練習をすることができるが、仮想空間と実空間での車椅子の操縦性や利用者の環境認識の差が大きいことから実空間での再練習が必要になると思われる。他方、ARやMRを使った研究も行われている。鈴木らはARを用いた車いす搭乗型屋内ガイドロボットを提案している(鈴木他, 2003)。また、Kimuraらは狭路での操縦に対して、透過型ヘッドマウントディスプレイ(HMD)に仮想車両を運転中に投影し疑似的な客観視点(第三者視点)で操縦することで、複雑なコースを走行できる仮想隊列制御系を示した(Kimura et al., 2017)。Kimuraらの提案する手法は、仮想車両を操縦することで後方で隊列を構成する福祉車両を安全に走行できる点が特徴である。また仮想隊列制御系に応用した先行研究としては、MRを使ってジョイスティック操作を補正する操縦支援システム(松永他, 2018)などがある。このように、仮想隊列制御系の有効性は示されているが、ホログラムで表示される仮想車両の操縦性に関する具体的な検討は少ない。先行研究では、仮想隊列制御を使った操縦支援システムの操縦スキル向上を難度の高いコースへの平均ゴール到達回数で評価し、熟練者の軌道との差をMSEで評価することで上達度の評価を試みた。実験の傾向としては、仮想隊列制御を使った操縦支援(Kimura et al., 2017)の方がHMDを使わない通常の操縦(以下、主観視点での操縦)よりも早くコースを操縦できるようになったが、統計的にはその差は有意であるという結論は得られなかった(松永他, 2018)。なおアンケート調査では、主観視点での操縦に比べ障害物との間隔が確認しやすいという点で有意であることが示されている。利用者にとっては仮想車両を使った仮想隊列制御は実験で初めて経験するシステムであるが、主観視点での操縦と同等の操縦ができることを確認している。

超高齢化社会ではARやMRを使った装置が出現し便利になっていくと思われるが、その利用の際には福祉車両の操縦の上達に時間がかかることが障壁になると考える。福祉車両の操縦の上達は、利用者自身の運動能力に大きく依存する。操縦をより早く上達するには、操縦に習熟したインストラクタが適切なコーチング(指導)を行うことが重要である。MRなどを利用する場合は、利用者が仮想車両のような仮想空間にある物(仮想オブジェクト)を利用して操縦のトレーニングを行うことになる。仮想オブジェクトを使うトレーニングは事前準備がほとんど必要ないため、利用者にとって利用しやすい。他方、仮想オブジェクトを使ったシステムは、インストラクタからは仮想車両の運転状態を視認できないため適切な指導が難しい。効果的なトレーニングを行うためには、利用者がインストラクタと仮想オブジェクトを利用する仮想空間を共有することができれば短時間での操縦の上達が期待できる。仮想オブジェクトを使った操作は近年利用されているが、利用者の操縦の上達過程に注目した研究は筆者の知る限りなされていない。MRが操縦の上達過程にどの程度差が生じるか、その時の利用者の負荷状態の変遷を明らかにすることは、MR環境の設計の基礎的研究となると考える。

そこで本論文では、初心者を対象に仮想隊列を使った福祉車両の操縦支援システム(Kimura et al., 2017)の短時間での上達を目的として、MRを用いて仮想オブジェクトの自動表示を行い、インストラクタとの仮想空間の共有機能を有したトレーニングシステムを提案する。また、提案する操縦支援システムに対し、初心者の上達過程を統計的に分析し、利用者の操縦にかかる負荷評価を行うことで、提案するトレーニングシステムの有効性を示す。第2章では、仮想隊列を使った福祉車両の操縦支援システムについて概説する。第3章では、MRを用いた仮想オブジェクトの自動表示によるトレーニングシステムを提案する。第4章では、福祉車両の操縦支援システムの走行実験の結果を示し統計評価を行う。第5章ではNASA Task Load Index(NASA-TLX)を用いて操縦にかかる物理的、心理的負荷を数値化し、提案するシステムのメンタルワークロード分析を行う。

2. 福祉車両の操縦支援システム

本論文では、HMD上に前方に表示される仮想車両との仮想隊列制御を用いて操縦を行う(Kimura et al., 2017)。仮想隊列制御では、後方からの疑似的な客観視点で操縦することで狭所での操縦を容易にしている。

Fig. 1 Driving image using driving assistance with virtual platoon control and its system configuration (Matsunaga et al., 2018).

Fig. 2 Simplified block diagram of virtual platoon control system.

2.1 福祉車両の運転支援システムの概要

利用者の姿勢や車両の挙動に合わせてプログラムを動かす必要があるため、利用者や車両の位置・姿勢を正確に推定する必要がある。そこで HMD として Microsoft 社の HoloLens2 (Blokdyk, 2021) を用い、福祉車両として STAVi を用いる。STAVi は、高齢者や要支援者がベッドや車椅子からの移乗が容易な後部搭乗型の電動福祉車両である (Zengin, 2013)。

実験に使用する STAVi とハードウェアの概略を図 1 に示す。STAVi のコントローラは、モーションコントローラと、利用者に画像を提示する HMD のコントローラの 2 つから構成されている。モーションコントローラでは利用者のジョイスティック操作量とエンコーダ及び IMU の値を入力として STAVi の速度と舵角を計算する。STAVi の情報は Arduino から Raspberry Pi3 に送られ、ルータ経由で HMD に送信される。HMD より得られた頭部姿勢と STAVi の位置・姿勢情報から客観視点での仮想車両の位置姿勢を求め表示する。HMD を装着した利用者の前方に仮想車両のホログラムを表示し、利用者は後方からそれを見ながらジョイスティック操作を行う。

図 2 に制御系の簡易ブロック図を示す。支援システムは、仮想空間を走行する仮想車両 (Virtual Vehicle) と、後方から実空間を隊列で走行する STAVi から構成される。隊列制御は waypoint を使った地点追従 (Target Point following) 制御と車間距離制御 (Adaptive Cruise Control) から構成されており、STAVi はモデル誤差抑制補償器 (MEC) (Okajima et al., 2013) によりロバスト制御することで精密にトラッキングすることが可能になる。

図 3 の青い車両は利用者から HMD 上に見える仮想車両であり、STAVi と同サイズのフットスタンプ表示をしている。また、仮想車両と STAVi の操縦感が一致するように、仮想車両のパラメータとジョイスティックの特性を調整している。図 4 は実験中の STAVi である。仮想車両は HMD を着用した利用者からは視認できるが、利用者以外の第三者から見えないことに注意する。

Fig. 3 User view of virtual vehicle using MR. The virtual vehicle is simplified with a low-profile considering user's visibility. The clearance is 0.15m on one side (Matsunaga et al., 2018).

Fig. 4 View from outsiders. STAVi drives between the cardboard and the wall. Virtual vehicle is not visible from outsiders.

2.2 福祉車両の操縦性評価

ここで先行研究(松永他, 2018)で行われた操縦性の評価について概説する。この実験では、仮想隊列制御を使った操縦(Kimura et al., 2017)と主観視点での操縦を比較した。STAViを操縦したことのある非熟練者(健常者, 大学生4名, 初心者でない点に注意)にフリースペースであらかじめ10分程度の走行練習を行い、その後に狭路での走行実験を行い両者の比較を行っている。精密な操縦が求められる狭路走行実験では、仮想隊列制御を使うと全被験者は2回目に狭路の完走ができるようになったが、主観視点での操縦では3~5回の試行が必要であった。

以上から、MRを使った仮想車両を使い、さらにインストラクタのアドバイスを加えることが、完走回数を増やすことに繋がったと予想される。仮想隊列制御を使った操縦は走行するまでの回数は短かったが、t検定(森棟他, 2015)の結果、統計的には有意ではなかった。また、実験走行の終了後に被験者にアンケートを行いt検定を行った。主観視点での操縦に比べ、仮想隊列制御を使った操縦では障害物との間隔が認識しやすく、STAViの経路が明示されるため動きが予測しやすい点で有意であることがわかった。なお、この実験ではHoloLensを使用している。

スポーツにおいて適切な指導の役割は重要であることが知られているが(Gabriele et al., 2013)、スポーツだけでなく福祉車両の操縦においても同様である。しかし、ホログラムを使った操縦では、利用者本人しか視認できない仮想車両がどんな状態で走行しているか見えないためインストラクタから適切な指導を受けることができない。従って効率的な操縦の上達のためには、使いやすい福祉車両の制御系の構築だけでなく、適切な指導が可能な環境の構築は重要な課題である(Matsunaga and Okajima, 2021)。そこで、仮想隊列制御の操縦システムにおいてトレーニング空間を仮想オブジェクトを利用して構成し、仮想空間の共有(Takeuchi et al., 2019)を利用したトレーニングシステムを構築する。

3. トレーニング可能な操縦支援システムの概要

3.1 トレーニングに関する仮想オブジェクトの設定

図5にトレーニング可能な操縦支援システムの概念図を示す。提案する操縦支援システムには、従来(Kimura et al., 2017)のシステムに指導用の仮想オブジェクトの自動表示機能と、インストラクタとの空間共有機能を追加している。そのため操縦を行う際には、操縦をサポートする様々な仮想オブジェクトがHMD上に表示される。また詳細は後述するが、利用者とインストラクタは仮想空間の共有を行うことで、図5(a)の左に示すインストラクタも仮想車両の動きを視認することができるようになり、走行中に操縦のアドバイスを行うことができる。図5(b)は実験風景で、利用者の左後方から仮想車両や仮想オブジェクトの状態を見ながらアドバイスをを行っている。

トレーニングに関する仮想オブジェクトの設定について説明する。今回扱うトレーニング環境では、障害物回避の上達が目的である。トレーニングシステムで利用可能な仮想オブジェクトは、前章で説明した仮想車両の他に、

(a)Driving instruction image.

(b)Experimental photo.

Fig. 5 Driving instruction image using driving assistance with virtual platoon control. (a) shows the driving instruction image, (b) shows experimental photograph with the instructor.

Fig. 6 Course used in the experiment. 4 objects are placed in non-uniform position.

仮想障害物、理想経路の表示、操舵を始める点を示すオブジェクト、走行後のフィードバック画面がある。これらのオブジェクトは、利用者が装着している HMD 上に表示されるが、以下各オブジェクトの詳細について述べる。

3.1.1 仮想障害物の配置

屋内走行空間の障害物は椅子や植木など様々な物があるが、走行実験やトレーニングする場合は追突しても大きなダメージにならないようにダンボールが使われる。そのダンボールを模擬した仮想オブジェクトをここでは仮想障害物とよぶ。インストラクタは、任意の位置に設置することができ様々なコースを設置することができる。

仮想車両を使った走行実験では、システム起動時に幅 2m の廊下に 4 つの仮想障害物をホログラム表示する。HMD に表示される障害物の配置を図 6 に示す。STAVi の初期位置から、それぞれ前方 4m, 7m, 9m, 11m に仮想障害物を左右交互に配置し、走行幅を 1.3m としている。STAVi の車幅は 1m であるため、障害物の横の走行経路の余裕は 0.3m である。仮に壁と障害物の中心を走行できても、ズレの許容値は最大で 0.15m とタイヤ幅程度しかなく、低速で走行しても一般に初心者には操縦は難しい。さらに、このコースは 1 個目から 2 個目の障害物の間隔は 3m だが、2 個目から 4 個目の障害物の間隔は 2m となっており、同じタイミングで操舵ができないように工夫されている。

利用者がシステム起動させた時に表示される Unity (Felicia, 2019) 上の仮想障害物を図 7 に示す。仮想障害物は縦 0.2m, 横 0.7m, 高さ 0.2m の白色の立方体である。仮想車両が仮想障害物の横を走行しているときの様子を図 8 に示す。仮想障害物と仮想車両の距離を計測し、距離 (図中の矢印) が 2.0m 以下になると仮想障害物が白色から赤色に点滅することで、近辺の接触に注意すべき仮想障害物として利用者の視点を誘導する。なお、2.0m は障害物の間隔から決めているが、被験者が気づき操舵するまで十分な時間があることは確認している。

3.1.2 理想経路と操舵の開始点の表示

同図には、障害物の配置によって自動表示される理想の走行経路を幅 0.1m の緑色のラインで表示している。理想経路の経路探索には Unity のナビゲーションシステムである NavMesh を用いている。NavMesh は 3 次元のオブジェクトを自動で動かす際に使用される機能であるが、仮想車両の理想経路の経路探索と表示にも利用できる。仮想障害物を配置すると、その都度理想経路の経路探索を行い表示する。

経路がわかってもしどの位置で操舵するかがわかりにくいので、そのマークにピンの形を模した赤色のピンオブジェクトを利用する。この実験では、理想経路が事前に決まっているため、走行経路上にはピンの形を模した赤

Fig. 7 Image of pin objects. Green line indicates ideal path, and welfare vehicle slips through the red pins. White blocks indicate virtual obstacles, and red one means an obstacle to watch.

Fig. 8 Virtual obstacle flashes red and white when welfare vehicle approximates the obstacle to keep user's eye on.

色のピンオブジェクトが自動表示される。なお、このオブジェクトは先行研究 (Takeuchi et al., 2019) でも使用しているが、直接手で床にマークできるようにピン形状にしている。理想軌道は衝突しないように仮想障害物の角近辺で曲がる。仮想車両が理想軌道上を走行するとき、左右のタイヤが走行すべき位置にピンオブジェクトを配置する。スタート時はピンオブジェクトは表示されていないが、仮想車両が表示場所に近づくと、障害物の 1.0m 手前で操舵すべき箇所にピンオブジェクトが床から左右に現れる。これは、利用者の視点を仮想障害物とタイヤの走行するピンの位置あたりに動かし、利用者が衝突しないように注意を払うように誘導するためである。なお理想軌道が折れた点の近辺にピンオブジェクトは配置されるので、必ずしも障害物との距離を最大にする安全な経路ではなく、一つの目印である。従って、3.2 節で説明するインストラクタのアドバイスが非常に重要な役割を果たすことに注意する。

3.1.3 利用者へのフィードバック

仮想車両がゴールに達すると、利用者に対して走行結果のフィードバック画面 (図 9) が自動表示される。同図右は、インストラクタの走行例で一度も障害物に衝突せずにゴールに到達した際の表示例である。画面に表示される項目は、障害物との衝突回数、目標経路達成率である。

仮想障害物と仮想車両とは当たり判定を設けている。接触したときは時にリアルタイムで表示すると共に、仮想車両と障害物との接触回数をゴールまでカウントする。また、自車の走行経路は理想経路の上にリアルタイムで走行経路を表示する (図 7, マゼンダ線)。ゴールで示す目標経路達成率は、理想経路に対して仮想車両の走行経路の一致した積算値の百分率であり、主に自己練習で使用される。このように、リアルタイムでのフィードバックと、ゴールまでの走行の総括データが利用者に示される。

3.2 インストラクタとの仮想空間の共有

仮想オブジェクトを HMD 上で扱う際には、利用者とインストラクタとの仮想空間の共有は不可欠である。インストラクタと利用者の環境の共有は様々な方法がある。Takeuchi らは、UnityMulti-player による HMD のシェアリングを使った支援システムを提案した (Takeuchi et al., 2019)。このシステムを使えば利用者は走行中にピンオブジェクトが設置でき、インストラクタ側からもジョイスティックを使って仮想車両の操縦ができるようになる。しかし、仮想オブジェクトを設置するためには HMD を使った操作にまず慣れなければならず、インストラクタにとっては大きな負担であった。

一方、本論文で提案するトレーニングシステムには前述のピンオブジェクトの自動設定機能があるので、共有空間でリアルタイムの操作が必要がない。HMD の装着も可能であるが、インストラクタの視野を制限するため、本研究では Miracast を使った簡易表示システムを構築している。Miracast は Wifi-Alliance が策定した無線通信方式であり、コンピュータの画面をディスプレイにワイヤレスで表示することができる。Miracast は無線通信方式として Wifi Direct が利用されているので、無線 LAN ルーターなどの環境がなくても機器同士を 1 対 1 で通信することができる (Wi-Fi Alliance, 2021)。Miracast を使用すると利用者の見る HMD 画面が共有され、インストラクタのコンピュータ画面に表示される。図 10 は、インストラクタが見るコンピュータの画面を示す。なお、実験では利用者の後方横側から指導することを想定している。

Fig. 9 Image of feedback screen displayed at the goal. Number of crashes is counted by using collision detection.

Fig. 10 Instructor view using Miracast. The screen of a laptop computer shows use's view from the center camera on HMD.

ここで、インストラクタのアドバイスの具体例を示す。仮想空間を共有している場合は、Miracastを使って利用者の仮想車両や仮想オブジェクトの状態もわかるので具体的な指導が可能である。タイミングはピンを目印に「ここで曲がり始める」、操舵が急な場合は「操舵はゆっくり。なめらかに動かす」、「障害物との間隔をもう少し広く取る」など、仮想障害物ごとに説明する。なお、仮想空間を共有していない従来の手法では、仮想車両の状態が見えないため、インストラクタは STAVi の走行状態を見て、走行終了後にアドバイスを行う。ダンボールとぶつかった場所の確認や、「もう少し早く曲がり始める」など提案手法とアドバイスする内容は同じである。しかし、従来の手法では仮想車両の状態に応じた具体的な指示ができない点に注意する。

4. 仮想空間を共有する操縦支援システムによる走行実験

4.1 走行実験の内容

提案する仮想空間を共有する操縦支援システムの有効性を実験により確かめる。被験者 20 名を 10 名ずつ 2 つのグループに分ける。提案するシステムを用いて走行を行うグループを A グループ、従来の仮想隊列制御系をそのまま利用するグループを B グループとする。A グループは、第 3 章で示した全ての仮想オブジェクトを表示する。また、インストラクタと仮想空間を共有し被験者に適宜アドバイスを行う。B グループは仮想車両以外のオブジェクトは使用せず、障害物はダンボールを配置して実験を行う。インストラクタは仮想オブジェクトが視認できないため、STAVi の挙動をみて走行後アドバイスを行う。被験者には障害物や壁に仮想車両が衝突せずにコースを完走するように指示した。なお、被験者は、21 歳から 25 歳の福祉車両に操縦経験がない健常者である。

実験では、コース完走までに 60 秒の制限時間を設け被験者にはできるだけ早くゴールすること、仮想車両の速度は最大速度 (0.3m/s) で操縦するように指示した。このような走行実験を 1 人あたり計 5 回行う。試験後のデータ入力に時間がかかることから被験者の負荷を考慮し、各試行の間には 1 日以上の間隔をあけ行った。なお、屋

Fig. 11 View of virtual objects displayed on subject's HMD while driving with the training system.

内の最大速度に比べ速度が遅い理由は、操縦経験のない初心者を対象とするためである。以上の実験では、熊本大学大学院先端科学研究部倫理委員会の指針に基づいた安全な実験が行われたことを付記する。

インストラクタは同様のコースを安定して完走することができる熟練者が担当する。被験者は全く経験がないため、両グループとも前準備として主観視点で一度だけ STAVi を操縦し実験コースを走行しジョイスティックの感覚を経験してもらう。コース完走の制限時間を 60 秒としタイムカウントを行った。被験者にはできるだけ早くゴールするように指示する。また、操縦システムとトレーニングシステムの説明を事前に行った。

図 11 は、提案システムを用いて走行中に HMD 上に表示される仮想オブジェクトを示す。被験者は前方の仮想車両を操縦することで STAVi を動かす。同図 (a) はシステム起動時に表示される調整用の初期画面であり、事前に仮想障害物の位置を正確に経路上に正確に配置するために使用する。同図 (b) は走行開始時の画像であり、仮想障害物が与えられると、理想経路が緑色のラインで表示される。なお、前方の先に見えるオレンジの柱がゴールである。同図 (c) は第一障害物に近づいた様子であり、仮想車両が仮想障害物に接近すると仮想障害物が赤色に点滅する。また、その時に走行目標のピンオブジェクトが床から現れる。なお、仮想車両の前方に表示されている黄色から赤色で表されている三角のオブジェクトは、ジョイスティックの指令速度を示す入力ゲージである。入力ゲージは入力が大きくなるほど赤色で表示され、同図では最大入力で操縦されていることが確認できる。同図 (d) は第二障害物の横、同図 (e) は第四障害物の横の様子である。同図 (f) は、仮想車両がゴールに達した際に表示される利用者へのフィードバック画面である。

4.2 コース完走回数による評価

A, B 各グループの被験者は 10 名で各々 5 回の走行試験を行う。図 12 は、A, B 各グループの各走行回数における成功人数を表示している。走行回数が増えるにつれ、各グループとも成功者が増加している。実験の結果、A グループは全走行回数 50 回のうち 30 回成功、B グループは 12 回成功と完走回数に大きな差がみられた。A グループは 4 回以上コースを完走できた被験者が 10 名中 6 名存在し、5 回目に 9 名が成功している。B グループは 5 回目でも被験者 10 名中 4 人しか成功しておらず、10 名中 3 名は一度もコースを完走できていない。

図 13 に、A グループと B グループの平均完走回数を箱ひげ図で示す。A グループの総完走数の平均値は 3.0 回と B グループの平均値は 1.2 回となっており、A グループの最大値は 5 回、最小値は 1 回、B グループの最大値は 3 回、最小値は 0 回となっている。A グループの完走の平均数が B グループの約 3 倍となっており、A グループのほうが操縦技術が高い傾向にあるといえる。

A グループと B グループの F 検定を行い等分散であることを確認した後、提案手法の平均完走回数の t 検定を行った。有意水準 5% で片側検定の t 検定を行った結果、 $p=0.0056 \leq 0.05$ であり、A グループと B グループの平均完走回数に有意差が見られた。以上の結果から、提案するシステムを使った A グループの平均完走回数の差が大きく、操縦技術の上達が早かったと考えられる。従来の仮想車両を使うだけでなく、仮想オブジェクトを使って利用者に注目する点を明示し、インストラクタがそれを達成する適切な操作指示を与えることが、完走回数を増やすことにつながった予想される。

Fig. 12 Comparison of success times for group A and B. 9 subjects were successful at the 5th trial in group A, however, only 4 subjects were successful in group B.

Fig. 13 Box-and-whisker plot of success times for each subject comparing group A with B. The difference of success times was statistically significant.

提案するトレーニングシステムでは訓練の際に理想軌道を表示しているが、理想軌道の有無が走行に影響があるかどうかを確認する。実験終了後に、グループ A の全員に仮想オブジェクトを使用せずグループ B と同じ環境で 6 回目の走行実験を行った。走行実験の結果、グループ A 全員が仮想オブジェクトの支援なしに実環境を完走できた。

5. NASA-TLX を用いたメンタルワークロードの評価

5.1 NASA-TLX を用いた評価の実験手順

前章で行った毎回の走行実験は、被験者にとってはトレーニングとなっている。この走行実験の評価は、通常は走行実験の完遂度で評価されるのが一般的である。しかし、福祉車両の操縦にはジョイスティック操作のような身体的な要素だけではなく、初心者の場合には特に精神的負荷の要素も強く影響していると考えられる。

メンタルワークロードの主観的評価法の中で最もよく使われている手法として、NASA の Human Performance Group によって開発された NASA Task Load Index (NASA-TLX)(芳賀, 1996, 三宅, 2015) がある。NASA-TLX の自動車への応用として、例えばワークロード分析(朝尾, 和田, 2006)、運転支援システム負荷低減効果(梶川他, 2020)などがある。福祉車両に関する NASA-TLX の応用は、車椅子運転用の没入型シミュレーターの設計(Devigne et al., 2017)、電動車椅子の VR シミュレータへの応用(Hamilton et al., 2019)などがある。また滝本らは、車椅子ナビゲーションの負担評価を NASA-TLX で評価している(滝本, 新妻, 2013)。しかし、これらの研究はある状態のメンタルワークロードの分析であり、初心者の仮想オブジェクトを使った福祉車両の操縦の上達過程をメンタルワークロードの変化でとらえた研究はない。そこで、操縦の上達過程においては何らかの精神的作業負担の変化が起こればと考え、2つのグループの走行実験を NASA-TLX を使ってメンタルワークロードで評価する。

NASA-TLX は、知的・知覚的要求(Mental Demand:MD)、身体的要求(Physical Demand:PD)、タイムプレッシャー(Temporal Demand:TD)、作業成績(Own Performance:OP)、努力(Effort:EF)、フラストレーション(Frustration:FR)の6つの評価尺度から構成されている。これらの評価尺度の詳細は、芳賀, 三宅らの日本語版 NASA-TLX に関する論文に詳しい(芳賀, 1996, 三宅, 2015)。

まず、全ての被験者は操縦のメンタルワークロードを評価する前に、これらの尺度の重要度を一対比較法によって判定を行う。次に、NASA-TLX で用いる各評価尺度について説明を行い、それらの尺度を意識しながら実験を行うように説明する。NASA-TLX での評価を含む実験手順を以下に示す。

手順 1 操縦支援システムの予備実験

各尺度において「高いー低い」の評定を求められても、比較対象がない状況では評定点の信頼性が低下する可能性がある。走行実験の評価の際に比較対象とするため、両グループとも主観視点での操縦によりコースを走行するという基準課題を与えた。

手順 2 操縦支援システムを用いた走行実験

A グループは、仮想空間を共有する操縦支援システムを用いて走行実験を行う。B グループは、従来の仮想隊列を使った操縦支援システムを用いて実空間で走行実験を行う。仮想車両に追従する福祉車両が障害物や壁に衝突した場合は、その場で実験を終了し走行失敗とする。

手順 3 NASA-TLX での一対比較

NASA-TLX を使って一対比較でのワークロード評価を行う。一対比較では、6つの尺度の全ての組み合わせである 15 組について、ワークロードへの関わり・重要度が大きいと思う方を選択させる。その際、15 組の組み合わせがランダムに表示される。なお、説明を聞きながら一対比較を行うには 10 分超の集中した時間が必要である。

手順 4 NASA-TLX でのワークロード評価

NASA-TLX の分析には、NASA より配布されているアプリケーションを使用する(NASA software, 2021)。評価に際しては Visual Analog Scale (VAS) を用いている。

図 14 に、一対比較の結果から決められた各評価尺度の重みの平均値と標準偏差を示す。青色が A グループ、赤色が B グループを示す。同図より両グループとも知的・知覚的要求(MD)、作業成績(OP)、フラストレーション(FR)の重みが大きいことがわかる。本実験の目的に関係する作業成績(OP)は必然的に重みが大きくなるが、他に

も仮想車両の操縦という不慣れなことに対する不安感や、操縦の複雑さに重きをおいた被験者が多い。また、今回の実験では、各グループで行う課題の内容は同じであるが、特に身体的要求 (PD)、作業成績 (OP)、努力 (EF)、フラストレーション (FR) に大きな差が見られた。同図から身体的要求 (PD)、フラストレーション (FR) は A グループの方が重みが大いことがわかる。これは、仮想オブジェクトの指示に従うために細かな操縦が必要と感じた被験者が多く、フラストレーションとなっていると考えられる。他方、作業成績 (OP) と努力 (EF) は B グループの方が重みが大い。これは、インストラクタからの指示がなく自力で努力することを必要と認識した被験者が多いためと考えられる。

Fig. 14 Average of weights for each rating scale of NASA-TLX.

5.2 NASA-TLX による比較

A, B 各グループとも各 5 回 (計 100 回) の試験走行をおこない、ワークロード評価を行った。図 15 に各グループの被験者毎の WWL スコア (Weighted Workload Score) の推移を示す。一対比較によって定められた尺度ごとの重みを乗じて平均したものが WWL スコアである。同図 (a) が A グループの WWL スコアの推移、(b) が B グループの WWL スコアの推移を示す。a から i は各被験者を示し、赤線が全員の平均値を示す。また、各試行での平均値を図中下方の円内に表記している。手順 1 の基準課題で 2 つのグループの評価のばらつきは抑制されていると考えられるが、WWL スコアは主観評価であるためばらつきがありその差は小さくはない。

図 15(a) より A グループでは全体的に右下がりの傾向の中で、1 回目の試行から 2 回目の試行にかけて大きく WWL スコアが減少している被験者 (b, c, d, e) がいる。この被験者全員はフリーアンケートで、1 度目の走行で操縦に慣れたと同義な表現で回答を寄せている。他方、同図 (b) より B グループでは WWL スコアの上下動が激しい被験者が目立つ。これは OP の評価尺度が大い被験者が多いため、成功と失敗で WWL スコアも大きく変

Fig. 15 Line plot of WWL score of NASA-TLX for each subject. (a) shows the variation of group A, and (b) shows the variation of group B.

Fig. 16 Radar chart of the mean values of NASA-TLX rating scales in the 1st and the 5th trials. The rating scales in group A became small in OP, EF, FR, MD.

動する。また B グループは成功回数が少ないが、試行回数を重ねる度にわずかに WWL スコアは減少していることがわかる。これは走行実験そのものの慣れと考えられ、従来の仮想隊列制御系の操縦が必ずしも上達しているわけではない。なお、走行実験そのものの慣れは成功が多い A グループでも同様な現象が見られるが、A グループの減少率は B グループに比べ大きいことに注意する。

図 16 は、1 回目と 5 回目の評価尺度を示す。同図 (a) が A グループの結果、(b) が B グループの結果を示す。また、図中において点線が 1 回目の試行の評価尺度の平均値、実線が 5 回目の試行の評価尺度の平均値を表す。レーダチャートの軸は VAS 法のメモリを表し、両グループとも第一回は 6 つの評価尺度全部で難しいと判断されている。両グループで 1 回目の評価尺度を比較するとその差は小さいが、5 回目の試行では A グループの方は大きく減少していることがわかる。A グループは、特に知的・知覚的要求 (MD)、作業成績 (OP)、努力 (EF)、フラストレーション (FR) の減少幅が大きい。他方、B グループでは努力 (EF)、フラストレーション (FR)、作業成績 (OP) が微減した程度である。以上から、A グループが福祉車両の操縦においてメンタルワークロードを感じる被験者が全体的に少なくなっていると言える。

図 17 に、各グループの 5 回目の試走の時の WWL スコアの箱ひげ図を示す。A グループの WWL スコアの平均値は 43.27 であり、B グループの平均値は 53.73 である。また、A グループの最大値は 61.00、最小値は 30.00、B グループの最大値は 62.00、最小値は 39.67 である。A グループと B グループの WWL スコアの差が統計的に有意であることを確かめるために、まず F 検定を行い等分散であることを確認した後、有意水準 5% で提案手法の WWL スコアの t 検定を行った。その結果、 $p = 0.0065 < 0.05$ となり、2 つのグループの WWL スコアには有意差が見られ、

Fig. 17 Box-and-whisker plot of WWL scores at 5th trial comparing group A with B. The difference of WWL scores was statistically significant.

A グループの方が WWL スコアが小さい。以上のように NASA-TLX の 5 回目の実験走行の結果から、A グループの方がメンタルワークロードが小さく、提案する仮想空間を共有する操縦支援システムを利用することで操縦性は改善できたと言える。

5.3 実験走行毎のメンタルワークロードの変化

WWL スコアを構成する 6 つの評価尺度を積み上げ棒グラフで表現し、各試行回数で表示したグラフを図 18 に示す。このグラフは図 15 の内訳を示している。特に A グループでは、利用者は注目する点を認識しそれを達成する適切な操作を習熟することで、作業成績 (OP) だけでなく、知的・知覚的要求 (MD) が大きく減少したと思われる。また、精緻な作業であるが故にそれに付随するフラストレーション (FR) も同様に激減している。他方、B グループでは主に作業成績 (OP) の減少が漸減しているが、努力 (EF) や他の項目はほとんど減少していない。

図中の折れ線は WWL スコアの平均値を示すが、A、B グループとも 1 回目のスコアはほぼ同程度であるが、A グループでは 2 回目の試行にかけて大きく WWL スコアが 51.83 まで激減している。この値は、B グループの 5 回目のスコア 53.73 より小さい。なお、この後 A グループの 2 回目以降の数値は減り続け、5 回目にはスコアは 43.27 まで減少している。第 4 章の実験では、A グループでは 5 回の試走でほぼ全員が走行できるようになっており、この実験では WWL スコア 43 程度で操縦は上達したと言える。B グループでは、WWL スコアの変化は少なくあまり上達していない。

最後に、ほぼ同じ成功率で WWL スコアも同程度である A グループの 2 回目と B グループの 5 回目の WWL スコアの比率を比較する。A グループは、フラストレーション (FR) は大きいが努力 (EF) は小さく、方法はわかるがうまく操縦できないような状況である。これに対して B グループは、作業成績 (OP) と努力 (EF) が大きく、練習の必要性は認識しているが上達していない状況である。このように、提案するトレーニングシステムの効果は、初心者の段階で比較的速く操縦を上達できる点にあるが、この効果は試行毎のメンタルワークロードの評価からも裏付けられた。

Fig. 18 Six rating scales that make up WWL score. In group A, the decrease in WWL score is affected by OP principally, but it is also affected by the MD and FR. On the other hand, OP is gradually reduced, but the other items aren't small in group B.

6. お わ り に

本論文では、初心者を対象に仮想隊列を使った福祉車両の操縦支援システムのトレーニングシステムを提案した。また、MR を用いて仮想障害物や理想経路などの仮想オブジェクトの自動表示を行い、操縦支援システムの上達過程を NASA-TLX を使って評価した。Miracast を使用して利用者の HMD の画面をインストラクタと共有し、実験の際にインストラクタからアドバイスを行った。ゴールへの到達は、従来の仮想隊列制御を使った支援システムに比して、仮想オブジェクトを用いた提案システムを利用の方が操縦ミスも少なく、成功回数の差は有意であることがわかった。

提案する仮想空間を共有した操縦支援システムを利用し、インストラクタと仮想環境を共有するトレーニング

システムを用いると、初心者は高い習熟効果を得ることができることを示した。今回の実験で作業成績を向上させるポイントは、利用者に注目する点を明示し、それを達成する適切な操作指示を与えることであると考えられる。初心者の失敗の多くは、障害物との距離感と操舵のタイミングのずれが原因と考えられるが、提案手法では、具体的にタイムリーな指導ができた点が短期での上達を可能にしている。今回、利用者の上達するプロセスを NASA-TLX を使って分析した知見は、MR を用いたトレーニングシステムの構築に役立つものと考えられる。

本実験では被験者は若い健常者を対象としているが、仮想オブジェクトを使った場合の操縦の上達において顕著な結果がでた。高齢者のグループに本研究の結果を単純に当てはめる事はできないが、健常者の初心者の上達過程が今後の高齢者のシステム構築のヒントとなると考えている。本実験では尺度の説明をしながら一対比較や VAS による評価をパソコン上で行うために評価に時間がかかり、被験者に大きな負荷がかかった。高齢者を対象にした実験と効果検証および実用化は今後の課題である。

文 献

- 安藤宏宏, 電動車いす型ロボットの利便性と安全性に関する検証, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.8 (2015), pp.583–586.
- 朝尾隆文, 和田孝広, 自動車運転におけるワークロードと安全, 計測と制御, Vol.45, No.8 (2006), pp.671–676.
- Blokdyk,G., Mixed reality, third edition, 5STARCooks (2018).
- Blokdyk,G., Microsoft HoloLens a complete guide - 2020 edition, 5STARCooks (2021).
- Carmigniani,J. and Furht,B., Augmented reality : an overview, handbook of augmented reality, Springer (2011), pp.3–46.
- 大門樹, 大前学, 田容旭, 岡野清紀, 小型電動自動車および電動車椅子の自動運転/遠隔操縦運転における乗員の視線・不安感に関する研究, モバイル学会, Vol.1, No.1 (2011), pp. 63–68.
- Devigne,L., Babel,M., Nouviale,F., Narayanan,V.K., Pasteau,F. and Philippe G., Design of an immersive simulator for assisted power wheelchair driving, Proceedings of International Conference on Rehabilitation Robotics (2017) , pp.995-1000, DOI: 10.1109/ICORR.2017.8009379.
- Felicia,P., Unity from zero to proficiency, Independently published (2019).
- Gabriele,W., Attention and motor skill learning, Human Kinetics (2007).
- 芳賀繁, 水上直樹, 日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定-各種室内実験課題の困難度に対するワークロード得点の感度-, 日本人間工学会, Vol.32, No.2 (1996), pp.71–79.
- 芳賀繁, メンタルワークロードの理論と測定, 日本出版サービス (2001).
- Hamilton,R.F., Hernandez-Ossaa,A., Longo,B. and Bastos,T., Evaluation of task workload and intrinsic motivation in a virtual reality simulator of electric-powered wheelchairs, Procedia Computer Science, Elsevier, Vol.160 (2019), pp. 641–646, DOI:10.1016/j.procs.2019.11.034.
- John,N.W., Pop,S.R., Day,T.W., Ritsos,P.D. and Headleand,C.J., The Implementation and validation of a virtual environment for training powered wheelchair maneuvers, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.24 , Issue.5 (2018), pp.1867–1878.
- 梶川忠彦, 有賀義之, 大石遊, 染谷栄一, ドライバ行動変容分析を用いた運転支援システムの負荷低減効果に関する考察, 自動車技術秋季大会学術講演集, 20206076 (2020), pp.1–6.
- Kimura,R., Matsunaga,N., Okajima,H. and Kotaki,G., Design of virtual platoon control system using augmented reality to assist welfare vehicle users, Proceeding of 17th International Conference on Control, Automation and Systems (2017), DOI:10.23919/SICE.2017.8105516.
- 松本吉央, 人の移動を支援するビジョン技術-車いすのビジョン-, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 6 (2009), pp.608–612.
- 松永信智, 木村亮太, 岡島寛, Mixed Reality を用いた仮想隊列走行制御による福祉用パーソナルビークルの操縦支援システム, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.872 (2018) , DOI:10.1299/transjsme.18-00479.
- 松永信智, 岡島寛, MR を使った福祉車両の運転支援システム, システム/制御/情報, Vol.65, No.9 (2021), pp.364–369.
- 三宅晋司, メンタルワークロードの計測と解析-NASA-TLX 再考-, 日本人間工学会, Vol.51, No.6 (2015), pp.391–398.
- 森棟公夫, 照井伸彦, 中川 満, 西埜 晴久, 黒住 英司, 統計学 改訂版, 有斐閣 (2015).

- NASA software, NASA Task Load Index (TLX), available from < <https://software.nasa.gov/software/ARC-15150-1A>, >, (参照日 2021 年 6 月 1 日).
- Okajima,H., Umei,H., Matsunaga,N. and Asai,T., A design method of compensator to minimize model error, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol.6, No.4 (2013), pp.267–275.
- Oliveira,L.C., Soares,A.B., Cardoso,A., Andrade,A.O. and Lamounier Jr,E.A., Mobile augmented reality enhances indoor navigation for wheelchair users, *Research Biomedical Engineering*, Vol.32, No.2 (2016), pp.111–122.
- 鈴木征一郎, 小枝正直, 松本吉央, 小笠原司, 拡張現実感を用いた車いす搭乗者へのナビゲーション情報提示システム, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3I33 (2003).
- Takeuchi,Y., Matasunaga,N. and Okajima,H., Driving instruction and training of welfare vehicle controlled by virtual platoon scheme using sharing system of AR, *Proceedings of Robotics and mechatronics, 19th International Conference on Control, Automation and Systems* (2019), DOI: 10.23919/ICCAS47443.2019.8971764.
- 瀧本敦朗, 新妻実保子, 簡便な方向指示に基づく知的電動車いすナビゲーション, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2013, 1A1-M06 (2013).
- 上松弘幸, 今岡紀章, グエンジュイヒン, 笹井裕之, 北澤一磨, 安藤健, 自動停止機能・自律移動機能を有するロボット電單車いす, *Panasonic Technical Journal*, Vol.64, No. 1 (2018), pp.60–65.
- 和田正義, 4 輪駆動式電動車椅子の設計と全方向移動制御, *日本ロボット学会誌*, Vol.27, No.3 (2009), pp. 314–324.
- Wi-Fi Alliance, Miracast, available from < <https://www.wi-fi.org/ja/discover-wi-fi/miracast> >, (参照日 2021 年 6 月 1 日).
- Zengin,A.T., Maruno,T., Okajima,H., Matsunaga,N. and Nakamura,N., Maneuverability improvement of front drive type electric wheelchair STAVi, *Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol.6, No.6 (2013), pp.419–426.

References

- Ando,M., Verification of safety and convenience for person carrier robot, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.33, No.8 (2015), pp.583-586 (in Japanese).
- Asao,T. and Wada,T., Workload and safety in driving, *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.45, No.8 (2006), pp.671–676 (in Japanese).
- Blokdyk,G., Mixed reality, third edition, 5STARCooks (2018).
- Blokdyk,G., Microsoft HoloLens a complete guide - 2020 edition, 5STARCooks (2021).
- Carmigniani,J. and Furht,B., Augmented reality : an overview, *handbook of augmented reality*, Springer (2011), pp.3–46.
- Daimon,T., Omae,M., Jeon,Y.W. and Okano,K., Study on driver's eye direction and feeling of anxiety on small electric car and electric wheel chair in automated driving and remote operated driving, *Journal of Mobile Interactions*, Vol.1, No.1 (2011), pp. 63–68 (in Japanese).
- Devigne,L., Babel,M., Nouviale,F., Narayanan,V.K., Pasteau,F. and Philippe,G., Design of an immersive simulator for assisted power wheelchair driving, *Proceedings of International Conference on Rehabilitation Robotics* (2017) , pp.995-1000, DOI:10.1109/ICORR.2017.8009379.
- Felicia,P., Unity from zero to proficiency, Independently published (2019).
- Gabriele,W., Attention and motor skill learning, *Human Kinetics* (2007).
- Haga,S. and Mizukami,N., Japanese version of NASA task load index: sensitivity of its workload score to difficulty of three different laboratory tasks, *Journal of Japan Human Factors and Ergonomics Society*, Vol.32, No.2 (1996), pp.71–79 (in Japanese).
- Haga,S., Mental workload theory and measurement, Japan publishing service (2001) (in Japanese).
- Hamilton,R.F., Hernandez-Ossaa,A., Longo,B. and Bastos,T., Evaluation of task workload and intrinsic motivation in a virtual reality simulator of electric-powered wheelchairs, *Procedia Computer Science*, Elsevier, Vol.160 (2019) pp. 641–646, DOI:10.1016/j.procs.2019.11.034.
- John,N.W., Pop,S.R., Day,T.W., Ritsos,P.D. and Headleand,C.J.,The Implementation and validation of a virtual environment for training powered wheelchair maneuvers, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.24 , Issue.5 (2018), pp.1867–1878.

- Kajikawa,T., Ariga,Y., Oishi,Y. and Someya,E., A Study on the driver workload reduction effect of a driving support system by analyzing driver behavior change, Proceedings of Fall Annular Conference of Automotive Engineers, 20206076 (2029), pp.1–6 (in Japanese).
- Kimura,R., Matsunaga,N., Okajima,H. and Kotaki,G., Design of virtual platoon control system using augmented reality to assist welfare vehicle users, Proceeding of 17th International Conference on Control, Automation and Systems (2017), DOI:10.23919/SICE.2017.8105516.
- Matsumoto,Y., Vision for mobility assistance, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 27 No. 6 (2009), pp.608–612 (in Japanese).
- Matsunaga,N., Kimura,R. and Okajima,H., Driving assistance system for welfare vehicle with virtual platoon control using mixed reality, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 85, No. 872 (2018) , DOI:10.1299/transjsme.18-00479.
- Matsunaga,N. and Okajima,H., Driving assistance of welfare vehicle using MR, System Control and Information, Vol.65, No.9 (2021), pp.364–369 (in Japanese).
- Miyake,S., Mental workload assessment and analysis -a reconsideration of the NASA-TLX, Journal of Japan Human Factors and Ergonomics Society, Vol.51, No.6 (2015), pp.391–398 (in Japanese).
- Morimune,K., Terui,N., Nakagawa,M., Nishino,H. and Kurozumi,E., Statistics, Yuhikaku Publishing (2015) (in Japanese).
- NASA software, NASA Task Load Index (TLX), available from < <https://software.nasa.gov/software/ARC-15150-1A> > , (accessed on 1 June, 2021) .
- Okajima,H., Umei,H., Matsunaga,N. and Asai,T., A design method of compensator to minimize model error, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.6, No.4 (2013), pp.267–275.
- Oliveira,L.C., Soares,A.B., Cardoso,A., Andrade,A.O. and Lamounier Jr,E.A., Mobile augmented reality enhances indoor navigation for wheelchair users, Research Biomedical Engineering, Vol.32, No.2 (2016), pp.111–122 .
- Suzuki,S., Koeda,M., Matsumoto,Y. and Ogasawara,T., Navigation System for Wheelchair User using AR Technology, The Annual Conference of the Robotics Society of Japan, 3I33 (2003) (in Japanese).
- Takeuchi,Y., Matsunaga,N. and Okajima,H., Driving instruction and training of welfare vehicle controlled by virtual platoon scheme using sharing system of AR, Proceedings of Robotics and mechatronics, 19th International Conference on Control, Automation and Systems (2019), DOI: 10.23919/ICCAS47443.2019.8971764.
- Takimoto,A. and Niitsuma,M., Smart electric wheelchair navigation based on direction input from human, Proceedings of Robotics and mechatronics, 2013, 1A1-M06 (2013) (in Japanese).
- Uematsu,H., Imaoka,N., Nguyen,D., Sasai,H., Kitazawa,K. and Ando,T., Robotic personal mobility based on automatic braking and autonomous movement technology, Panasonic Technical Journal, Vol.64, No.1(2018), pp.60–65 (in Japanese).
- Wada,M., Omnidirectional motion control and prototyping of a four-wheel-drive electric wheelchair, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.27, No.3 (2009), pp. 314–324 (in Japanese).
- Wi-Fi Alliance, Miracast, available from < <https://www.wi-fi.org/ja/discover-wi-fi/miracast> > , (accessed on 1 June, 2021).
- Zengin,A.T., Maruno,T., Okajima,H., Matsunaga,N. and Nakamura,N., Maneuverability improvement of front drive type electric wheelchair STAVi, Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.6, No.6 (2013), pp.419–426.