

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：32657

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870763

研究課題名(和文) 熟練技術伝承に向けた機械操作熟達支援システム

研究課題名(英文) Machine Operation Assist System for Transferring Skills

研究代表者

五十嵐 洋 (Igarashi, Hiroshi)

東京電機大学・工学部・准教授

研究者番号：20408652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、技術伝承に向けた機械操作の熟達支援技術を目的としている。機械操作技術を修得するためには、人間のイメージを操作対象の特性に近づけることが重要である。そこで、操作者のイメージに近づけるように機械を変化させることで、機械操作熟達を促進できることを示した。さらに、技術伝承を想定した複数の人間がかかわる作業では、他者の意図を考慮した挙動が含まれることが示唆された。そこで、複数人が協力して作業を行う際の他者の影響を定量的に計測する手法を提唱した。この他者配慮指標が協力作業に与える影響を実験的に解析し、互いの「気づかい」それぞれ協調作業に悪影響をおよぼす可能性が解析により明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to realize a novel skill assist system for machine operation. In general, novice operators are required to long time for learning skills. According to neuroscience knowledge, the human learning process is to modify the internal model in the brain approaching to the target machine dynamics. Therefore, a new technique to modify the machine dynamics to the internal model is proposed and verified its validity. Furthermore, skill transfer from the expert to the novice include serious problems. In the tasks by multiple operators, called a cooperative task, an operator considers other ones effect. In this research, the effect is defined as Concern for Others: CFO. Thus, the relation between the balance of the CFOs by operators and cooperative task performance is analyzed. Finally, the results suggest the CFO is a key element of teamwork and cooperative tasks.

研究分野：人間機械系

キーワード：人間機械系 ヒューマンインタフェース 熟達 協調 チームワーク

### 1. 研究開始当初の背景

世界に誇る日本の技術を支えてきた団塊世代の大量退職により、速やかな若手技術者の育成、熟練技術の伝承が急務の社会問題となっている。しかし、機械操作の熟達には長いトレーニング期間を要するため、その短縮化が望まれている。

熟達をターゲットとした研究分野は教育学、認知科学、脳科学など多岐にわたる。しかし、これらの知見の多くは、受動的な観測に立脚したアプローチであり、「能動的に初心者者の熟達に働きかける技術」への応用は困難であると考えられる。

これまで、研究代表者は、認知科学・心理学の専門家との共同研究を通して「熟達」を議論する数多くの機会に恵まれた。それらの議論の結果、熟達スキルの階層モデル(図1)という着想に至った。本研究はこの階層モデルの中でベースとなる、運動スキル(思い通りに機械を操るスキル)に着目し、その支援を目指す。

ここで、脳科学分野の知見をもとに、思い通りに機械操作をできる状態を、「操作者がイメージする機械の挙動予測モデル(内部モデル)」と、「操作対象のダイナミクス(機械インピーダンス)」が一致している状態にあると考える(図2)。これより、人間の運動スキルに対する熟達とは、操作者のイメージ(内部モデル)を操作対象機械のダイナミクス特性へ近づけるよう修正する過程とみなすことができる。

そこで、操作対象の機械特性を、操作者に気づかれることなく修正するサブリミナルキャリブレーションを提唱し、思い通りに機械を操れるようになるまでの時間の短縮を



図1: スキルの階層モデル

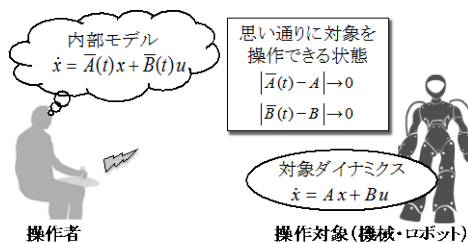


図2: 思い通りに機械操作できる状態

図ってきた。特に、操作者に気づかれぬことで、人間が本来有する熟達能力を妨げずに、熟達を支援する効果が期待できる。

しかし、サブリミナルキャリブレーションは単独作業のみを想定しており、複数の操作者が介在する作業では、他者の行動が操作特性に影響を与えることが問題となる。これは、技術伝承など、コーチングを目的とした場合にも問題となると考えられる。

### 2. 研究の目的

複数の操作者介在するタスクでの運動スキルにコミットする熟達支援の実現を目指す。そのため、本課題では、単独作業におけるサブリミナルキャリブレーションの解析に加え、単独作業では考慮する必要のなかった他者の影響に着目する。

本研究では、この他者の介在に伴う影響を「気づかい」として定量的に評価する手法を提案する。「気づかい」という日本語は他者を助けるニュアンスが強いが、ここでは他者の介在に伴う混乱や迎合も含めた包括的な概念として定義する。実験では、「気づかい」が協調作業パフォーマンスに与える影響を解析する。

### 3. 研究の方法

本研究では、熟達支援の対象タスクとして、単独のバー追従操作実験と協調ドライビングタスクを設定し、実験検証を行った。

#### (1) バー追従操作実験

まず、単独作業時のサブリミナルキャリブレーション効果検証のため、図3に示す1自由度のバー追従操作実験アプリケーションを開発した。被験者は、ランダムに動作する参照マーカに近づけるように、操作対象バーをジョイスティックにより操作するよう指示されている。

ここで、操作対象のバーは2次のダイナミクスモデルを適用しており、ジョイスティック入力に対する挙動は慣性・粘性の影響をうける。さらに、実験試行ごとに慣性、粘性の初期値をランダムに設定することで、思い通りにバーを操作するためには、慣れ(熟達)を要する作業である。

この慣性、粘性および入力ゲインをサブリミナルキャリブレーションによって修正した場合の追従パフォーマンスを解析し、その熟達促進効果について検証する。

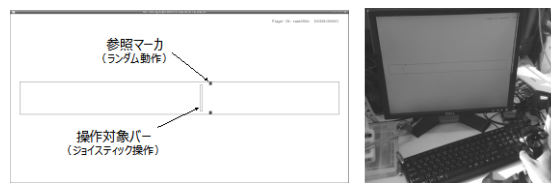


図3: バー追従操作実験

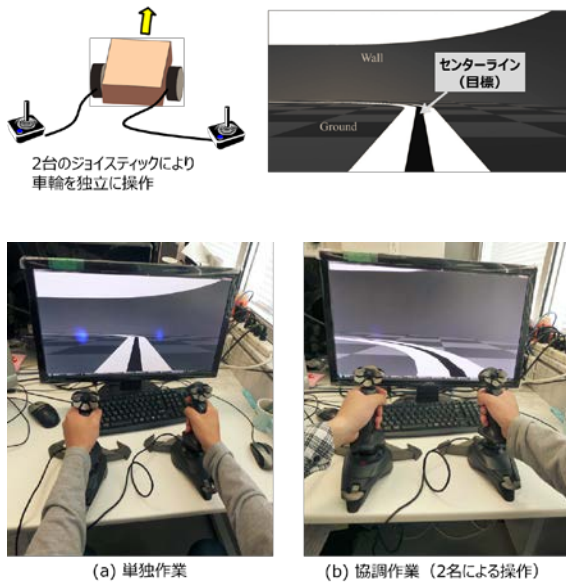


図4: 協調ドライビングタスク

## (2) 協調ドライビングタスク

前述のように、複数の操作者が介在する協調作業を行う際の影響を検証するために、図4に示す協調ドライビング実験環境を構築した。このタスクは、仮想環境内の2車輪型の移動ロボットをジョイスティックで操縦し、目標となるセンターラインに近づけるように運転することである。

この操作において2本のジョイスティックを使用し、各車輪それぞれ独立に回転トルク指令を出すように設計している。そして、単独作業時には両手で、協調作業時には2名がそれぞれ片手で操作を行う。仮想環境内でこの運転システムを構築することで、追従性を定量的に評価することが可能である。

予備実験の結果、単独作業での追従性（目標とのズレ）が高い操作者であっても、2名の協調タスクでは必ずしも高いパフォーマンスを発揮できるとは限らない。つまり、個人スキルと協調スキル（チームワークスキル）は、それぞれ独立に評価する必要があることが示唆された。

## 4. 研究成果

### (1) バー追従操作実験の解析結果

まずバー追従操作実験においてサブリミナルキャリブレーションの効果を検証した。サブリミナルキャリブレーションのイメージを図5に示す。機械操作における運動スキルの熟達過程とは、図2に示した操作対象の特性と操作者のイメージとが一致するように、操作者自身がイメージを修正することである（図5(a)）。

そこで、操作対象の特性（重さや摩擦など）を操作者のイメージに近づけることで、思い通りに操ることのできる（操作イメージと対象の特性が一致する）までの時間短縮が期待できる。しかし、実際には操作者のイメージ

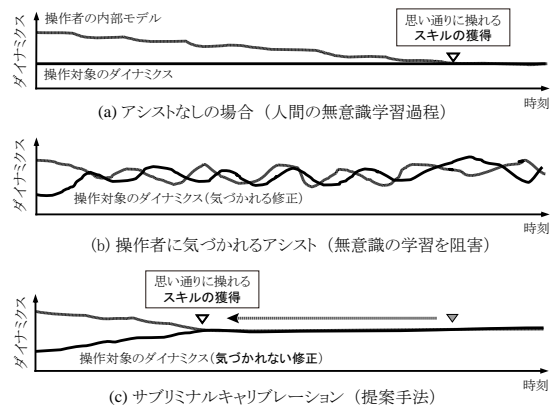


図5: サブリミナルキャリブレーション

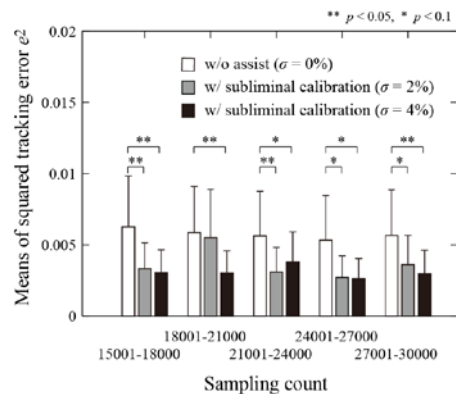


図6: 実験結果(後半の追従誤差)

を直接計測することはできない。そこで、少ない誤差で目標に追従できているほど、操作者のイメージと操作対象特性が近いと考える。つまり、操作バーの追従誤差を低減するように機械特性を修正する。

ところが、その結果は図5(b)のように、熟達を促進するどころか、むしろ操作の邪魔となることが明らかとなった。この原因として、人間は無意識に操作学習を行っていることが挙げられる。すなわち、実験中にも操作対象への入力指令と操作対象の応答を観測することで、逐一操作イメージを修正しているといえる。このため、学習対象の応答が機械特性の修正により変化したことで、イメージ修正を妨げたと考えられる。

この問題の解決法として、図5(c)のように、操作者に気づかれない範囲に機械修正量をとどめる。これをサブリミナルキャリブレーションとよび、実験検証を行った。実験では、図3に示した実験装置を用いて、13名の被験者（20代男性）に対し、30000サンプリングカウント（約1分間）のタスクを実施した。

サブリミナルキャリブレーションの検証タスクでは、前半15000サンプリング（約30秒間）で操作対象の機械特性を修正し、後半は機械特性の変更をしていない。つまり、前半で操作者のイメージにどれだけ近づけることができていたかを後半の追従精度より評価する（図6）。

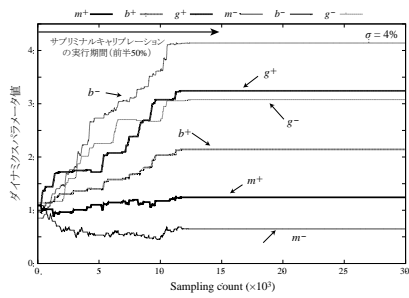


図 7: 被験者 A の機械特性変化

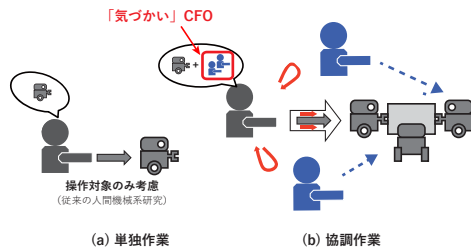


図 8: 協調作業における気づかいのイメージ

ここで、図 6 の  $\sigma$  は、操作バーの機械特性修正量を示している。認知科学の知見では、人間の気づきについては、JND と呼ばれる刺激の変化割合に閾値が存在することが知られている。予備実験では  $\sigma=4\%$  程度の機械特性の変化であれば、操作者に気づかれないことがわかっている。実験結果では、修正しない場合 ( $\sigma=0\%$ ) に加え、 $\sigma=2\%$ 、 $\sigma=4\%$  のそれぞれについて、実験を行い、その平均追従 2 乗誤差 ( $e^2$ ) を評価した。

その結果、被験者 13 名全員が、サブリミナルキャリブレーションを実施しているかについて気づくことはなかった。また、追従誤差については、個人差も含め、平均的に追従精度を高めていることが有意に示された。

また、図 7 に 1 名の被験者のサブリミナルキャリブレーション ( $\sigma=4\%$ ) における機械特性変化を示す。この結果、前半に機械特性が修正されていることがわかる。そして、図 6 で比較した後半では機械特性の修正が行われていない。つまり、前半の操縦タスクを通じて、この被験者専用の操作イメージに近い機械へと変化させることができたといえる。

サブリミナルキャリブレーションを適用するためには、予め目標値の明らかなタスクが要件となる。例えば、義手や義足、電動車いすなど、思い通りに操縦することが求められ、かつ熟達に時間がかかるデバイスへの応用が期待される。

## (2) 協調ドライビングタスク実験成果

上述のバー追従操作は、単独作業であり他者の影響を考慮する必要がなかった。そこで、複数の人間が介入する協調作業時の操作特性の影響について実験を行った。

ここで、協調スキルを測る上で重要になる「気づかい」について定義する。図 8 に本研究が着目する「気づかい」のイメージを示す。

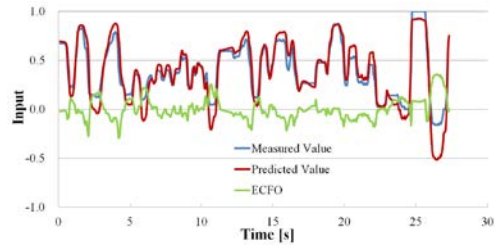


図 9: 協調作業における「気づかい」(ECFO)

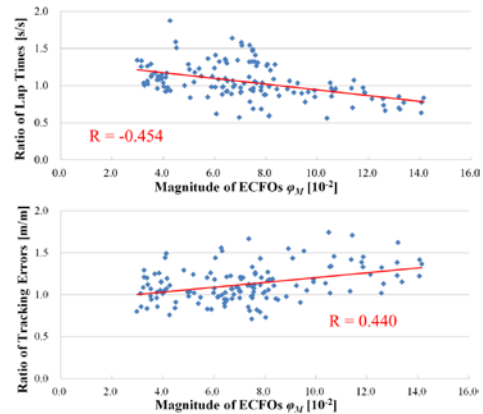


図 10: 「気づかい」の強さと操縦パフォーマンス

通常、前述のバー追従操作などの単独作業時は、人間は操作対象のみを考慮して操作指令を生成している (図 8(a))。ここで、同様のタスクにおいても、複数の人間が介入する場合、操作指令に他者の影響が付加される (図 8(a))。

本研究では、この他者の影響に伴う入力指令の変化量を「気づかい」とよぶ。つまり、単独作業時に発生しなかった操作指令の意図を指す。このため、「気づかい」とは、必ずしも他者を助ける意図とは限らず、他者の介入に伴う混乱や他者意図の予測ミスなども、その要因となる。

「気づかい」を定量的に評価するためには、同様のシチュエーションで、その操作者が単独作業ではどのような入力指令を送っていたかを推定する必要がある。そこで、本実験では事前に単独作業 (1 名で 2 台のジョイスティックを操作) を実施し、その操作指令パターンをニューラルネットワークによって学習する。その後、協調作業 (2 名でそれぞれ 1 台ずつのジョイスティックを操作) を実施する。このとき、各操作者によって入力された操作指令値と、ニューラルネットワークにより予測した単独操作予測指令値との差を「気づかい」として計測する。

図 9 に計測した「気づかい」のグラフを示す。このように協調作業中にリアルタイムで「気づかい」を推定することが可能となった。さらに、2 名の「気づかい」の総量の平均とドライブパフォーマンス (目標ラインからの誤差および周回時間) の平均について、相関解析を行った (図 10)。その結果、各操作者が発揮する「気づかい」とドライブパフォー

マンスにそれぞれ相関性が認められた。本実験では、「気づかい」が大きいほど結果的に周回時間を低減（効率化）し、「気づかい」が小さいほどセンターラインからの誤差が低減（高精度化）という興味深い結果が明らかとなった。

今後、タスクの複雑化をした場合の「気づかい」とパフォーマンスの関係について研究を進める。さらに、「気づかい」をもとにした、操作熟達支援手法について多角的に検討を行う予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 2 件）

[1] N. Tsujita and H. Igarashi: "Estimation of Concern for Others and Its Application in Ping-Pong Game", Journal of Signal Processing, Vol. 18, No. 4, pp. 233-236, 2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.2299/jsp.18.233>

[2] 五十嵐 洋: “機械操作早期熟達のためのサブリミナルキャリブレーション”, シミュレーション学会誌, Vol. 33, No. 2, pp. 42 - 47, 2014

〔学会発表〕（計 2 件）

[1] H. Igarashi: "Teamwork Assist with Concern for Others in Human Cooperative Works," The 1st IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, IS3-2-4, 2015, 名古屋工業大学（愛知県，名古屋市）

[2] 杉拓人, 五十嵐洋: “可変インピーダンスジョイスティックによるサブリミナルキャリブレーション”, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014, 東京電機大学（東京都，足立区）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

五十嵐 洋 (Igarashi, Hiroshi)

東京電機大学工学部・准教授

研究者番号: 20408652