

人になじむ人間操作型機械

～入出力ゲインの自動適応に関する基礎研究～

Human-Adaptive Operated Machines with Automatic I/O Gain Tuning

2151008



研究代表者

早稲田大学
理工学術院総合研究所

講 師

亀 崎 允 啓

[研究の目的]

人間が操作する作業機械（手術支援ロボットや災害対応重機など）において、人間の操作入力に対するアクチュエータ出力（入出力ゲイン）は、作業パフォーマンスを左右する大きな要因となっている。これまでの操作型機械では、利用者や作業内容によらず固定であったため、人間と機械のミスマッチ（使いにくい）が生じていた。本研究は、「長期間データから抽出した人間特性に徐々になじんでいく入出力ゲインの自動適応手法」の開発を行う。完全自動ではなく人間を中心に据え、知能情報処理をベースとした個々人になじむヒューマンインタフェースを構築することで、人間と機械の関係はより密接になり、人に優しい機械システムとなる。

本研究では、複軸マニピュレータとジョイスティックで構成されるマスタ・スレーブシステムを対象として、長期間の作業履歴に基づき、人間特性（スキルなど）になじんでいく入出力ゲインの自動適応手法を構築する。本研究では、この入出力ゲインを Basic Input-Output Gain (BIOG) と呼ぶ。そのため、以下の3つの技術課題に取り組む必要がある。

1つ目は、人間特性の定量化手法である。人間が機械をどのように使っているのかを長期間のデータから定量化する。個々人の違いが表れやすいことに加え、作業内容や環境に依存しない特徴量の抽出がポイントとなる。2つ目は、

目標値の設定手法である。人間特性を表す特徴量をどのように変えると使いやすさが向上するのかを分析し、目標値を設定する。個々人によって異なる使いやすさの基準を扱う共通の方法論の構築がポイントとなる。3つ目は、BIOGの自動適応手法である。1つ目の特徴量を2つ目の目標値に近づけるための、具体的なBIOG調整手法を開発する。

[研究の内容、成果]

1. BIOG パラメータの設定

BIOG マップを以下のようにモデル化する。操作入力 x とアクチュエータ速度 y を用いた単調増加関数 $y=G(x)$ で表す。 $x=0$ から始動点までを不感帯、最大速度となる点 (P_{sx} : 飽和点) から $x=100$ までを飽和帯として設定する(図1 上部中央)。 $G(x)$ の次数が高いほど適応性が高くなるが、理想的次数は現時点で分からないため、本研究では、2つの区分を有する1次関数で表現する。区分を接続する点を変傾点 P_b (P_{bx}, P_{by}) と呼ぶ(図1a)。本研究では、変傾点の2次元位置と飽和点を調整した。各操作軸につき正負の2枚定義される。

2. 人間特性の定量化手法

操作者だけでなく作業内容を大局的特徴として捉えられる物理量を選定し、使用条件やスレーブの仕様に依存しない共通の定量化手法が

求められる。操作傾向を直接的に表現できること、作業傾向としてフロント動作を間接的に表現できる物理量として、操作レバーの入力量に着目する。さらに、大局的特徴を作業時間や使用条件に非依存に把握するために、操作量の全滞在時間が全作業時間に対して占める割合、滞在頻度（ヒストグラム）化（ $h(x)$ ）する（図 1b）。

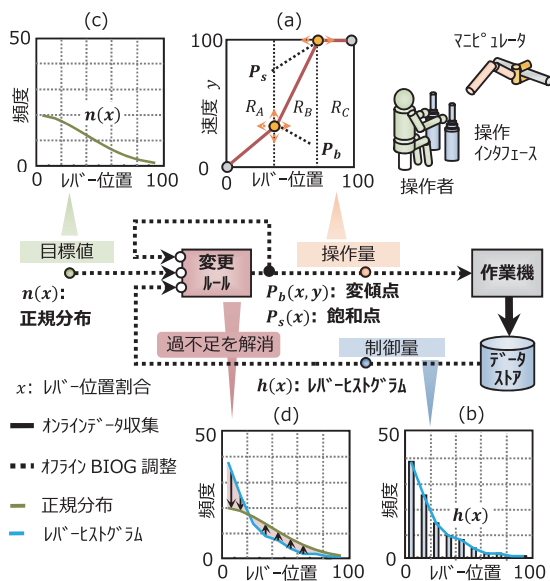


図1 BIOG 自動調整システム

3. 目標値の設定手法

微操作の多い作業ではレバー入力量の小さい範囲に操作が集中する一方、大操作の多い作業では大きい範囲に集中する。前者では、低速度領域が狭く応答が敏感（慎重な操作が必要）、後者では、応答が鈍い（頻繁に大操作が必要）と感じてしまう。このように、身体的・精神的に負荷がかかる操作の場合、操作量ヒストグラムの頻度が一部の領域に偏ってしまう。そこで、操作者や作業内容によらず、操作頻度の偏りをなくし、ヒストグラム波形を平準化させる基本適応側を考える。作業内容によらずレバーの全帯域を満遍なく利用させることで、操作感覚が統一化され、作業へのスムーズな適応、総体的な使いやすさ向上が期待できる。本研究で対象とするばね復帰型の操作レバーでは、満遍ない利

用を表す波形は、正規分布となる（図 1c）ことから、正規分布波形 $n(x)$ を基準波形（目標値）とする。

4. BIOG 調整手法

操作量ヒストグラム波形 $h(x)$ を任意の基準波形（ここでは、正規分布波形 $n(x)$ ）に近づける BIOG 自動適応手法を開発する（図 1d）。ヒストグラム波形整形の基本となる頻度移動の概念図を図 2 に示す。ヒストグラム波形は、長時間データにより構成されるため、局所的特徴に起因した短期間での大きな変化は生じにくい。また、作業結果は BIOG の出力に相当する速度ヒストグラムに現れる。この 2 点から、BIOG の調整前後で操作量ヒストグラムが整形されても速度ヒストグラムは保持されるという仮説が立てられる（図 2 中央）。この条件により、BIOG パラメータの調整量に応じた操作量ヒストグラム移動量が定量的に推定できる（図 2 右下）。以上をまとめた BIOG 自動変更システムの概念図を図 1 に示す。

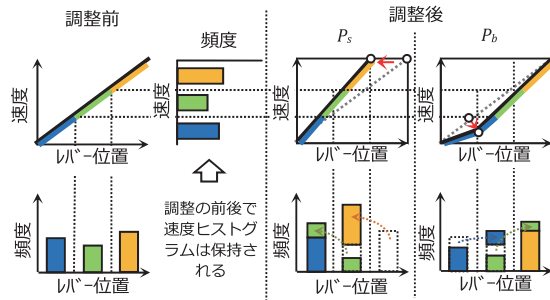


図2 調整によるヒストグラムの平準化

5. 実機を用いた評価実験

実験は、ピッチ 3 軸を有するマニピュレータをスレーブ、速度指令型操作レバーをマスターとして利用し、位置決めに支配的なピッチ軸第 1 関節と第 2 関節の BIOG 調整を行った（図 3a）。微細操作が要求されるブロック積上げ（図 3b）および高速動作が求められるボールの運搬を行った。被験者は 6 名、10 回×2 セットを 1 日

とし、5日間連続で行った。タスク初日は、設定できる最も急峻な BIOG で行い、このときの遂行時間の合計と分散が同じになるように被験者6名を3名ずつのグループに分類した。グループ1では、変更規範を用いた BIOG 変更を行い、グループ2では、変更を行わない。BIOG 変更は、当該日の全施行データを用いて終了時に行う。最終5日目には、グループ1には、デフォルト BIOG での再試行、グループ2には、4日目の作業データを用いて調整した BIOG を提供する。操作者の主観的な使いやすさを評価するために、NASA-TLX を用いたアンケートを行った。初日の1セット終了後、4セット終了後、5回目作業終了後にそれぞれ行なう。変更システムに関する説明は、被験者には一切しない。

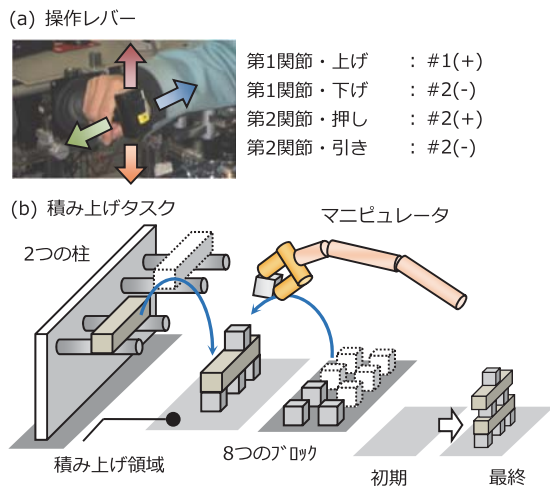


図3 実験条件

図4に、ブロック積み上げタスクにおける実験の結果を示す。面積差分において、グループ1では、1日目から4日目にかけて確実に面積差分が減少しているが、デフォルト BIOG に戻した5日目では増えてしまっている。一方、グループ2では、面積差分の減少はまったく見られなかった。しかしながら、4日目の作業データへ適応した BIOG マップで行った5日目では、面積差分が減少した（図4a）。作業効率においては、両グループともに減少傾向はあるものの、

グループ1のほうが大きく減少し続けている。グループ2では、3日目以降に作業時間の減少が見られず、自己改善が頭打ちになったものと予想される。4日目においてグループ1-2間で統計的な有意差が得られたことから、BIOG 調整の支援効果により、初日には確認されなかった作業時間差がグループ間に現れたことが分かった（図4b）。支援の有無を切り替えた5日目において、グループ1では、すべての被験者でタスク時間が増加し、グループ2では、すべての被験者で減少することが分かった。精神的作業負荷において、グループ1では、BIOG 変更に伴い使いやすさが向上している。グループ2では、慣れの影響（自己適応）により多少の改善はあるがその程度は小さい（図4c）。また、ヒアリングの結果、BIOG 調整に気付いた操作者はおらず、調整によって操作に違和感を覚えるものはいないということも分かった。

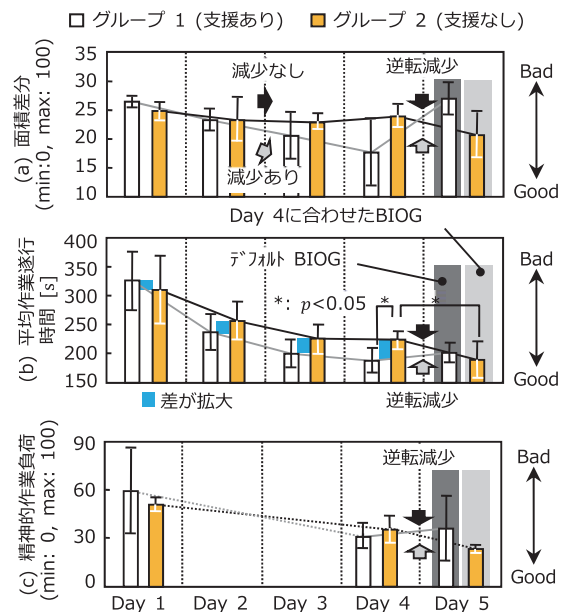


図4 BIOG 調整による作業パフォーマンスの向上

6. 本研究の成果

作業は時々刻々変化していくこと、人間は非線形性やばらつきが多いことから、局所的な作業データでは、作業や操作者の特性を把握しきれないだけでなく、局所適応的な I/O ゲイン

調整では、頻繁かつ大幅な変更を余儀なくされるため、機械システムの動特性理解を阻害することが懸念される。そこで、作業および操作者の特性を大局的に捉えた上で、操作者に違和感を与えないよう緩やかに馴染ませていく I/O ゲイン (BIOG) の自動調整システムを開発した。速度制御型のマススレーブを利用した実験の結果、BIOG 調整によってヒストグラム波形が目標基準波形に整形されること、作業効率が向上すること、主観的な使いやすさが向上することがそれぞれ示唆された。

【今後の研究の方向、課題】

本実験では、速度指令型ジョイスティックによる油圧マニピュレータの操作を対象に BIOG 調整システムの開発を行ったが、基本的な考え方は、その他の HMI においても応用できると考えている。今後は、被験者数の増加および被験者特性の多様化（技能など）を行うとともに、調整システムのパラメータ（ヒストグラム階級数や BIOG マップ形状など）と調整効果の関係性を整理する。また、調整後に残る面積差分を用いて次回以降の調整量を修正する機械学習システムの導入も検討している。局所適応的 I/O ゲイン調整を含めた階層的な I/O ゲイン調整システムについても検討する予定である。

【成果の発表、論文等】

論文

- [1] Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata, and Shigeki Sugano: An Adaptive Basic I/O Gain Tuning System for Human-Machine Systems, IEEE Trans. Human-Machine Systems, 2017. (to be submitted)
- [2] Kui Chen, Mitsuhiro Kamezaki, Takahiro Katano, Junjie Yang, Tatsuzo Ishida, Masatoshi Seki, Ken Ichiryu, and Shigeki Sugano: Development of a Virtual Reality Simulator for Four-Arm Disaster

Rescue Robot OCTOPUS, in Proc. 2016 IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2016), July 2016. (to be published)

- [3] 亀崎允啓, 石井裕之, 石田健蔵, 関 雅俊, 一柳 健: 4 腕式極限作業ロボット OCTOPUS の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 論文集(Robomec'16), 2016 年 6 月. (to be published)
- [4] 亀崎允啓, 片野貴裕, 陳 奎, 石田健蔵, 関 雅俊, 一柳 健, 菅野重樹: 4 腕式極限作業ロボット OCTOPUS のための遠隔操作シミュレータの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 論文集(Robomec'16), 2016 年 6 月. (to be published)
- [5] Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyuki Ishii, Tatsuzo Ishida, Masatoshi Seki, Ichiryu Ken, Yo Kobayashi, Kenji Hashimoto, Shigeki Sugano, Atsuo Takanishi, Masakatsu G. Fujie, Shuji Hashimoto, Hiroshi Yamakawa: Design of Four-Arm Four-Crawler Disaster Response Robot OCTOPUS, in Proc. 2016 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA2016), pp. 2840-2845, May 2016.
- [6] 亀崎允啓, 岩田浩康, 菅野重樹: 操作入力量ヒストグラムの波形整形に基づく基本入出力ゲインの自動調整システム, 日本ロボット学会誌, vol. 34, no. 1, pp. 56-64, 2016 年 1 月.
- [7] 亀崎允啓, 小坂拓未, 岩田浩康, 菅野重樹: BIOG 調整システムにおける入出力情報を用いた作業および操作者の特性分析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 論文集 (Robomec'15), paper no. 2P1-P05, 2015 年 5 月.

■ 招待講演

- [1] Design of Intelligent Human-Machine Systems focusing on Human-Machine Interfaces, Invited Lecture in University of Moratuwa, Sri Lanka, May 2016.
- [2] 次世代ロボットのための知的ヒューマンマシンインタフェース, 次世代ロボットと RT 技術の未来～次世代ロボット開発の最前線～, 東京, 2016 年 3 月.

■ 受賞

- [1] 第 30 回日本ロボット学会学術奨励賞, 2015 年 9 月.