

大学発アーバンイノベーション神戸 研究成果報告書



大学発アーバンイノベーション神戸
University's Urban Innovation Kobe

研究課題名：心と体の制御によるウェルビーイング：健康寿命を気持ちよく延伸

研究期間：2022年4月～2024年3月

交付決定額(研究期間全体)：5,000千円

申請区分：企業テーマ提案型
課題番号：A22304

研究代表者：兵庫県公立大学法人 兵庫県立大学 工学研究科
教授 佐藤 孝雄

1. 研究成果の概要

一般に運動機能や心肺機能等は個人毎に異なり、また、性別や年齢等にも大きく影響する。本研究では、特性が異なる個人毎に最適な運動を提供する方法について検討した。具体的には、個人の運動データに基づいて最適設計を行うことで、生理的反応をフィードバックする運動機器を新たに開発した。健康寿命の延伸に必要とされる運動強度は個人ごとに異なるが、運動負荷から生理現象までの時間的な応答特性は個人毎に異なる。そのため、本研究では個人ごとに最適な運動負荷を自動的に実現する設計方法について検討した。主として個人の状況に応じて運動機器の負荷を適切に自動制御してふさわしい運動強度を提供する方法を新たに提案した。これにより、体の健康だけでなく心の穏やかさも保つことが可能となる。

2. 研究成果の学術的意義や社会的意義

健康寿命延伸のために必要な運動強度は様々な要因で個人ごとに異なるが、現時点では個人ごとに運動時の負荷を調整することは専門家による補助が欠かせない。これに代わる方法として装置の自動化が挙げられるが、従来研究ではモデルベース設計であった。それに対して、本研究では、運動負荷から生理現象までの時間的な個人毎に異なる特性を数式表現するためのモデリングと呼ばれる作業が不要な方法を提案している。

3. 研究開始当初の背景

単に寿命を延伸するだけでは幸福な人生を送れるとは限らず、怪我・病気等の要因によって医療や介護が必要な状態になってしまうと、その個人にとっては経済的な負担が大きくなるとともに、社会全体では医療・社会保障費が増加することとなる。健康上の問題によって日常生活が制限されずに生活できる機関として世界保健機構は健康寿命を提唱している。このことから、寿命の延長に伴う医療費や介護費の増加を抑制する方法として健康寿命の延伸が考えられる。

適切な強度で運動を行えば健康寿命を延伸することができ、また運動強度は心拍数に関連する。そのため、専門家を有する機関などで心拍数を指標とした運動を行えばよいのであるが、一般にはどの程度の運動が適切な心拍数を実現するのかは分かりづらい。そこで、専門的な知識を必要とせず適切な運動強度を実現することが求められている。

4. 研究の目的

運動時の負荷を自動的に調整する装置を開発することで、個人ごとに必要とする運動強度を提供することを目的として研究活動を行った。具体的には指定する運動強度の実現を目的として、運動量（仕事率）を自動的に調整することで心拍数を設定した目標心拍数に維持する方法について研究した。仕事率を調整する制御器の設計に関し、従来の研究[引用文献1-3]では仕事率と心拍数の関係を表す伝達関数に基づいて設計していた。そのため、モデリング作業が必要であり、またモデル化誤差の影響で性能が劣化する可能性があった。それに対し、運動時のデータから直接制御器を設計すれば、モデリング作業は不要となり、かつモデル化誤差の影響を削減することが可能となる。しかしながら、これまでデータ駆動設計による心拍数制御の研究はなされていない。そこで、本研究では運動データから設計した制御器を用いて心拍数を制御する方法について検討した。さらに、ストレス軽減を目的とし、心拍変動から自律神経活動指標を制御することでリラックス状態を実現する方法についても検討した。

5. 研究の方法（1）

3.1. 設計方針

図1に示すモデルベース設計法は被験者の動特性を表す数式モデルが必須となる。図中のWR, HR, THRはそれぞれWork Rate, Heart Rate, Target Heart Rateの頭文字をとったものである。従来の研究では、数多くの特性を示すモデルの中から代表的な一つのモデルを選定して設計されている。しかし、

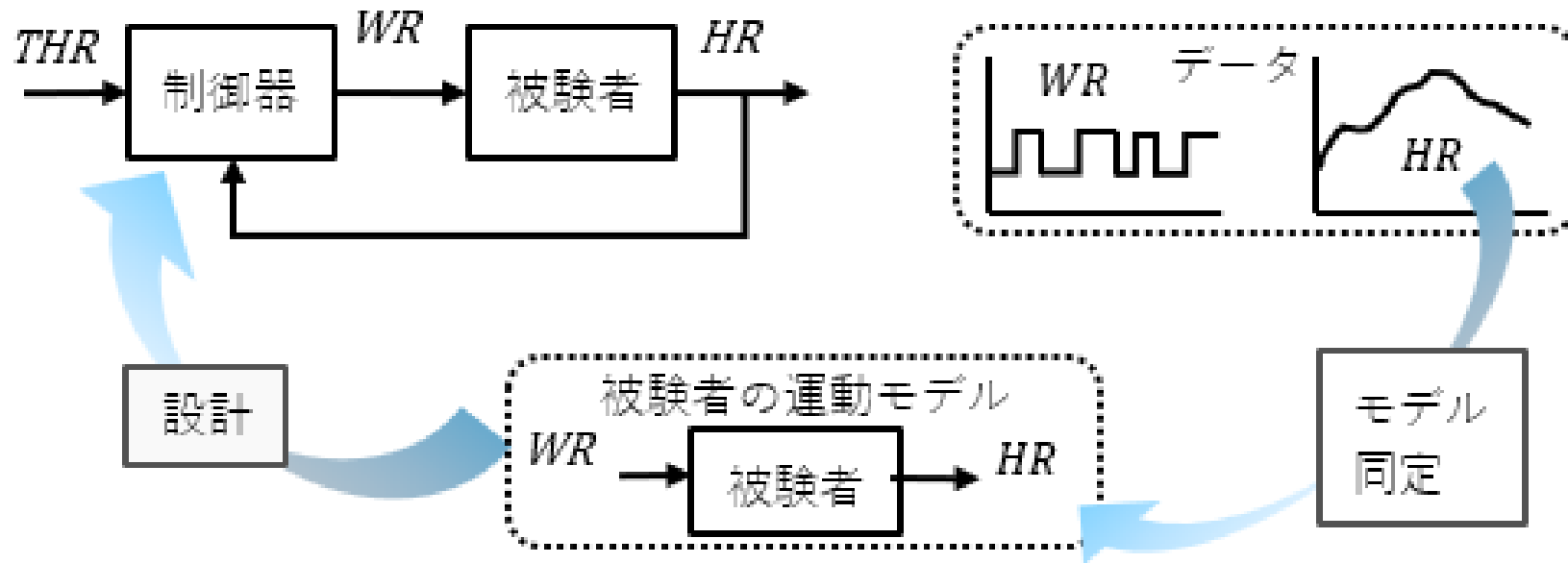


図1. モデルベース設計

5. 研究の方法 (2)

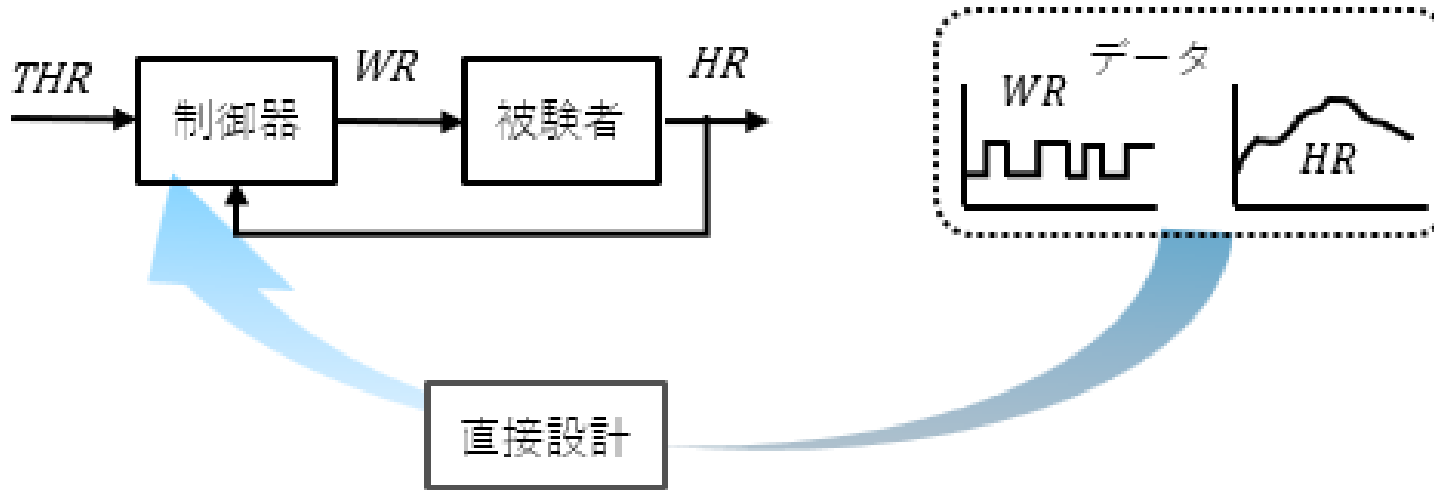


図 2. データ駆動設計

モデルは被験者毎、更にその被験者の状態によっても変化する。そのため、本来は被験者やその状態に応じて再度モデルを求めることが必要となるが、モデルの再同定は大変な労力・手間と共に専門知識が必要である。このことから、大多数の被験者が利用できるように調整された制御器が利用され、個人ごとの最適化はなされていない。そこで本研究では、図2に示すようモデルを利用せず個人の運動データから直接最適設計を行った。

5. 研究の方法(3)

3.2. 設計方法

具体的な設計方法について述べる。運動負荷 $u(k)$ から心拍数 $y(k)$ への動特性を表す伝達特性を次式とする。

$$P(z^{-1}) = \frac{Y(z^{-1})}{U(z^{-1})}$$

ここで、 $Y(z^{-1})$ と $U(z^{-1})$ はそれぞれ $y(k)$ と $u(k)$ の z 変換である。また、 z^{-1} は遅れ演算子である。次に、 $u(k)$ は次式によって決定される。

$$\begin{aligned} u(k) &= C(z^{-1}, \theta) e(k) \\ C(z^{-1}, \theta) &= b(z^{-1})^T \theta \\ e(k) &= r(k) - y(k) \end{aligned}$$

5. 研究の方法(4)

ここで、 $r(k)$ は設定値である。 $b(z^{-1})\theta$ はそれぞれ補償器 $C(z^{-1}, \theta)$ の構造とそのパラメータを表している。パラメータ θ は以下の評価関数の最小化に基づいて決定される。

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

ここで、 $M(z^{-1})$ は参照モデルであり、制御したい量がこの特性に追従させることが設計目的となる。上記に表す表関数では、被験者の動特性を表す $P(z^{-1})$ モデルが含まれているため、上式はそのままでは最適化することは困難である。そこで、運動データから直接制御器を最適設計した。

被験者のデータを用いて設計する方法を利用した実験を行った。ただし、実験に先立ち、兵庫県立大学大学院工学研究科人を対象とする研究に関する倫理審査委員会から承認を得ている。被験者は基礎疾患などのない神戸市や姫路市等の20～50歳の男女である。

実験手順

- 1：実験のボランティアを募集し、自ら参加の意思を示した方が対象
- 2：問診を行い安静時の心拍数などを計測する
- 3：初期制御器を用いて運動実験を行う
- 4：3の実験結果より、個人ごとの特性に応じて制御器を最適設計する
- 5：4で設計した制御器を用いて運動実験を行う
- 6：3と5の結果から提案手法の有効性を評価する

具体的な個別の実験結果などは個人情報に関わるためここでは省略するが、全体的な評価結果は以下の通りとなった。

- 改善：大多数の被験者で最適設計の前後で評価が改善された。
- 維持：初期制御器と最適制御器が近い場合、最適設計前後で評価結果のほとんど変化しない結果がわずかにあった
- 悪化：最適設計後の評価が初期制御器の利用時よりも悪化する場合がごくわずかではあるが確認された。

ここで、悪化した場合であるが、評価結果が維持された場合と同様に最適設計前後で制御器があまり変化しなかった場合であり、絶対評価としては評価が悪化したが、相対的にはそれほど変化しない結果であった。

以上から、全ての被験者で制御結果が大幅に悪化することなく、大多数の被験者では評価結果が改善される結果となったことから、各被験者の運動データを用いて設計する本研究の方法は有効であることが確認された。

1. K.J. Hunt and C.C Hurni: Robust control of heart rate for cycle ergometer exercise, Medical & Biological Engineering & Computing, Vol. 57, No. 11, pp.2471-2482 (2019)
2. H. Wang and K.J. Hunt: Heart rate control using first- and second-order models during treadmill exercise, Systems Science & Control Engineering, Vol. 9, No. 9, pp. 651-662 (2021)
3. A. Sporri, H. Wang and H. Hunt: Heart Rate Dynamics Identification and Control in Cycle Ergometer Exercise: Comparison of First- and Second-Order Performance, Frontiers in Control Engineering, Vol. 3, No. 5, pp. 894180 (2022)