T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	協調学習操作系を用いたハンズフリーモビリティの協調学習機能の有効性評価
Title(English)	Evaluation of Cooperative Learning Operation System for Hands-free Mobility
著者(和文)	呂超, 西脇佑理, 菅原雄介, 二瓶美里
Authors(English)	Chao Lyu, Yuri Nishiwaki, Yusuke Sugahara, Misato Nihei
出典(和文)	LIFE2020-2021講演論文集,
発行日 / Pub. date	2021, 9

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

協調学習操作系を用いた

ハンズフリーモビリティの協調学習機能の有効性評価

Evaluation of Cooperative Learning Operation System for Hands-free Mobility

○ 呂　超（東京大）　西脇　佑理（東京大）　菅原　雄介（東工大）　二瓶　美里（東京大）

Chao LYU(UTokyo), Yuri Nishiwaki(UTokyo), Yusuke SUGAHARA(Tokyo Tech),
Misato NIHEI(Utokyo),

Abstract: Although the human-machine cooperative learning operation system which assists the user in learning the motor learning ability and the stage of motor learning when operating a non-holonomic vehicle such as an electric wheelchair, it has been proved to be effective, but the cause of the elder's improved performance in motor learning of this operating system has not been paid attention to. In this research, we hope to improve the existing operating system, by using these factors. We hope to improve the operability and accuracy of the existing system, making it more suitable for the elderly.

Key Words: Personal Mobility Vehicle, Machine Learning, Operation System, Evaluation

1. 緒言

近年，加齢に伴う機能低下による健康障害に陥りやすくなる状態であるフレイル [1]や，筋力や筋量の減少するサルコペニア [2]への予防的介入が注目されている．特に，歩行に関わる下肢機能は加齢による影響を受けやすいことから，機能低下により移動支援機器を使用することがあるが，それによるさらなる機能低下が懸念される．また，移動支援機器は一般的にはハンドルやジョイスティックなどの手指による操作が用いられるが，それにより上肢動作が制限される [3]ことが前提となっている．

そこで，筆者らは歩行機能を維持・改善するハンズフリーモビリティ（図 1)」を提案した [4]．この乗り物は端座位で乗車する小型モビリティであり，以下の 2 点をコンセプトとする．

A) 上肢による操作を必要とせず，操作をペダリング動作及び上体の運動によって行う「ハンズフリー」操作である

B) ペダリング動作を通じて歩行機能改善のために適切で持続可能な運動負荷を搭乗者に与える

B)については，歩行機能改善に有効な運動負荷を与える楕円軌道ペダル機構と負荷パターンの同時最適化に関する設計を行ってきた [5][6]．

著者らは，A) を実現するために，ハンズフリーモビリティを操作するための操作者の操作意図を抽出する力学系学習木を用いた操作系の原理モデルの開発を行った．この操作系は，複数のセンサを用いて搭乗者の挙動から操作意図を抽出し，力学系学習木を用いることで個人特性に合わせて車両の直進と旋回運動の性能を自動的に調整できる機能を有する [7]．さらにジョイスティック操作による操作学習をアシストする協調学習操作系の開発と評価を行った [8]．ハンズフリーモビリティの協調学習操作系の提案と VR 空間での評価やジョイスティック入力による評価検証が行われたが，移動支援機器の実機における協調学習システムの有効性の検証は行われていない．

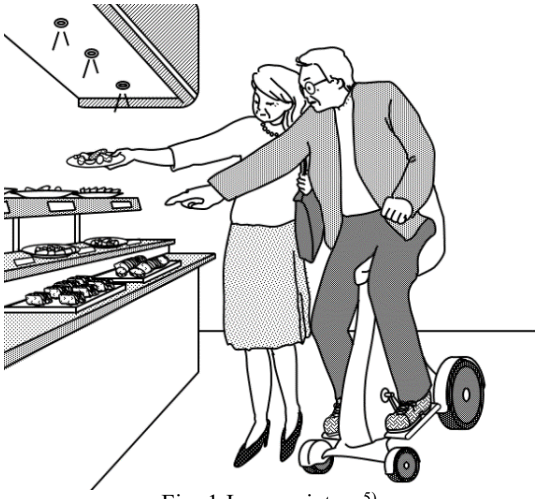


Fig. 1 Image picture[5]

以上より，本研究では人―機械協調学習操作系の実機実装と有効性の検証を目的とする．具体的には，(1)人－機械協調学習操作系の開発，(2)協調学習操作系の有効性の評価として，①個人の車両イメージを考慮した機能，②走協調学習機能について，走破時間および逸脱度によって評価を行う．

2. 開発したハンズフリーモビリティ PeriPa02

2-1. 機能と構造

図 2 に開発したハンズフリーモビリティ PeriPa02 を示す．このモビリティは，後輪駆動・前輪は受動オムニホイールの 4 輪構成で，サドルとペダル，ペダルに負荷を与える負荷装置により構成される．システム構成を図 3 に示す．

ハンズフリー操作を実現するために，車両とヒトとのインタフェース部分にあたる足部―ペダル部と臀部―サドル部に 6 軸力センサ（レプトリノ社 FFS055YS102U6（左右ペダル），FS080YS102U6（サドル））を配置し，ペダルの回転数を測定するロータリエンコーダ（Cadence E 38S-4096-2MD）を取り付けた．車両の目標速度はペダルの回転数から算出し，旋回角速度は学習器を用いて 3 個の 6 軸力センサにより求めた．学習器の詳細は後述する．また，速度と旋回角速度の出力はシリアル通信で車両コントローラへ送信され車両が制御される．ベース車両には WHILL（Model CR）[9]を用いた．また，ペダルに負荷を与える負荷装置は，シャフトドライブ機構を用いて歯車と伝動軸を通じでその先端にパウダブレーキを取り付けることで 12～60[w]の負荷増幅を行うこととした．

Fig. 2 Hands free mobility PeriPa prototype-02

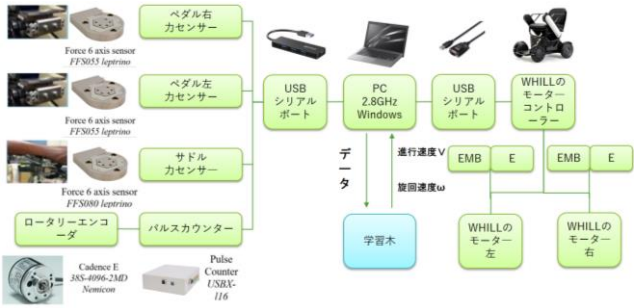


Fig. 3 The control system of Hands free mobility

2-2. 車両の操作と学習器を用いた旋回個人特性の学習

(1) 車両の操作とその手法

本研究では，先行研究と同様に，左右のペダル部とサドル部にかかる力やモーメントから，操作者が移動体に対して行わせようとしている運動（本研究ではこれを車両イメージより得られる内部モデルと呼ぶ）を推定する方法を用いた．

開発する移動体は入力動作と移動体の運動が直接接続されているわけではないため，乗車する人のイメージ次第で内部モデルが異なってくるという特徴を持つ．このため，移動体の操作系については操作者が移動体の操作学習を行う中で，移動体側も操作者の特性を学習するような学習器を備えていることが望ましい．ペダリング動作から移動体の進行動作や旋回動作に必要となる速度や角速度の推定を行わなくてはならないため，入出力共に連続値を扱える学習器として力学系学習器 [4]を用いる．

力学系学習器では小型船舶の速度状況から加速度の推定を行うことができるものの，小型船舶の旋回性はパーソナルモビリティよりも低いため，直進性と旋回性の対立が生じうる．このため，直進性と旋回性を両立できるような学習アルゴリズムを備えている必要があると考えられる．

(2) 本研究で用いる学習器

本研究では，先行研究で用いた DBT（Dynamic Tree）の後継種である逐次学習の機能も備えた高精度エッジ AI アルゴリズム MST（Memory Saving Tree）（AISing 社製）モジュールを用いた．MST は大規模な計算環境が必要な深層学習とは異なり，導入機器単体がクラウド接続を必要とせず，リアルタイムにエッジ側で学習・予測することが可能なモジュールである．学習済みモデルを利用して推論するだけではなく，マイコン上で学習を行ってモデルを更新することが可能なため，運動の変化に追従する追加学習が可能である特徴を持つ．本研究では図 5 のように，実験参加者の操作ごとに生じた予測誤差（車両の進行方向とゴール地点になす動的角度）を学習した．

(3) 入力パラメータ

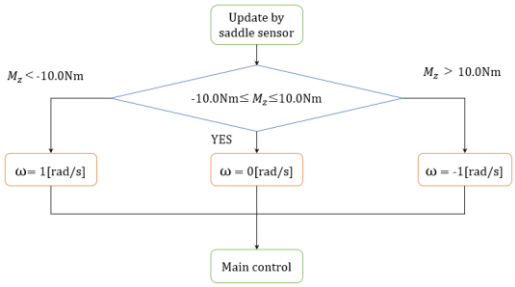


Fig. 4 Algorithm of stand system

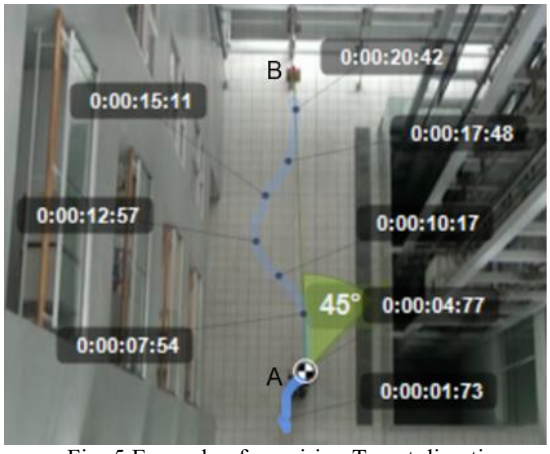


Fig. 5 Example of acquiring Target direction

入力パラメータは，先行研究に基づき旋回動作戦略の 4 パターン（回旋動作型，側屈動作型，左／右ペダル踏み込み型）を包含する 6 のパラメータを採用した．

2-3. 初期設定と追加学習

(1) 初期設定

初期設定は，初めて車両を操作する際のセンサ値と旋回角速度の対応付けのための設定のことである．初期設定をしない場合，手がかりが少なく初回の挙動が非常に不安定になることが考えられたため，次の手順で初期設定を行う．1 回目の走行開始前に車両が停止した状態で指示した 3 方向（正面，左方向 60°，右方向 60°）に進むことを意識して操作してもらい，その際のセンサ値から，MST を用いて個人モデルの学習を行うことで設定する．

(2) 追加学習

追加学習は，ある一定期間の走行において目標値（目標角度）と実際に車両が走行した旋回角度の誤差を用いて，旋回角速度を修正する学習のことである．本研究では，1 試走ごとに MST を用いて追加学習を行う．また，追加学習に必要な目的変数，すなわち，目標方向は，車両の位置 A と目標地点 B となす線分 AB と車両の向きのなす角 θ(＝45°(図中例))を後述の画像処理ソフト（Kinovea）を用いて抽出し（図 5），車両の走行ログのタイミングに合わせて学習データとして用いることとした．

3. 有効性の評価手法

3-1. 評価の目的

本研究では，協調学習機能の有効性を検証するために，個人の特性を反映した初期設定の機能と人の学習能力に応じた追加学習の観点から，次の 3 種類の機能の比較を行い，3)に実装する個人の特性に合わせた追加学習を行う機能が有効であることを示すことを目的とした．

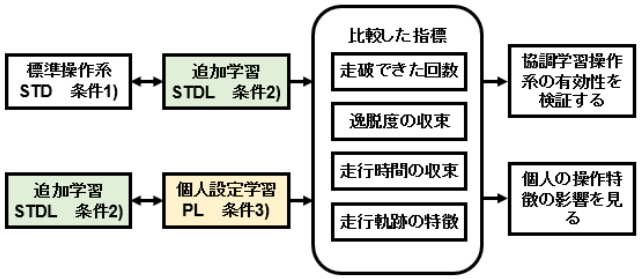


Fig. 6 Comparison and conclusion of each condition

1）　標準操作機能(STDF: Standard Function)

本研究では，協調学習機能との比較対照として初期設定値および旋回角速度の設定が予め決められている標準操作機能を有する操作系を準備した．標準操作機能は，先行研究 [4]で抽出された旋回動作戦略の一つである側屈動作型（左右に身体を側屈させる方法）とし，サドルに掛かる代表的な力である z 軸（搭乗者の上体質量中心における軸）周りのモーメント M_z と旋回閾値を用いることとした．図 4 に標準操作機能の基本的なアルゴリズムを示す．なお，旋回閾値は，実験により試行錯誤的に決定した．

2）　追加学習操作機能(SLF: Sequential Learning Function)

初期設定値が個人に特性によらない方法で，予め決められており，追加学習のみを行う操作機能

3）　個人設定追加学習操作機能(PSLF: Personal Sequential Personal Learning Function)

初期設定値を個人の特性に合わせ，かつ追加学習を行う操作機能

3-2. 評価方法

先行研究 [5]では，VR 環境において A 地点から B 地点への直線と曲線を含む S 字型走路を 8 回施行し，「走行時間」，「逸脱度」，「走行軌跡」の 3 つの評価指標を用いて評価した．本研究における実環境も同指標を用いて試走実験を評価する．ただし，実環境の場合は S 字型走路ではある地点における目標点が一つに定まらないこと，評価が複雑になることが考えられたため，10m の走行路を直進する課題を行うこととした．

3-3. 評価指標の算出方法

(1) 走行時間

A 地点から B 地点までの走行時間を測定する．但し，途中で走路に 2 分以上戻れなかった場合には，その地点で走行実験を終了とした．

(2) 逸脱度

A 地点から B 地点までの直進走路に対して，どれだけ逸脱したかを測定する指標である．逸脱度 D は式(1)で表される．

$$D = \int |f(z) - f_c(z)|\, dz \qquad (1)$$

ここで $f(z)$ は，目標ルートの時間 t[s]における z 座標，$f_c(z)$ は t[s]における走行軌跡の z 座標である．

(3) 走行軌跡

先行研究では，VR 空間上で実験を行ったため，その走行軌跡は空間上の既知の座標系で表現することができた．しかし，実場面における走行では，それらの値が得られないため，次の方法で取得した．

走路上方から撮影したビデオカメラの映像を用いて，走行軌跡を取得する．図 7 に示すように，カメラは走路上 27m の位置に設置し，走行ルート全体が入るように角度調整した．図 8 に右図に示す規定走路を走行する予備実験の様子を示す．撮像した結果は，画像処理ソフト（Kinovea）を用いて搭乗者の頭部を自動検出・追従することで，走行軌跡を算出した．

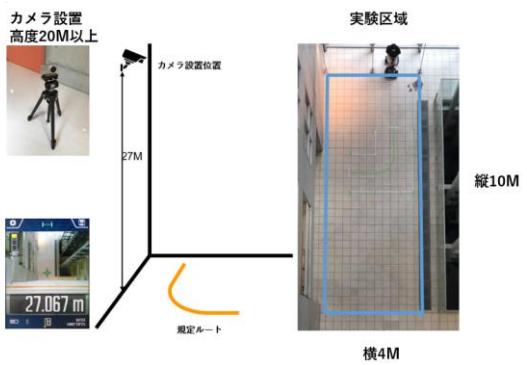


Fig. 7 Setting of camera and course trail

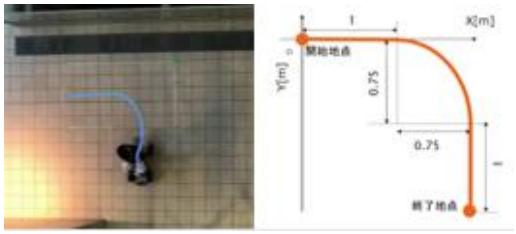


Fig. 8 Details of running log and course trail

予備実験の結果から，操作時の頭部のブレなどが走行軌跡に大きな影響を与えないこと，逸脱度を算出するのに十分な精度が得られることを確認した．

3-4. 評価実験方法

走行課題は前述のとおり 10m の直進路をできるだけ早く正確に走行する課題である．実験は条件 1)の標準操作系での走行実験を行い，次に 2)の追加学習操作系－個人設定追加学習操作系を実施するグループ A（3 名），または 3)の個人設定追加学習操作系－追加学習操作系を実施するグループ B（3 名）の 2 つに分けて実施した．各機能の内容や効果については被験者に伝えていない．なお，条件 1)の後にはキャリーオーバー効果を考慮し 2 週間のウォッシュアウト期間を設けた．但し，条件 2)と条件 3)の間には都合上ウォッシュアウト期間は設けなかった．また，試走行は各条件において 8 回行った．

4. 有効性の評価手法の結果・考察

4-1. 有効性の評価結果

図 9 に各被験者の各条件における 8 回の走行時間および逸脱度の結果を示す．被験者 A,G,I は，条件 1)STDF の 1 回目の結果が他の条件より低かった．また，被験者 B を除いた被験者は 8 回目までに走行時間および逸脱度の収束する傾向がみられた．

(1) 追加学習の効果

追加学習の効果を調べるために，条件 1)STDF と条件 2)SLF の走破状況を確認した．図 9 の各回のプロットがない部分が走破できなかった回である．走破条件 1)STDF において走破できなかった回数は 8/48 回(16.7%), 2)SLF においては 1/48 回(2.08%)であった．

次に，走行時間及び逸脱度の指標について，何回目の走行で収束したかを調べた．その結果，走行時間については A，D，I については両条件同じで，C，E，G については条

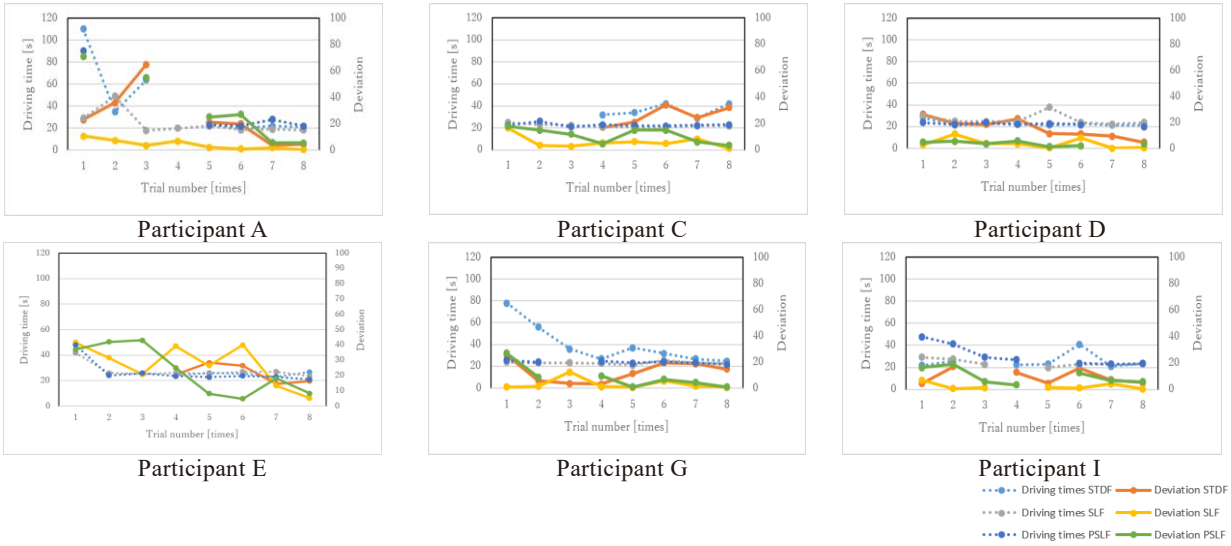
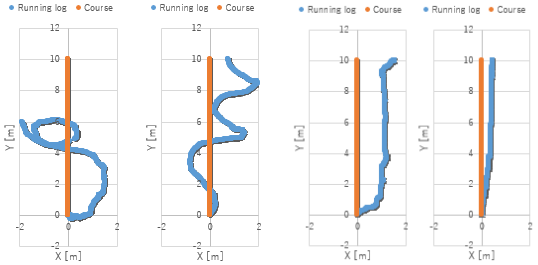


Fig. 9 The results of each participant's driving time and deviation level



(a) STD Trail 1,8　　(b) SLF Trail 1,8

Fig. 10 Change in running log by STDF, SLF (E)

件 2)SLF の方が速く収束することが確認できた．特に条件 1)STD については C と E は収束後発散する傾向が認められた．逸脱度については，A，C，D，G については条件 2)SLF の方が小さく，E，I についても両条件に差は認められなかった．

1 回目と 8 回目の走行軌跡を確認したところ，すべての条件において 1)STDF より 2)SLF の方が蛇行が少なく，直進性が高いことが示された．図 10 に被験者 E の結果を示す．STDF では蛇行して 1 回目は走破できず，8 回目でも蛇行が見られた．一方，SLF では 1 回目はやや右に逸れたものの，8 回目ではほぼ基準軌跡上を走行する結果となった．

以上より，追加学習が有効である可能性が示された．

(2) 個人初期の効果

個人に合わせた初期設定が走行に与える効果を調べるため，条件 2)SLF と条件 3)PSLF の結果を比較した．両条件における走行時間，逸脱度の指標が何回目の走行で収束したかを調べた．その結果，走行時間については 6 人中 3 人(被験者 C，E，I)が条件 2)SLF より条件 3)PSLF の方が，収束が早いことがわかった．また，逸脱度については，6 人中 4 人（被験者 C，D，E，G）は条件 2)SLF の方が早く収束したが，被験者 A は条件 2)SLF の方が，収束が早かった．

また，第 8 走行の走行時間，逸脱度の比較を行った．その結果，平均時間は条件 2)SLF で 22.15±1.89[s]，条件 3)PL で 21.81±1.26[s]であり，有意な差は認められなかった．一方で，逸脱度については，条件 2)SLF が平均 2.65±2.46，条件 3)PL が平均 4.63±2.3 と，PL の方が大きい結果となった．ただし，1 回目の走行での逸脱度が 90 を超える被験者もいたことから，相対的に見ると十分小さいことが示された．

以上の結果から，追加学習の有効性が示された．一方で，特定な条件の下において個人初期設定の有効性が示された．

5. 結論

本研究ではハンズフリーモビリティの協調学習操作系において，追加学習機能が操作習得に有効である可能性が示された．また，個人に合わせる初期設定は，追加学習下においては大きな効果が見込めないが，不慣れな操作系を始めて操作することが前提にした場合において有効で可能性が示唆された．今後は被験者数の増加と高齢者を対象とした評価実験を行う予定である。

謝辞

本研究は，科研費 17H 02131 の助成を受けて実施した．また，本研究の遂行にあたり WHILL Inc. 白井一充氏，東京大学大学院新領域創成科学研究科特任助教吉武宏氏にご協力いただいた．ここに謝意を示す．

参考文献

1) 荒井，フレイルの意義，日老医誌 51：497—501, 2014.
2) Evans WJ, Campbell WW: Sarcopenia and age-related changes in body composition and functional capacity. J Nutr 123(2 Suppl): 465-468,1993.
3) 二瓶他，重度障害児の発達を促す電動車いすの開発，バイオメカニズム，Vol.20, pp.99-109,2010.
4) 二瓶他，高齢者向けハンズフリー下肢操作式モビリティの提案(開発コンセプト)，ROBOMEC2018, 2018.
5) 島他，高齢者向け下肢捜査指揮モビリティにおける歩行機能改善に有効な負荷を与えるペダリングシステムの開発，第 18 回日本機械学会機素潤滑設計部門講演会論文集，133-134,2018.
6) 菅原他，高齢者向けハンズフリーモビリティのためのペダリング運動負荷システム，LIFE2019，212-216, 2019.
7) 佐久間他，高齢者向け上肢フリー移動体のための下肢動作を活用した操作手法の開発, SI 2017, 2017.
8) 西畑他，力学系学習木を用いたノンホロノミック車両のための人－機械協調学習操作系の開発 人の運動学習段階や学習能力に適応したシステムの提案, SI 2019, 2019.
9) WHILL MODEL CR https://whill.inc/jp/model-cr（2021.8.10 参照）