

[研究助成 (C)]

人間機械系の能力向上に向けた情報改変の普遍的設計論の構築

2247012

研究代表者
(助成金受領者)

大阪大学 大学院工学研究科

博士後期課程

田 中 健 太

共同研究者

兵庫県立大学

教授

南 裕 樹

大阪大学

教授

石 川 将 人

[研究の目的]

現代社会において、ヒトが機械を操作する「人間機械系」はあらゆる場面に存在しており、その操作性と安全性を向上させることは極めて重要な課題となっている。たとえば、自動車の運転、航空機やドローンの操縦、建設現場における重機の操作、さらには医療現場における遠隔手術ロボットなど、私たちの生活や産業の大部分は人間機械系によって支えられている。これらのシステムは、複雑な環境下でもヒトの柔軟な判断力を活かせるという利点がある。しかし人間機械系には、作業者の訓練に大きなコストがかかる場合があったり、疲労や認知負荷によるヒトの操作ミスが人命や財産を脅かすことがあったりという課題が潜在的にある。そのため、操作性の向上が求められている。ここでいう操作性向上には、主観的な操作感の向上だけでなく、操作の習熟にかかる時間の短縮や致命的なエラーの防止なども含まれる。

これまで、人間機械系の操作性を向上させるための主なアプローチとして、操作者に「より正確で、より網羅的な情報」を提示する工夫が数多くなされてきた。具体的な例としては、自動車の死角を補ってより広い視野を提供するバックモニターや、拡張現実を用いて見えない障害物を視覚化する技術、さらには重機操作において土を掘る際の抵抗を力覚としてオペレー

タの手元に伝えるフィードバック技術などが挙げられる。これらはすべて、対象の真の状態をできるだけ正確にヒトに把握させることで、適切な操作を引き出そうとする試みである。

しかし、どれほど正確で詳細な情報を提示したとしても、ヒトの認知能力や身体的限界に起因する操作性の壁を完全に越えることはできない。なぜなら、ヒトの感覚器官が細かな変化を認識する能力や、神経伝達速度には、生物学的な限界が存在するからである。たとえば、重機のアームの位置をヒトの視力を超えて伝えることはできない。また、機体のバランスが崩れそうであることを表示しても、反応の遅れによりその対処が間に合わない場合も考えられる。つまり、ディスプレイ上の情報そのものが完璧であったとしても、「ただ正確な情報をそのまま見せる」だけでは、それを処理するヒトの限界により情報が実質的に劣化してしまうため、操作性の向上にも限界があるのである。

そこで本研究では、情報をあえて改変してヒトに提示することで、操作性の良い機械に見せかける「仮想ダイナミクス」によって操作性を向上させる、新しい枠組みを提案する。これは、機械から得られた状態情報をそのままディスプレイに映すのではなく、間に「情報改変器」と呼ばれるシステムを挿入することで実現する。そして、どのような仮想ダイナミクスの操作性が良いのか、どのような機械にどのような

情報改変器を挿入すればそのような仮想ダイナミクスを実現できるのかを明らかにし、設計論を確立することを目的とする。

[研究の内容と成果]

1. 情報改変器と仮想ダイナミクスの概念

本研究で導入する「情報改変器」は、機械の状態を受け取り、それを改変してヒトに提示する役割を持つシステムである。制御工学の枠組みに当てはめると、ドローンやロボットといった「制御対象」を動かすために、コンピュータやヒトが「制御器」として命令を送るシステムと見なせる。従来の研究では、情報改変器を制御器の一部として扱う視点が一般的であった。これは、既存の制御器に情報改変器を組み合わせることで、安全性の確保やノイズの除去といった「高度な機能を追加した新しい制御器」と見なす考え方である。一方、本研究では、情報改変器を制御対象の側に含めて考える。すなわち、情報の出口に情報改変器を配置した制御対象を一つの制御対象として扱い、これを「仮想ダイナミクス」と名付けた（図1）。この視点の転換により、制御器側から見れば、目の前にある機械そのものの性質が、より扱いやすい別の仮想的な機械へと変化したように見えるのである。

仮想ダイナミクスの意義は、制御器がブラックボックスである場合にも対応できる点であ

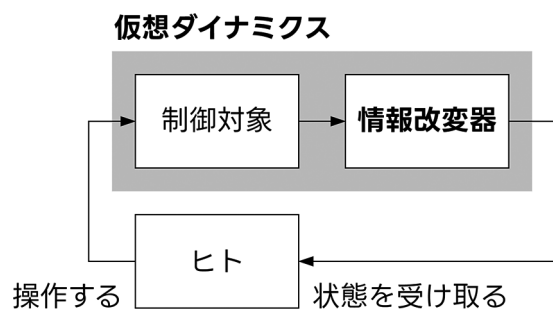


図1 人間機械系における仮想ダイナミクスと情報改変器の概念図

る。現実世界には、自動車や高度な産業ロボットのように、ヒトや強化学習エージェントといった数学的にモデル化しにくい要素が制御するシステムが存在する。本手法は、制御器ではなく、その周囲にある仮想ダイナミクスだけに手を加えるという視点を持つ。これにより、制御器の中身が複雑であっても、システムの操作性や学習効率を改善できる可能性がある。

2. 人間機械系における仮想ダイナミクス設計の有効性の実証

仮想ダイナミクスによって操作性が向上させられる、つまり仮想ダイナミクスが有効である例が存在すること確かめるため、被験者実験を行なった。このようなシステムの候補として、我々が開発した「倒立振り子ゲーム」シミュレータが考えられていた（図2）。倒立振り子とは、手のひらの上でほうきなどの棒を立ててバランスを取るようなシステムのことで、不安定で倒れやすい。倒立振り子ゲームでは、プレイヤーがゲームコントローラを使って画面中央のカートを左右に動かし、上に乗った棒が倒れないようにバランスを保つことが求められる。棒が45度以上に傾いてしまいゲームオーバーになるまでの時間を「スコア」とする。スコアが高いほど、

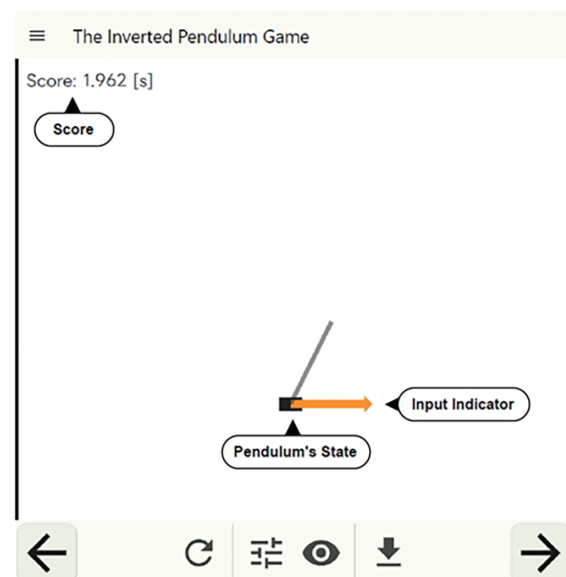


図2 倒立振り子ゲームのゲーム画面の図

棒のバランスを長く保てた、つまり操作性が良かったことになる。

本実験における「情報改変器」としては、現在の状態から 0.6 秒先の未来を予測した状態を画面に提示する手法を採用した（図 3）。具体的には、プレイヤーがその瞬間以降何も操作しなかったと仮定して、振り子が 0.6 秒後にどのような状態になっているかをシステム内部で計算する。そして、その予測された未来の姿を、現在の真の状態の代わりに画面に表示した。これにより、現実にはまだ少ししか傾いていない振り子が、画面上ではすでに大きく傾き始めているように見えることがある。

被験者には、現実の姿をそのまま表示する「通常モード」と、0.6 秒先の未来を表示する「改変モード」の両方をプレイしてもらった。図 4 は、両モードのスコアの中央値と四分位数を示している。図のように、すべての被験者において、改変モードでのスコアの中央値が、通常モードの 2 倍以上に伸びることが確認された。これにより、仮想ダイナミクスが倒立振り子ゲームの操作性を向上させることが実証された。

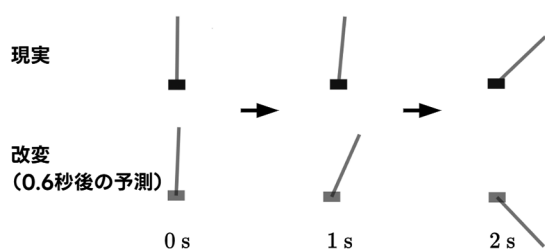


図 3 現実の状態と改変された状態の比較

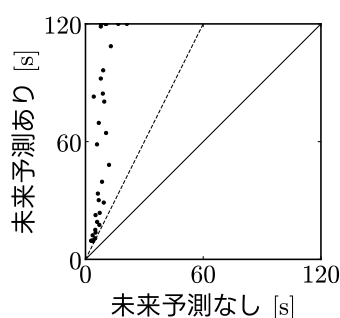


図 4 通常モードと改変モードのスコア比較図

さらに、実験後のアンケートでは、すべての被験者が「改変された情報を提示されたときの方が操作しやすかった」と回答した。被験者からは「傾きの許容範囲が広く感じた」「動きが軽く感じられ、大きな調整も細かな調整もやりやすかった」といった意見が寄せられた。これにより、主観的な操作感の面でも仮想ダイナミクスの有効性が確かめられた。

以上より、仮想ダイナミクスが、人間機械系の操作性を向上させるのに有効な場合があることが実証された。

3. 人間機械系の数理モデル解析による操作能力向上のメカニズム調査

提示する情報を改変することでなぜ操作性が向上したのかのメカニズムを理論的に解明し、設計の明確な指針を得るために、人間機械系を数理モデル化して解析を行なった。

前節の倒立振り子ゲームにおいて、ディスプレイを通じてヒトに提示される情報は、台車の位置と振り子の角度のみである。台車の速度や振り子の角速度は、画像としては表示されておらず、過去の画像との比較により推測する必要がある。ここで我々は、解析にあたり以下の仮説を立てた。

位置と角度のみを使った操作だけでシステムを安定化できるのであれば、速度や角速度の推測が不要となる上に使うべき情報の量が少ないため、操作が容易になる。逆に、位置と角度の情報だけでは機械を安定化できない場合、ヒトは速度や角速度を予測しつつ使わなければならないため、操作が難しい。

数理モデルを用いた解析の結果、情報を改変せずに状態をそのまま提示した場合、位置と速度に対する単純な操作だけでは、倒立振り子を安定化させることが不可能であることが判明した。一方、情報改変器を用いて少し先の未来を予測して提示すると、台車の位置と振り子の角度に比例した操作でシステムを安定化できることが示された。

この解析結果は、仮想ダイナミクスによって速度と角速度の情報を用いる必要がなくなったことが操作性向上の原理であった可能性を示唆している。これは、人間機械系における仮想ダイナミクス設計の指針につながる発見である。

4. 強化学習を用いたシステムへの応用

これまではヒトが機械を操作する人間機械系に対して仮想ダイナミクスを設計することを主なテーマとしてきたが、AIにも同様の枠組みを適用できるのではないかと考え、強化学習を用いたシステムへの応用を試みた。

強化学習は、AIが試行錯誤を通じて報酬を最大化する行動を自律的に獲得する強力な手法である。しかし、実用的な制御性能を獲得するまでには膨大なデータと試行時間を要することが多く、学習効率の向上が実用化に向けた大きな課題となっている。そこで本研究では、ヒトの操作支援だけでなく、強化学習のシステムに対しても「仮想ダイナミクス設計」の枠組みを適用した。具体的には、制御対象のセンサーから得られた生のデータをそのままAIに入力するのではなく、AIの直前に情報変更器を挿入し、情報を意図的に加工することで、AIにとって「学習しやすい」仮想ダイナミクスを構築し、学習の効率化を図った。

この枠組みの有効性を検証するため、倒立振り子ゲームと同様のシステムを安定化するタスクを強化学習する実験を行なった。この実験では、現在の状態から少し先の未来を予測し、それをAIに提示する情報変更器を設計した。

この実験の結果をまとめたグラフが、図5、6である。

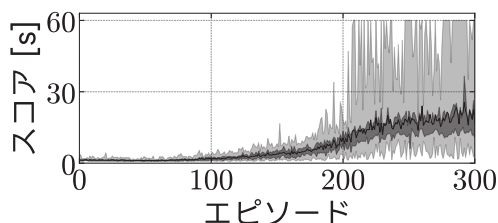


図5 情報変更なしでの学習時のスコアの推移

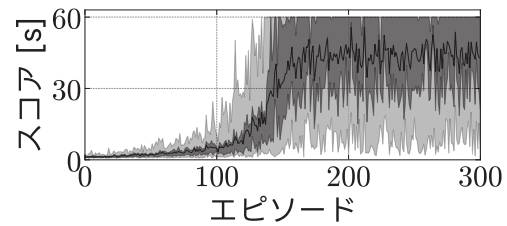


図6 情報変更ありでの学習時のスコアの推移

実験の結果、現在の状態を提示されたAIと比較して、未来の予測状態を提示されたAIは、目標とする制御能力に到達するまでの学習回数が減少し、学習が加速することが確認された。さらに、学習完了後の最終的なスコア自体も高くなる傾向が見られた。これにより、仮想ダイナミクスが強化学習の効率と性能の両方を引き上げる例が存在することが示された。

[成果の発表、論文など]

学術雑誌論文

田中健太, 南裕樹, 石川将人: 情報変更による強化学習の効率化—倒立振子の安定化制御を例として, システム制御情報学会論文誌, Vol. 37, No. 8, pp. 234-236, 2024

Kenta Tanaka, Yuki Minami, Masato Ishikawa: Operability improvement of Human-machine Systems by Altering Visual Information: A Case-study of the Inverted Pendulum, IEEE Access, Vol. 13, -, pp. 93566-93573, 2025

田中健太, 南裕樹, 石川将人: 人間機械系における視覚情報変更による操作性向上効果の線形モデル解析, 計測自動制御学会論文集, -, -, -, 2025 (採択済)

国際会議論文

Kenta Tanaka, Yuki Minami, Masato Ishikawa: Improving Controllability of Manual Control Systems by Altering Visual Information, 29th International Symposium on Artificial Life and Robotics, -, -, pp. 356-359, 2024

Kenta Tanaka, Yuki Minami, Masato Ishikawa: Reinforcement Learning-Based Analysis of the Effect of Presenting Predicted State on Operability of 2nd-Order LTI Systems in Human-Machine Systems, 2025 SICE Festival with Annual Conference, -, -, ThAT11.18, 2025

国内会議論文

田中健太, 南裕樹, 石川将人: 不安定零点を有する動的システムの手動制御のための視覚情報変更, 第12回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, -, -, 1PS2-17, 2025