

[研究助成 (A)]

データ科学的アプローチによるヒューマンインザループシステムの設計
—— 人と機械の異なるデータレートに基づく最適化 ——Design of Human-in-the-Loop Systems by a Data Scientific Approach
—— Optimization Based on Different Data Rates Between Humans and Machines ——

2211016



研究代表者	兵庫県立大学 大学院工学研究科	教授	佐藤 孝雄
共同研究者	兵庫県立大学 大学院工学研究科	助教	川口 夏樹

[研究の目的]

我々の生活する世界は、人を含む生物、自然環境、産業、社会等の様々な要素が相互に結びついた大規模ネットワークである。また、フラクタル構造も有する構造であるため、各構成要素もまたネットワーク構造を有する。例えば、人体を機能的な観点から区分すると、人体は器官系によって構成されており、各器官は人体を安定な状態へ制御するよう連携して働くネットワーク構造になっている。研究目的は、大規模ネットワークとして表現される世界の理をデータから理解し、その振る舞いを思いのままに操ることで人間と機械を含む世界との調和を促進することである。しかしながら、大規模ネットワークはその構造が複雑であるため、個々の構成要素の理解に基づいて集合全体を理解（知識・法則を獲得）して制御するボトムアップ型のモデルベース手法による解析・設計は困難となる。それに対し、データ駆動型のアプローチはデータから直接解析・設計が行えるため、複雑な系に対する有用な手段となる。本研究では、A. 人が機械を操る場合と、B. 機械による人への介入のそれぞれについて検討を行った。

[研究の内容, 成果]

A. 人が機械を操る

動作周期が異なる場合を前提としたデータ駆動設計法の研究を行った。具体的には Campi et al. (2002) が提案している Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) を用いて設計した。従来の VRFT は入出力周期が同一であることを前提としたシングルレート系に限定されていたため、入出力の更新周期が異なる二重レート系に適用できるよう VRFT を拡張した。機械が人に作用する系を考え、人への入力装置である機械の駆動周期が人の周期よりも短い系として設計した。本研究で検討した二重レートデータ駆動設計方法は従来の VRFT と同様に一組の入出力データから最適な制御器を最適設計することができほか、提案手法には以下の利点がある。

1. 制御器設計用データはシングルレート系でも二重レート系でもどちらでもよい
2. サンプル点間の入力変動に起因するサンプル点間の振動を抑制することができる
3. 参照モデルへの追従性能と入力変動のトレードオフ設計が可能

一つ目の利点が示すのは、既存の制御系がシングルレート系である場合、二重レート系設計用に別途制御データを用意する必要がないこと

を意味している。もちろん、二重レート系のデータを利用しての最適化設計も可能であるため、柔軟性の高い設計方法である。二つ目については、機械的な高周波振動が人に及ぼす悪影響を低減できることを示している。三つ目については、本来の制御目的である目標値への追従性能と入力変動抑制は互いにトレードオフの関係にあるため同時に最適化できないものの、それらのバランスを考慮して設計できることを意味している。

先に検討した二重レートデータ駆動設計は制御ループが単一のシングルループ系に限定している。そのため、無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) の制御系のように制御ループが入れ子構造であるカスケード系には適用できない。そこで、二重レートシングルループ系のデータ駆動設計法を二重レートカスケード系へ拡張する方法について検討した。カスケード系に対するデータ駆動設計法は Formentin et al. (2011) が既に提案しているものの、やはりシングルレート系に限定した方法である。本研究ではこの先行研究を足掛かりに、外部ループに比べて内部ループの更新周期が早い二重レートカスケード系のデータ駆動設計法を新たに提案している。カスケード系では各制御ループに制御器が存在するが、本研究ではまず内部ループの制御器をデータから最適設計し、次に外部ループの設計段階では外部ループが制御する対象は先に設計した内部ループの制御器を含めて考える二段階設計である。さらに、提

案した設計方法を UAV の制御へ適用しシングルループ系と比較して制御性能が向上することを示すことができた。

B. 機械による人への介入

上述のように当初の研究目的であった二重レート系に対するデータ駆動設計法を確立し、さらに UAV へ適用してその有効性を示した。UAV の駆動周期は人の感覚に比べて短く、人の行動周期で決定される制御目標を UAV の早い周期で実現できているが、これらの研究成果からさらに踏み込み、人と機械の相互干渉をより深いレベルで制御ができる可能性を見出した。そこで、人が機械を操る研究に続いて機械 (エルゴメータ) が直接的に人へ介入する制御) について検討した。

図 1 に示す実験環境では、エルゴメータが提供する人への運動負荷を調整することで、人の心肺機能や運動機能を改善することができるが、負荷を上げすぎるとかえって悪影響を与えかねない。そのため、必要な運動強度を安全に実現できるよう負荷を適切に制御する必要がある。負荷を調整する制御器の設計は、Hunt et al. (2019) らによって提案されているが、負荷の変動から心拍数の変動の動特性を表す数式モデルに基づくモデルベース設計法である。ここで、人の運動に対する数式モデルは個人ごとに異なり、また、運動環境によっても変化するため、個人の状況に応じて数式モデルを導出する必要がある。しかし、モデリングの作業が必要であ

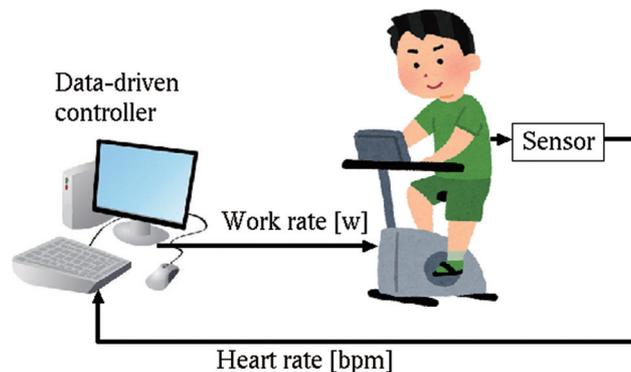


図 1 機械による人への介入の実験図

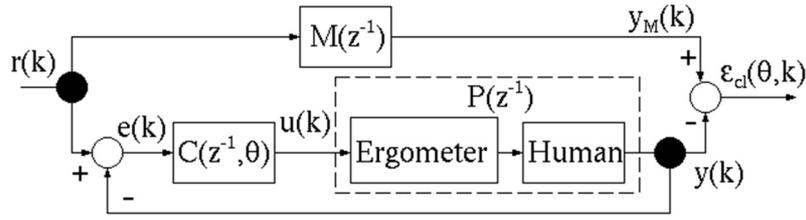


図2 制御系のブロック線図

りまた専門知識を必要とするため、各人毎のモデリングは一般には困難である。そのため、現実的には平均的な人物モデルを利用して設計することが想定される。それに対し、データ駆動設計であればモデリングが不要でデータから制御器を直接最適設計できるため個人ごとに最適な運動環境が提供できると考えられる。

本研究では図2に示すモデル参照問題に基づいて制御器を設計した。ここで、 $P(z^{-1})$ はエルゴメータと人の両者を合わせた動特性を表す伝達関数であり、 $y(k)$ はセンサーで計測された心拍数である。目標心拍数 $r(k)$ との誤差 $e(k)$ を用いて制御器 $C(z^{-1}, \theta)$ により仕事率 $[w]$ (負荷) である $u(k)$ が決定される。ここで、 θ は制御器パラメータであり、運動データから被験者にとって最適な負荷を与えるよう設計する必要がある。制御目的は理想の過渡応答を示す参照モデル $M(z^{-1})$ へ目標心拍数を印加した応答 $y_M(k)$ へ計測した心拍数が一致させることである。そのため、最適化すべき目的関数は以下である。

$$J_{MR}(\theta) = \left\| \left(M(z^{-1}) - \frac{P(z^{-1})C(z^{-1}, \theta)}{1 + P(z^{-1})C(z^{-1}, \theta)} \right) W(z^{-1}) \right\|_2^2 \quad (1)$$

ここで、 $W(z^{-1})$ は重みパラメータである。しかしながら、この目的関数には制御対象である $P(z^{-1})$ が含まれるモデルベース設計となることから、被験者毎の数式モデルが必要になってしまう。そこで、本研究では(1)式に代わってVRFT手法を用いて以下を考える。

$$J_{VR}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (L(z^{-1})u(k) - C(z^{-1}, \theta)L(z^{-1})(\bar{r}(k) - y(k)))^2 \quad (2)$$

$$\bar{r}(k) = \frac{1}{M(z^{-1})} y(k)$$

(2)式は数式モデルは不要であり、運動データから構成されるため、この目的関数を最小化する制御器パラメータを求めれば、運動データから被験者にとって最適な制御器設計が実現できる。

以上の設計方法を利用して様々な年齢層の被験者に対して実験を行った。実験結果については「成果の発表、論文等」24と25を参照頂ければ幸いである。

[今後の研究の方向、課題]

エルゴメータを利用した機械による人への介入は健康者の健康寿命延長をはじめ、医療現場でのリハビリテーションやアスリートのトレーニングなど様々な場面で有用であると考えられる。今後は、上記への展開を通じて人と機械のさらなる調和を目指したい。

[成果の発表、論文等]

[学術雑誌 (査読有)]

1. Takao Sato, Yuta Sakai, Natsuki Kawaguchi and Akira inoue: Data-driven Control for Multi-Rate Multi-Input/Single-Output Systems, ISA Transactions, Vol. 126, pp. 254-262, 2022.
2. Takao Sato, Yuta Sakai, Natsuki Kawaguchi and Orlando Arrieta: Dual-Rate Data-Driven Virtual

- Reference Feedback Tuning: Improvement in Fast-Tracking Performance and Ripple-Free Design, IEEE Access, Vol. 9, pp. 144426-144437, 2021.
3. Ryota Yasui, Natsuki Kawaguchi, Takao Sato and Akira inoue: Intersample Optimization in a Sampled-data Control System Using the Redundancy of a Dual-rate System. Journal of The Franklin Intsitute (Elsevier), Vol. 358, No. 8, pp. 4483-4502, 2021.
 4. Ryota Yasui, Natsuki Kawaguchi, Takao Sato, Nozomu Araki and Yasuo Konishi: Steady-state Dual-rate Open-loop Transfer Function Model-based Ripple-free Design, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering (Wiley Inter Science), Vol. 16, No. 10, pp. 1435-1437, 2021.
 5. Takao Sato, Ryota Yasui and Natsuki Kawaguchi: Add-on Type Data-Driven Ripple-Free Dual-Rate Control Design Based on the Null Space of Steady-State Step Responses, Machines, Vol. 10, No. 5, pp. 1-14, 2022.
 6. Takao Sato, Yuta Sakai and Natsuki Kawaguchi: Data-driven Control of Temporally and Spatially Redundant Systems, IFAC-PapersOnLine, Vol. 55, No. 12, pp. 616-620, 2022.
 7. Yuta Sakai, Natsuki Kawaguchi, Takao Sato and Orlando Arrieta: Data-driven Dual-rate Cascade Control and Application to Pitch Angle Control of UAV, Asian Journal of Control, Vol. 25, No. 1, pp. 54-65, 2023.
 8. 川口夏樹, 渡辺健太, 荒木 望, 佐藤孝雄, 黒田雅治: 1 自由度ツインロータドローンモデルに対する適応分配器を用いた推力ノルム最小化制御, 電気学会論文誌 C, Vol. 143, No. 3, pp. 242-249, 2023.
 9. 酒井裕太, 川口夏樹, 佐藤孝雄: データに基づく応答予測と制御器調整: 参照操作量の提案, システム制御情報学会論文誌, Vol. 36, No. 4, 2023.
- 「国際会議 (査読有)」
10. Yuta Sakai, Natsuki Kawaguchi and Takao Sato: Quantitative Evaluation of Single-rate and Dual-rate Control in Discrete and Continuous Domains, SICE Annual Conference 2021 (Sophia University, Tokyo, Japan), pp. 1157-1159, 2021.
 11. Takao Sato, Shinpei Ogawa, Natsuki Kawaguchi: Daul-rate System Design Using Temporal Rudandancy, Asian Control Conference 2022 (International Convention Center Jeju, Jeju, Korea), pp. 1270-1271, 2022.
 12. Saeri Suda, Yuta Sakai, Natsuki Kawaguchi and Takao Sato: On Data-driven Control Design of Plants with Temporal Redundancy: a Comparative View, SICE Annual Conference 2022 (Kumamoto-Jo Hall, Kumamoto, Japan), pp. 276-277, 2022.
 13. Takao Sato and Natsuki Kawaguchi: Dual-rate Data-driven Design in the Time Domain, 2022 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (Toyama University, Toyama, Japan), pp. 246-251, 2022.
 14. Tomonori Yao, Natsuki Kawaguchi and Takao Sato: Data-driven Control Experiments of a Quadrotor Drone, International Conference on Artificial Life and Robotics (B-con plaza, Beppu, Japan), pp. 200-204, 2023.
- 「国内会議 (査読無)」
15. 佐藤孝雄: 多層循環システムのデータ駆動設計: 産業, 自然環境, 生命, 社会, 兵庫県立大学知の交流 2021 (web, 姫路市, 兵庫県), 2021.
 16. 酒井裕太, 川口夏樹, 佐藤孝雄: 非一様入力マルチレート系のデータ駆動制御, 第 64 回自動制御連合講演会 (web, 京都市, 京都府), pp. 221-228, 2021.
 17. 八尾知典, 渡辺健太, 酒井裕太, 川口夏樹, 荒木望, 佐藤孝雄: データに基づくドローンの飛行制御, 電気学会研究会資料 制御研究会 (兵庫県立大学, 姫路市, 兵庫県), pp. 85-88, 2022.
 18. 酒井裕太, 川口夏樹, 佐藤孝雄: マルチレートデータ駆動設計を用いた DC モータの角速度制御, 電気学会研究会資料 制御研究会 (兵庫県立大学, 姫路市, 兵庫県), pp. 55-61, 2022.
 19. 永尾賢太, 田中孝也, 川口夏樹, 佐藤孝雄: VRFT を用いたマルチエージェントシステムの合意制御, 電気学会研究会資料 制御研究会 (兵庫県立大学, 姫路市, 兵庫県), pp. 33-36, 2022.
 20. 須田さえり, 酒井裕太, 川口夏樹, 佐藤孝雄: 冗長回転系の二重レートデータ駆動設計, 計測自動制御学会 第 9 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (web), 3G2-1, 2022.
 21. 酒井裕太, 須田さえり, 川口夏樹, 佐藤孝雄: データ駆動型二重レート制御器設計, 第 66 回システム制御情報学会研究発表講演会 (京都リサーチパーク, 京都市, 京都府), pp. 911-912, 2022.
 22. 八尾知典, 川口夏樹, 佐藤孝雄: モーションキャプチャを利用したドローン高度のデータ駆動型制御, 第 25 回画像の認識・理解シンポジウム (アクリエ姫路, 姫路市, 兵庫県), IS2-84, 2022.
 23. 八尾知典, 佐藤孝雄, 川口夏樹: FRIT によるドローンの高度制御, 電気学会 電子・情報・システム部門大会 (広島大学, 東広島市, 広島県), pp. 354-357, 2022.
 24. 西野智香, 川口夏樹, 小橋昌司, 室谷樹一郎, 木村雄一, 水庫 功, 森 寿仁, 内田勇人, 佐藤孝雄:

- エルゴメータを用いたデータ駆動型心拍数制御, 電気学会研究会資料 制御研究会 (web), 2023.
25. 西野智香, 川口夏樹, 小橋昌司, 室谷樹一郎, 木村雄一, 水庫 功, 森 寿仁, 内田勇人, 佐藤孝雄: 心拍数の自動制御——個人のデータに基づく設計, 第67回システム制御情報学会研究発表講演会 (京都テルサ, 京都市, 京都府), 2023.
- [チュートリアル講演]
26. 佐藤孝雄: 「OS チュートリアル講演」二重レート系におけるサンプル点間振動の抑制, 第65回自動制御連合講演会 (宇都宮大学, 宇都宮市, 栃木県), pp. 1278-1281, 2022.
- [受賞]
27. Takao Sato and Natsuki Kawaguchi: Best Paper Award, Dual-rate Data-driven Design in the Time Domain, International Conference on Advanced Mechatronic Systems (Toyama University, Toyama, Japan), 2022.