

走行環境を考慮した電動自転車のパワーアシスト制御

Independent Power Assisted Control from Environment Condition for Electric Bicycle

80717967 山口高志 (Takashi Yamaguchi) Supervisor: 村上俊之 (Toshiyuki Murakami)

1 序論

自転車は手軽で便利な乗り物として私たちの生活に広く浸透している．近年では環境への負荷が少ない交通システムとして大きな注目を集め、交通手段としての有用性が改めて見直されている．しかし、自転車にもいくつか課題があり、その1つがペダリング運動である．ペダリングはリハビリやトレーニングの観点から言えば有用であるが、長距離走行や坂道走行時には過負荷になり得るため、事故が発生する可能性が高くなる．これは、今後の高齢化社会において自転車がさらなる広がりを見せるにあたり障害となる問題である．このような課題を解決するため、人の駆動力をトルクセンサで検出し、電動機を用いて駆動力を補助する機能を備えた電動アシスト自転車が開発、販売されている．しかし、従来手法は踏力比例制御により力のアシスト比を一定に保つことに重みを置いていたため、走行環境によっては依然として過負荷になる可能性があった．そこで、本論文では新たな電動自転車のパワーアシスト制御法を提案する．提案手法は走行環境に依存することなく一定の操作性を得ることに重みを置いた制御系の設計をおこなう．さらに、力センサレスでパワーアシストシステムの実現を目指し、トルクセンサの機械的問題やコスト高といった課題からの逸脱を図る．本論文は、インピーダンス制御によるセンサレスパワーアシスト制御を提案し、従来手法との比較をおこなう．

2 実験システムのモデル化

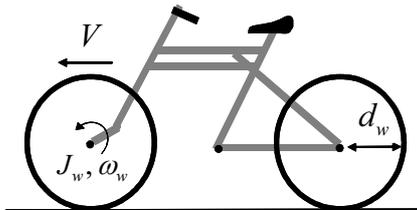


図 1: 自転車の側面図

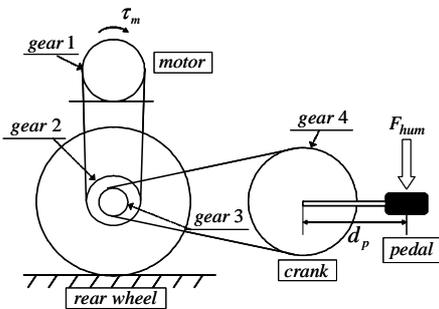


図 2: 駆動システムモデル

本研究にあたり、後輪上部に駆動モータを設置し、チェーンを介して後輪を駆動する機能を搭載したパワーアシスト自転車を作成した．後輪駆動型の自転車を使用することで、走行状態を推定することが可能となる．この自転車を図 1, 2 に示すよ

うにモデル化する．このときの駆動モータ周りの運動方程式を (1) 式に示す．

$$J\dot{\omega}_m + D\omega_m = \tau_m - \tau_{road} - \tau_{fric} + \tau_{hum} \quad (1)$$

ω_m はモータの角速度、 J 、 D は駆動システムの慣性および粘性係数を表す．右辺第 2 項は転がり抵抗や登坂抵抗といった走行抵抗、第 3 項はモータのクーロン摩擦、第 4 項は人の踏力による駆動トルクをそれぞれ表す．

3 制御系の設計

3.1 人の駆動トルク推定

力センサを用いないパワーアシスト制御系を設計するため、反力推定オブザーバ [1] を利用して人の入力トルク τ_{hum} の推定をおこなう．モータに加わる反力 τ_{reac} を次式で推定する．

$$\hat{\tau}_{reac} = \frac{K_{R1}}{s + K_{R1}} (\tau_m - J_n \dot{\omega}_m - D_n \omega_m) \quad (2)$$

ここで、 K_{R1} はローパスフィルタのカットオフ周波数を表し、 J_n 、 D_n は慣性および粘性のノミナル値である．反力として (1) 式の右辺第 2 項から 4 項までの影響が推定される．人のペダリング運動の入力周期は 1.6 ~ 2.6Hz 程度であるのに対し、走行抵抗の変動周期は十分に長い．よって、このオブザーバの出力にハイパスフィルタを介して人の入力成分 $\hat{\tau}'_{hum}$ を抽出する．さらに、それを擬似微分し、極小値 $\min(\hat{\tau}'_{hum})$ を変動周期毎に求めることで、人の入力トルクは次式で推定される．

$$\hat{\tau}_{hum} = \hat{\tau}'_{hum} - \min(\hat{\tau}'_{hum}) \quad (3)$$

3.2 パワーアシスト制御

インピーダンス制御に基づいた速度制御型のパワーアシストシステムの設計をおこなう．推定入力トルクに基づき速度指令値 ω_{imp} を算出することで、駆動システムはインピーダンスパラメータ J_{imp} 、 D_{imp} をもつ機械の挙動を模擬することができる．

$$\omega_{imp} = \frac{1}{J_{imp}s + D_{imp}} \cdot \frac{A\hat{\tau}_{hum}}{\tau s + 1} \quad (4)$$

ここで、慣性を持たせるために、可変時定数 τ の 1 次遅れ伝達関数を介した． τ は入力の立ち上がり時には小さく、減速時には大きな値に設定する． ω_m を ω_{imp} に追従させるために、モータは外乱オブザーバを用いた加速度制御をおこなう．これによりロバストな速度制御器を実現する．モータへの角加速度指令値は次式で与える．

$$\dot{\omega}_{ref} = K_v (\omega_{imp} - \omega_m) + \dot{\omega}_{imp} \quad (5)$$

外乱オブザーバより推定された外力 $\hat{\tau}_{dis}$ を用いて、モータへのトルク指令値は次式で与える．

$$\tau_m = J_n \dot{\omega}_{ref} + \hat{\tau}_{dis} \quad (6)$$

3.3 全体の制御系

本論文で提案する力センサレスパワーアシストシステムのブロック線図を図 3 に示す．

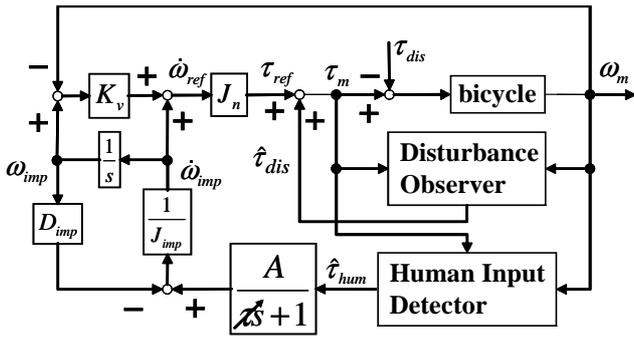


図 3: 制御システムのブロック線図

4 シミュレーション

提案手法の有効性を確認するため、シミュレーションをおこなう。人の入力は 1.3Hz の周期をもつ正弦波で与えられると仮定した。

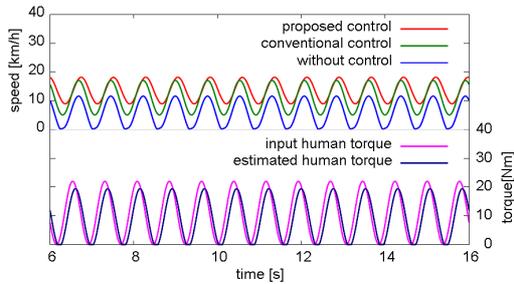


図 4: 各手法によるパワーアシスト制御

まず人の入力があるどのように推定され、パワーアシストシステムが実現されているか確認する。図 4 の下方に人の駆動トルクとその推定トルク、上方に同じ走行環境における制御を入れない場合と従来手法の踏力比例制御、提案手法の速度応答の違いを示す。これより、推定過程によるフィルタの影響により推定トルクは実入力よりピーク値が 88 % 減少し、0.06 秒の遅れがでていることがわかるが、推定器がうまく働いていることがわかる。これらは制御パラメータの設定により改善することが可能である。また、両手法ともに制御を用いることで速度が上昇し、パワーアシストが実現されていることがわかる。

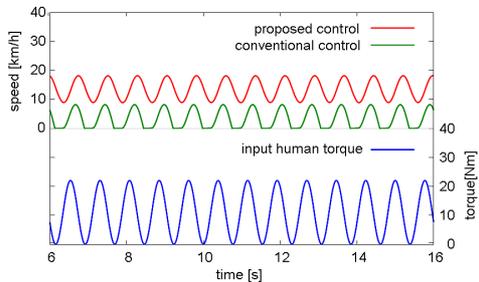


図 5: 重負荷環境による速度応答

次に、重負荷環境における従来手法と提案手法の速度応答の違いを比較する。図 5 に走行負荷を 2 倍にしたときの各手法の速度応答を示す。人の入力が変わらないため、従来手法では走行負荷が大きくなることより速度応答が減少しているのに対し、提案手法では速度応答に違いが見られないことがわかる。これより、提案手法では走行環境に依存せず一定の操作性が得られることがわかる。

5 実験

提案手法の有効性を確認するため、実験機を用いた実験をおこなう。ペダルに踏力計をとりつけ、人の入力の測定をした。リアルタイムでパソコンに自転車の速度を表示させ、被験者はそれを見て一定の速度で走行するようにした。ここでも従来手法との比較をおこなう。

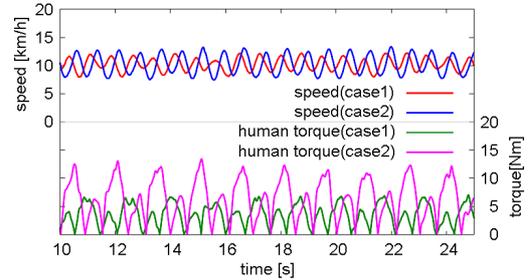


図 6: 従来手法

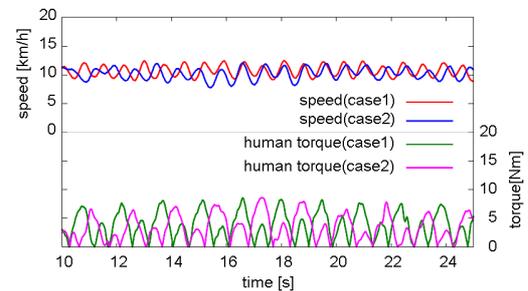


図 7: 提案手法

図 6 に従来手法、図 7 に提案手法の走行環境による速度応答および入力トルクの違いを示す。実験はローラ上を走行させ、case2 ではモータに 6.0Nm の走行負荷を擬似的に与えた。これは、体重 60kg の被験者が勾配 4 % の坂を登る際にかかる負荷トルクとほぼ同等の値である。従来手法の case2 では、case1 より入力トルクのピーク値が約 2 倍増えたのに対し、提案手法ではほぼ同じ入力で行走していることがわかる。そこで、次式を用いて 15 秒間の仕事を求めた。

$$E = \int_0^T \tau_{hum}(t)V(t)dt \quad (7)$$

5 つのサンプルの平均値を求めると、従来手法は case2 が case1 に比べ約 2.03 倍増えたのに対し、提案手法では 0.93 倍となり、走行環境が変わってもその仕事に変化があまり起こらないことがわかった。

6 結論

本論文ではインピーダンス制御に基づいた力センサレスパワーアシスト制御手法を提案した。速度制御ベース型のパワーアシストシステムを設計したため、走行環境が変わった場合でも一定の操作性を得ることをシミュレーションと実機実験により確認した。また、力センサを用いることなくパワーアシストシステムが実現できていることも確認した。

参考文献

- [1] 村上俊之, 中村亮, 郁方銘, 大西公平: “反作用力推定オブザーバに基づいた多自由度ロボットの力センサレスコンプライアンス制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 5, pp. 765-768, 1993
- [2] S. Oh and Y. Hori: “Generalized Discussion on Design of Force-sensor-less Power Assist Control”, Proc. of the 10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 492-497, 2008