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)	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―
Title(English)	Development of human-machine cooperative learning operation system for nonholonomic vehicles using dynamical learning trees
著者(和文)	西畑智道, 二瓶美里, 鎌田実, 菅原雄介, 松浦大輔, 武田行生, 金天海, 遠藤央
Authors(English)	Tomomichi Nishihata, Misato Nihei, Minoru Kamata, Yusuke Sugahara, Daisuke Matsuura, Yukio Takeda, Chyon Hae Kim, Mitsuru Endo
出典(和文)	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予稿集, , , pp. 2212-2215
Citation(English)	, , , pp. 2212-2215
発行日 / Pub. date	2019, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2019 The Society of Instrument and Control Engineers

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

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—

○西畑 智道（東大），二瓶 美里（東大），鎌田 実（東大），菅原 雄介（東工大），松浦 大輔（東工大），武田 行生（東工大），金 天海（岩手大），遠藤 央（日大）

Development of human-machine cooperative learning operation system for nonholonomic vehicles using dynamical learning trees

○Tomomichi NISHIHATA, and Misato NIHEI, Minoru KAMATA, Yusuke SUGAHARA, Daisuke MATSUURA, Yukio TAKEDA, Chyon Hae KIM, Mitsuru ENDO

Abstract: Operation of a movement support device such as an electric wheelchair may be difficult to learn due to aging or a decrease in psychosomatic function. For this reason, there is a need for an operation system for a movement support device that can smoothly perform operation learning in a short period even for various users including elderly people who have problems in operation learning. In this report, in order to use as a foothold for the development of a human-machine collaborative learning operation system that has a learning algorithm adapted to the human learning stage and learning ability, we conducted an experiment to select indicators of human learning stage and degree and to investigate the validity of the indicators in the collaborative learning operation system. As a result, at least one of the selected indicators met the requirements in the comparison of the proficiency of operation under the two conditions of ①30 degree, 45 degree visual rotation disturbance, ②30 ± 10cos (t / 2) degree, 30 ± 10cos (2t) degree visual rotation disturbance during human-only operation learning.

１．緒言

電動車椅子などの移動支援機器を操作するには，ジョイスティックやハンドルを用いた操作が一般的だが，上肢に障害がある場合や他の身体部位などを操作に使用したい者も存在する．こうした上肢以外の部位を用いて操作する場合には操作対象と移動体の動きの関係，すなわち内部モデルを新たに獲得・学習する必要がある．また，新しい移動体に乗る場合においても，操作部と車両運動の関係性，すなわち内部モデルの獲得・学習が関わってくる．

内部モデルの獲得・学習のしやすさに関しては，加齢の影響があると言われており，高齢者は慣れている操作系において，課題を学習する速度は若年健常者と同様であるが，操作系に不慣れな場合，著しく学習速度が低下する[1]．また，高齢者は運動学習を保持することが苦手であることが報告されている[2].

このような人が機械等を操る場面における運動学習を促進するため，移動体の操作に限らず人の学習を支援することで，操作習得や操作能力を高める人－機械系の協調学習の手法が提案されてきた[3][4]．しかし，運動学習の習得に関する個人特性について検討されている研究は少ない．

著者らは，ペダリング動作から搭乗者の操作意図を推定するハンズフリー移動支援機器の開発を行ってきた[5]. この移動支援機器の操作性の評価において，若年健常者 3 人に 8 回の試行を行い，走破時間・逸脱度の推移を確認したところ，個人によって収束過程が異なることが明らかになった[6]. また，この要因として操作学習能力が影響することが分かった．これらのことから，人－機械系の協調学習を検討する際には，個人の運動学習能力やその段階を考慮する必要があることが分かった．

以上の背景から，本研究では電動車椅子などのノンホロノミック車両を操作する際に，人の学習能力に合わせて機械側の学習をアシストする人－機械協調学習操作系の開発を目指している．本報告では，操作系の人の運動学習段階や学習能力を評価する指標を作成することを目的とし，ジョイスティックによる操作入力の学習能力を評価する実験系の提案とその評価実験について報告する．

SY0010/19/0000 - 2212 © 2019 SICE

２．学習段階の指標

2.1 人-機械系の協調学習における人の学習段階・程度の指標

本研究で対象とする人－機械協調学習は，入力数が多次元であること，リアルタイムで評価できること，操作学習の時間的推移を把握できることが要件となる．そのため，これらの要件を満たす評価指標を決定する必要がある．

飯塚ら[7]は，学習最中における人の学習段階・程度の評価指標に関して，k 試行間の操作入力値の差と，機械学習を用いてk試行後の入力の変化量の予測値を用いて誤差関数を定義し，ニューラルネットワークの重み付けを変更する機械学習を提案した．また，後藤ら[8]は，2 リンク劣駆動マニピュレータのノンホロノミック系における人の運動学習において，強化学習の枠組みを適用した行動価値関数の指標を用いている．

前者は，多次元の入力数に拡張しリアルタイムで評価できるが，実験結果については指標と操作習熟の傾向が完全に一致していないという課題がある．後者は，操作の習熟が急激に進んだ時間を特定できる点で優れている一方，多次元の入力数に関してリアルタイムに判断することが難しいという課題がある．

また，瀧山らが提案した運動プリミティブモデル[9]は，行動価値関数を人の運動学習に適応したモデルであり，多次元の入力数に適用することが可能であることが示唆されている．しかし学習率 α_θ が操作出力 x_t の分布に依存するため，学習率に関わる時間的な忘却（例えば，高齢者は時間経過によって運動学習が著しく低下すること[10]）を表現することが困難である．

そこで，本研究では，精度よく学習状況を評価可能な運動プリミティブモデルと，学習に関わる時間的な忘却を表現することが可能な複数時定数モデルを用いて評価することとした．

運動プリミティブモデルの予測誤差を式(1)に示す．

$$\hat{e_t} = a\,exp(-bt)coscx \quad (1)$$

図 1 に示す運動プリミティブモデルにおいて，x_t は目標への角度と実際の運動方向とのずれ（運動指令），

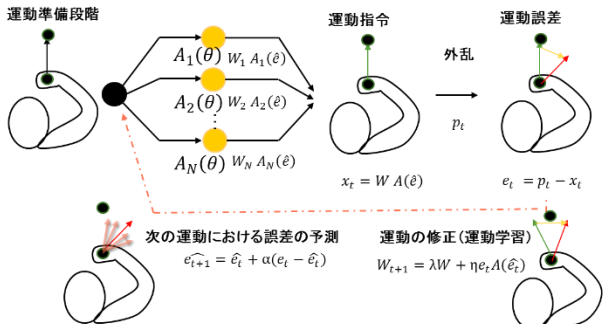


Fig. 1 The model of error prediction

Fig. 2 State of experiment

p_t は外乱，e_tは $p_t - x_t$で定義される誤差，$\hat{e_t}$ は運動開始前に予測される誤差，A(θ) は運動プリミティブ活動ベクトルである．式 (2) に示す予測誤差 $\hat{e_t}$ を減衰曲線でフィッティングを行った際の b を学習速度とし指標とした．

$$\widehat{e_{t+1}} = \hat{e_t} + \alpha_\theta(e_t - \hat{e_t}) \quad (2)$$

次に，複数時定数モデルを用いた際の記憶要素$A_k(t)$を式（3）～（5）に示す．

$$x_t = \sum_0^{10} A_k(t) \quad (3)$$

$$A_k(t+1) = \exp(T/{\tau_k}^P) * A_k(t) + \beta * e_t \quad (4)$$

$$\beta = {}^{Q}/_{{\tau_k}^P} \quad (5)$$

ここで，T は試行の時間間隔，$\exp(T/{\tau_k}^P)$ は忘却率であり，時定数 τ_k は 1 秒から 10 時間まで対数間隔で 10 の異なる値とした．また，β は学習率，P と Q は可変パラメータであり，運動指令と運動誤差の実測値からデータがモデルに一致するよう最小二乗法を用いて決定した．

2.2 実験

2.2.1 実験の目的及び方法

(1)目的：人の操作学習の状況を定量的に示すために，選定した 2 種類の指標を用いて評価を行う．

(2)方法：仮想空間（UNITY）においてノンホロノミック車両を，ジョイスティック（Spark Fun Joystick Shield）を用いて操作する試行を行う．0.5[m]先のディスプレイの表示される課題は図 2 に示すように，スタート地点から 10[m]の地点に立っているポールを目指して最短距離で走行するものである．また，画面には自車とポールの方向である目標指令方向と，操作入力によって得られた自車両が向いている方向がそれぞれ矢印で示される。またそれらのなす角は θ で表される．画面に表示される車両の動きは操作者の視点で表され，並進速度 v と角速度 ω がジョイスティック操作入力 (x_j, y_j) の 2 入力によって制御される．

通常，しばらく操作をすると，操作入力と車両の運動の関係は簡単に学習されるため，慣れさせないための工

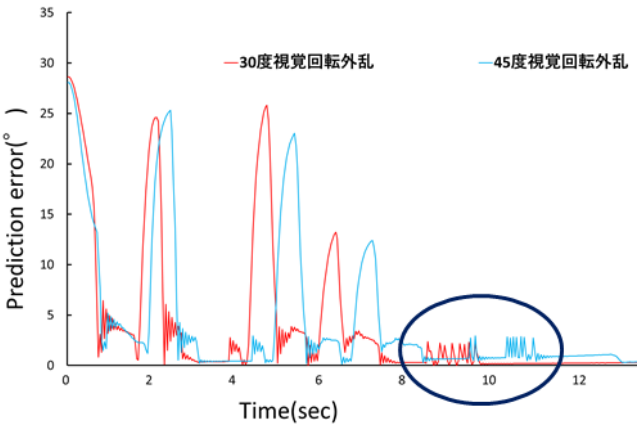


Fig. 3 Convergence of prediction error under condition ①

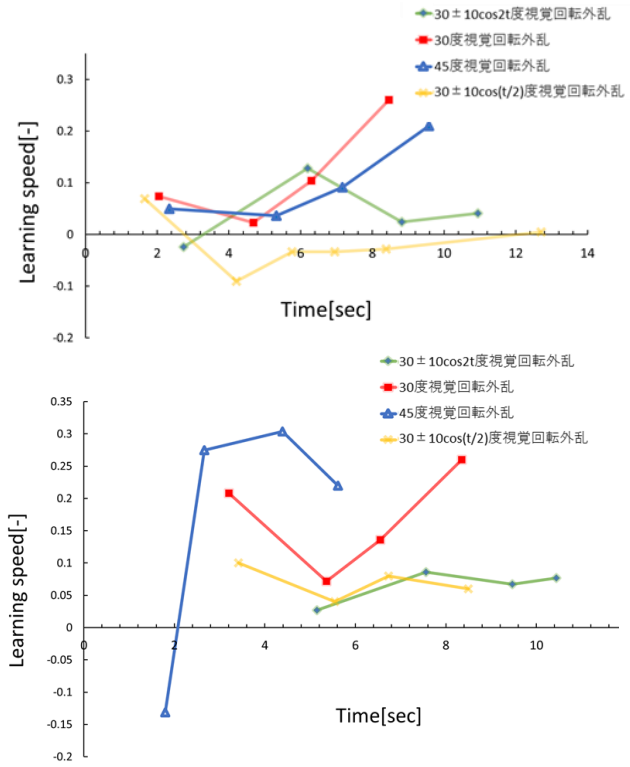


Fig. 4 Learning speed of subject A (upper) and subject B (lower) when taking the features ($coscx = \pm 1$)

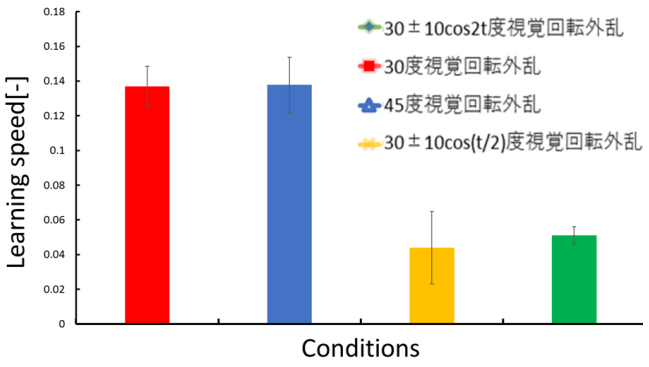
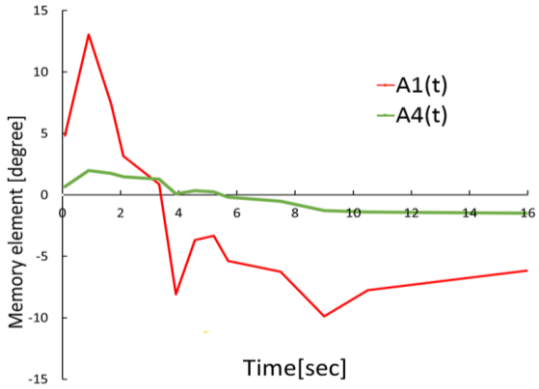
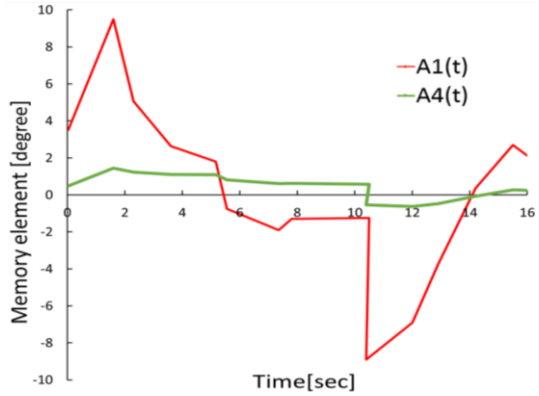


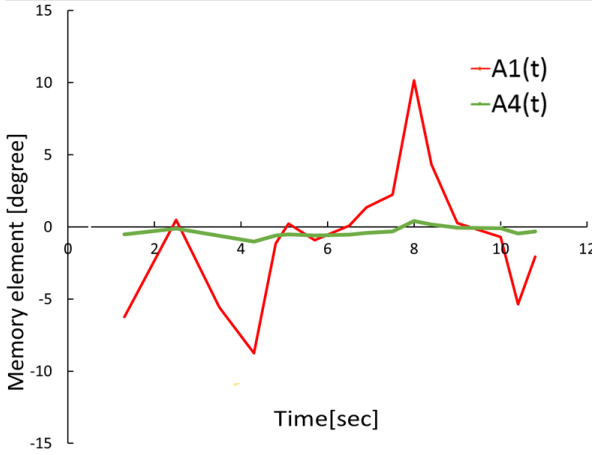
Fig. 5 Average learning speed under each condition



(a) 30 degrees visual rotation disturbance



(b) 30 ± 10cos (2t) degrees visual rotation disturbance



(c) 30 ± 10cos (t/2) degrees visual rotation disturbance

Fig. 6 Memory elements of subject A estimated by mathematical model

夫を施す必要がある．本研究では，先行研究[1][11]を参考に入力角度 θi に対して①30[deg]と 45[deg]の回転外乱，さらに習熟難易度が高いと考えられる複雑な回転②$30 + 10cos(kt)$ [deg] ($k = 0.5, 2$) を与えることで不慣れな操作系を模擬するための視覚回転外乱を与える手法を用いた．

対象は若年健常者 2 名（20 代）で，操作に慣れるために何度か走行練習を行った後に試行を実施した．試行は 2 日に分けて実施され，視覚回転外乱刺激を与え

たものと与えないものを次の順番で交互に提示した．提示順番：回転なし→30[deg]の回転→回転なし→45[deg]の回転→休憩→回転なし→$30+10cos(0.5t)$[deg]→回転なし→$30+10cos(2t)$[deg].

実験の様子を図 2 に示す.

2.2.2 実験の結果と考察

リアルタイムに学習状況の判別ができるかどうかを検討するため，式（1）における $coscx=\pm 1$ 付近の極値を取る時間において， それまでの予測誤差の推移から学習速度を算出した.

図 3 に， 参加者 A の ①30[deg]，45[deg]の視覚回転外乱の条件下の運動誤差の推移の結果を示す．参加者 A・B 共に，①条件では， 9[s]付近で運動誤差が急激に収束していたため， 習熟度合いを評価するために分析範囲を約 10[s]までとして学習速度の推移を調べた.

図 4 にその結果を示す. 参加者 A･B 共に，①30[deg]，45[deg]視覚回転外乱の条件において，②$30+10cos(0.5t)$[deg]視覚回転外乱に比べ学習速度増加時の傾きが大きく，学習が急速に習熟していることが分かった．さらに，参加者 A・B の $coscx=\pm 1$ 付近の極値を取る際の学習速度の平均値を図 5 に示す．学習速度の平均値について， 参加者 A・B 共に，①30[deg]，45[deg]視覚回転外乱と，②$30+10cos(0.5t)$[deg]，$30+10cos(2t)$[deg]視覚回転外乱の間に有意な差が認められた.

また， 参加者 A の複数時定数モデルを用いた際の記憶要素の時間変化を図 6 に示す. $A_1(t)$, $A_4(t)$ は時定数 1 [s], 90[s]の記憶要素である，記憶要素は変化の傾向を見るため，$coscx=\pm 1$ 付近の極値を取る時刻の 2 区間での移動平均を用いて算出した．実験の結果から， 時定数が小さい記憶要素$A_1(t)$ において, ②の条件での視覚回転外乱は, ①に比べて, グラフ上で傾きが急激に正負逆になる時刻が多いことが示唆された. 一般的に, 時定数が小さい記憶要素は，短期的な記憶に優れ, 忘却率は高く学習率も高い．一方， 時定数が大きい記憶要素は，長期的な記憶に優れ，忘却率・学習率は共に低い. これらのことから，②の条件の方が①の条件より忘却率が高いことが示唆された.

３．結言

本研究では，操作系における人の学習段階や学習能力を評価する 2 つの指標を用いて，難易度の異なる視覚外乱課題を与えた場合の評価実験を行った．操作はジョイスティックで行い，画面上に角度を指令して車両を走行させる実験を若年健常者 2 名で行った．難易度の低い単純な視覚回転外乱と難易度の高い複雑な視覚回転外乱を与えた結果, 2 つの指標を用いて学習速度の違いを表現することができた. 一方, 時間的な忘却を表す複数時定数モデルの記憶要素の変化については, 本実験の操作に習熟する時間帯では，複雑条件の方が忘却率は高い傾向があったが，両条件間で有意な差は認められなかった．今後操作に習熟するまでの時間がより必要となる操作系において，長い時間軸での記憶要素の評価実験，および学習習熟度が異なる高齢者での実験を行っていく予定である.

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 17H02131 の助成を受けて実施された.

参考文献

[1] Rachael D. Seidler, “Differential effects of age on sequence learning and sensorimotor adaptation”, Brain Research Bulletin 70, pp.337–346, 2006.

[2] Fatemeh Ehsani, et al, “Motor Learning and Movement Performance: Older versus Younger Adults”, Basic Clin Neurosci.6(4), pp.231-238, 2015.

[3] Tom Carlson, Yiannis Demiris, “Collaborative control for a robotic wheelchair: evaluation of performance attention and workload”, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B (Cybernetics) 42(3), pp. 876-888, 2012

[4] 安藤ら，“重度脳性まひ児の残存機能を利用した人･機械相互学習型電動車いすの開発”，日本ロボット学会誌 30(9)，pp.873-880，2012.

[5] 二瓶ら，“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.

[6] 西畑ら，“ハンズフリーモビリティの提案 ―個人のメンタルモデルに合わせた人・機械相互学習型操作系―”，LIFE2018， 425-428，2018.

[7] 飯塚ら，“人間と機械の相互学習による共創造型インタフェースの構築”, 信学技報 114(85)， pp.17-22, 2014.

[8] 後藤ら, “非ホロノミック系における手動制御の学習過程”, 計測自動制御学会第 225 回研究集会, 2005.

[9] Ken Takiyama, Masaya Hirashima & Daichi Nozaki, “Prospective errors determine motor learning”, Nature Communications 6(5925), 2015.

[10] Fatemeh Ehsani, et al, “Motor Learning and Movement Performance: Older versus Younger Adults”, Basic Clin Neurosci.6(4), pp.231-238, 2015.

[11] Sylvie Abeele, “Sensorimotor adaptation to rotated visual input: different mechanisms for small versus large rotations”, Exp Brain Res 140, pp.407–410, 2001.