

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K15018

研究課題名（和文）周期運動に対するパワーアシスト制御：ヒトを含めた人間-機械システム全体の最適化

研究課題名（英文）Power assisting control for periodic motions: optimization of the man-machine system including humans

研究代表者

畑田 和良 (Hatada, Kazuyoshi)

福岡大学・工学部・助教

研究者番号：10709356

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、自転車ペダリング運動を例に、エネルギー効率の意味で最適であり、かつ、走行状態の変動にロバストなアシスト制御法の確立を検討した。まず、データ収集ならびに検証実験用のアシスト自転車の製作を行なった。この検証用自転車は、ペダリングトルク・クランク角・車輪回転角が計測でき、ペダリングトルクのアシスト機構を有している。これに加え、負荷の調整機構を有している。また、単純適応制御の応用により、ヒトが負荷の変動の影響を受けずに、かつ、車輪回転速度の脈動を抑制する高効率アシスト制御法を提案した。検証用自転車により取得したデータに基づく数値シミュレーションにより、提案法の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した、自転車の走行時の状況の変化にロバストなアシスト制御法は、制御工学の実社会への応用という面で、学術的な意義がある。また、エネルギーの有効活用や自転車走行時の安全性の確保という面で、社会的意義がある。さらに、本研究で作製した実験用アシスト自転車は、駆動力のアシストに関する検証だけではなく、ヒトの姿勢とペダリングトルクの加えやすさに関する検証にも使用できる。これは、ヒトの上下肢の負傷の減少にも寄与することが期待できるという面でも、社会的な意義を有する。

研究成果の概要（英文）：In this research, energy-efficient power assisted method for electric assisted bicycles which robust against variation of road condition was investigated. During the period of the research topic, an assisted bicycle for data collection and verification experiment was made. The experimental bicycle is capable of measuring pedaling torque, crank angle, and wheel rotation angle, and is equipped with a pedaling torque assist mechanism. In addition, The experimental bicycle has a load adjustment mechanism and a motor driven saddle height adjustment mechanism. Furthermore, energy-efficient power assisting methods for electric bicycles which robust against variation of road condition was proposed by applying simple adaptive control. The effectiveness of the proposed method were confirmed through numerical simulations based on data obtained from the experimental bicycle.

研究分野：制御工学

キーワード：パワーアシスト制御 周期運動 電動アシスト自転車

1. 研究開始当初の背景

我が国の少子高齢化の急激な進行はよく知られた事実であり、2012 年度には人口減少の局面に突入した。この社会的背景を受け、労働力の確保や生活の質(QoL)の向上を目的としたパワーアシストの研究が進んでいる。例えば、工場内での重量物の搬送をアシストする天井クレーンや介護施設での移乗介助をアシストする装置など、多数の事例が報告されている。

この社会的な背景を受け、自転車のペダリング運動を例に、概ね周期的なヒトの運動に対してエネルギー効率の意味で最適となるパワーアシスト制御の研究が進められている。自転車のような粘性摩擦の影響を受ける移動体は、速度の脈動を増幅するような従来の比例制御に基づくアシスト制御法を適用することはエネルギー効率の面で不利となることがわかっている。この状況に対して、エネルギー効率の面で最適となるアシストは、ペダリングトルクの谷間を補うようにアシストトルクを加え、速度の脈動を抑制することであると先行研究で示されている。

これまでの研究では、ペダリングトルクの脈動の影響を抑制することに焦点を当て、局所的な最適化がおこなわれている。その一方で、アシスト機器が人間-機械システムである以上、移動速度の脈動が抑制できていたとしてもヒトに大きな負荷がかかっている意味がない。つまり、エネルギー効率の意味で最適化されたアシストが、人間-機械システム全体にとって最適な方法とは限らないという問題がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、自転車本体の移動に焦点をあてるのではなく、人間に加わる負荷を含めて最適化することである。従来のアシスト機器では、ヒトが加えた力の計測値を用いてアシスト力を決定しており、運動時の姿勢や負荷といったヒトの状態が考慮されていない。この結果、ペダリング時に不要な筋肉への負荷も大きくなる。この問題に対して、自転車や人間の状態に関係なく、ヒトと自転車の両方によって高効率なアシスト制御法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するための研究方法は以下の通りである。

① データ収集ならびに検証実験用アシスト自転車の製作

データ収集ならびに実験に用いる自転車(図1)の製作に着手する。この車両は、サドル位置の電動調整機構を有する。また、ペダリングトルクとクランク角の計測機構を取り付ける。これにより、ヒトの姿勢ならびにクランク角

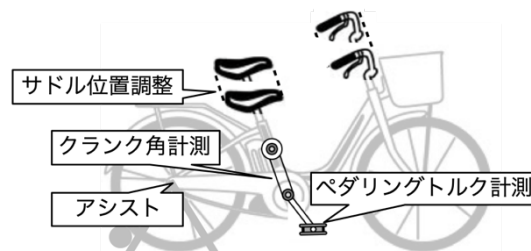


図 1 実験用アシスト自転車 (模式図)

とペダリングトルクの数値が取得できるようになる。さらに、搭載されたモータによってペダリングトルクがアシストされる。

② 目的に応じたアシスト制御法の確立

エネルギー効率の最適化のために、自転車の走行速度の脈動を抑制する制御を考える。ここでは、ヒトが加えるペダリングトルクを周期外乱とみなし、この影響を抑制する制御法の適用を検討する。これに加え、自転車駆動系モデルのパラメータが変動しても、ヒトの負荷が変わらないアシスト制御法の実現を考える。

4. 研究成果

本研究の目的を達成するため、下記の方法により研究を進めた。

① データ収集ならびに検証実験用アシスト自転車の製作

福岡市にある機械加工業者の協力のもと、図2の実験用アシスト自転車を製作した。本実験機は被験者が転倒することがないように安全性を考慮し、スピンバイクに似た構造となっている。本実験機では、ペダリングトルク・クランク角・前輪回転角の計測が可能である。また、サドルの高さの電動調整機構を有している。さらに、クランクと前輪の間に位置するシャフトにモータを接続しており、ペダリングアシスト制御の実験が可能となっている。実験時には、前輪に押し付けているフェルトの圧力を変更することで、負荷の調整が可能である。

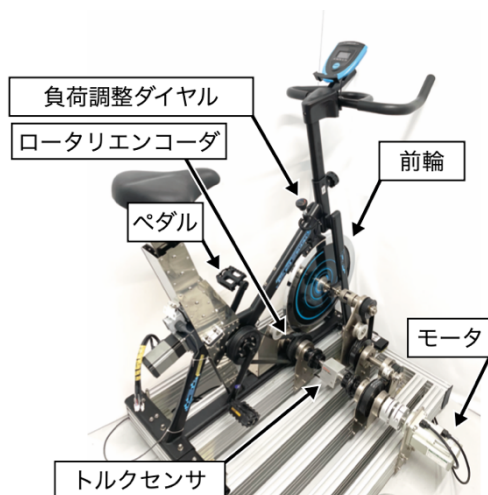


図2 実験用アシスト自転車

本実験機により、ペダリングトルク・クランク角が取得できるようになり、その結果を組み合わせることで、クランク角とペダリングトルクの関係が可視化できるようになった。実験用アシスト自転車による測定結果を図3に示す。

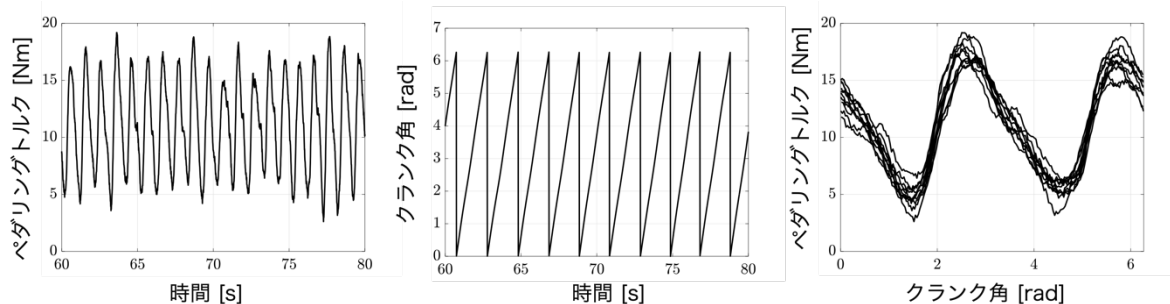


図3 実験用アシスト自転車による測定結果

② 目的に応じたアシスト制御法の確立

自転車の走行速度へのペダリングトルクの脈動の影響を抑制することと、自転車駆動系の変動によるヒトへの負荷の変化を抑制することを同時に実現するために、適応制御系構成がきわめて簡単な単純適用制御の応用を検討した。単純適用制御を応用したアシスト制御システムの構成を図4に示す。本提案アシスト制御システム

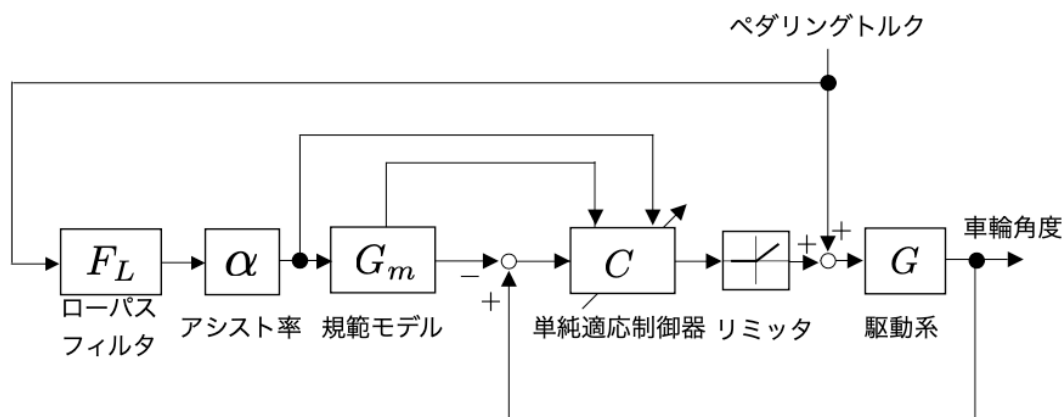


図4 単純適用制御を応用した高効率アシスト制御システム

の概要は次の通りである。まず、規範モデルは負荷が軽い状況で同定した駆動系のモデルとする。規範モデルの入力は、ローパスフィルタを通過させることで得たペダリングトルクの直流成分にアシスト率を乗じた信号とする。本システムの出力は車輪の角度であり、駆動系伝達関数の相対次数が2となることから、単純適応制御器は並列フィードフォワード補償器を含む構造となっている。アシストモータの逆回転を防ぐために、単純適応制御器の出力はリミッタを通過する。リミッタを通過したアシストトルクはペダリングトルクと合算され、自転車駆動系へ入力される。

本提案アシストシステムの有効性を数値シミュレーションにて検証した。数値シミュレーションには、事前に実験用アシスト自転車を用いて取得したペダリングトルク(図5)を用いた。検証にあたって、規範モデルは負荷が軽い時のモデル(軽負荷)とした。また、駆動系モデルは軽負荷時と負荷が重い時のモデル(重負荷)の二つのケースとしている。さらに、アシスト比率は1.5とした。

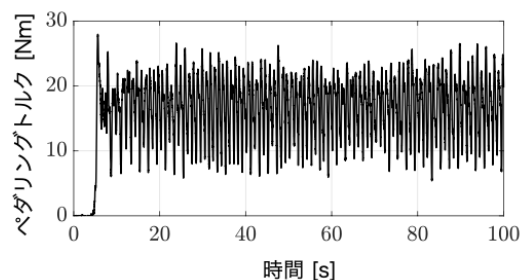


図5 ペダリングトルク測定値

両ケースにおける数値シミュレーションで、図6の車輪角速度の時間応答を得た。なお、比較のために両ケースにおけるアシストなしの場合の応答も図6に示している。アシストなしでは、軽負荷の場合と比べて重負荷の場合に速度域が低下していることがわかる。その一方で、提案アシスト制御法では、車輪角速度の平均速度

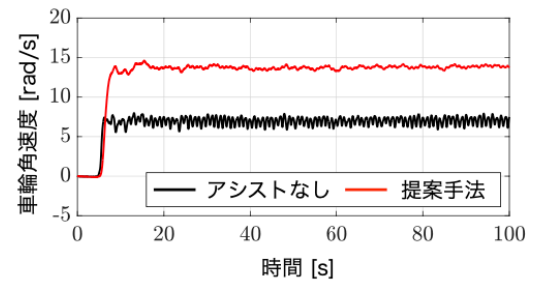
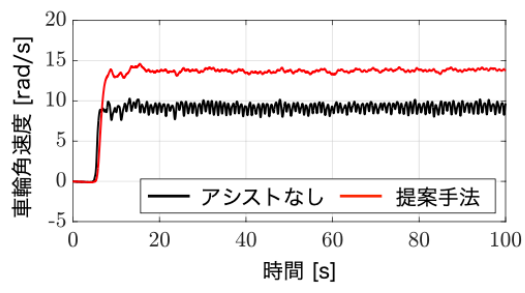


図 6 数値シミュレーションの結果

(a) 軽負荷の場合

(b) 重負荷の場合

をあらわす直流成分が増幅されつつ脈動の抑制が達成できていること、駆動系の負荷に依らず、同一のペダルダリングトルクで同一の車輪角速度が得られることが確認できた。これは、路面状況や車体の状況が変化しても、その影響を受けることなく走行できるアシスト制御が達成できていることを示している。なお、出力を車輪角速度とし、駆動系の相対次数が1次で並列フィードフォワード補償器を有しない構造とした場合でも同様の数値シミュレーション結果が得られている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 畑田和良, 平田健太郎
2. 発表標題 単純適応制御に基づく速度脈動を抑制するペダリングアシスト制御
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Makoto Shinpou, Kentaro Hirata, Yukinori Nakamura, Kuniyoshi Okano and Kazuyoshi Hatada
2. 発表標題 Energy-efficient bicycling with passive mechanical network
3. 学会等名 The 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuyoshi Hatada and Kentaro Hirata
2. 発表標題 Power Assisting Control System for Electric Bicycles Based on Simple Adaptive Control
3. 学会等名 IEEE/IFAC 9th 2023 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------