

サーボブレーキを用いた足こぎ車椅子の操舵制御

Steering Control of Cycling Wheelchair by Using Servo Brakes

正 平田 泰久 (東北大) 正 小菅 一弘 (東北大) Eric Monacelli (ベルサイユ大)

Yasuhisa HIRATA, Tohoku University, hirata@irs.mech.tohoku.ac.jp
 Kazuhiro KOSUGE, Tohoku University, kosuge@irs.mech.tohoku.ac.jp
 Eric MONACELLI, UVSQ, eric.monacelli@uvsq.fr

In this study, we propose a steering control method for a cycling wheelchair. The commercially available cycling wheelchair is a pedal-driven system like a bicycle and the paraplegia and hemiplegia patients can move the wheelchair based on the pedaling force, if they can move their legs slightly by themselves. The user can also change the motion direction of the cycling wheelchair by using the steering handle. However, the right and left turnings are perceived differently while operating the steering handle and the steering operation is required a large torque because of the hardware problems of the cycling wheelchair. To overcome these problems, we propose a new hardware of the cycling wheelchair and its steering motion control method by using servo brakes. The proposed method is applied to the developed new cycling wheelchair and the experimental results illustrate the validity of the system.

Key Words : Cycling Wheelchair, Steering Control, Braking Control

1. はじめに

近年, 下肢に障害があっても自らの力でわずかに下肢を動作させることができる患者であれば使用できる Fig.1 に示すような足こぎ車椅子が販売されている [1]. これは自転車と同様の足こぎペダルが車椅子前方に付き, その足こぎの踏力を車輪に伝達することで移動を行う. 足こぎ車椅子は下肢のリハビリテーションでの利用はもちろんのこと日常生活での利用が期待されており, 下肢障害者の ADL(Activity of Daily Living) の向上が見込まれる.

現在市販されている足こぎ車椅子では, 下肢の運動によって駆動力を発生させることは比較的容易であるが, 運動方向を変更するための操舵特性に関しては改善すべき問題がある. Fig.1 に示すように足こぎ車椅子には後方に操舵輪が取り付けられており, その操舵輪角度はワイヤーを介して操舵ハンドルで操作する. しかし, これは一般の手こぎ車椅子とは異なる操舵方法となるため, 手こぎ車椅子に慣れた利用者にとってはその操作が難しく感じてしまう場合がある. また, その操舵には比較的大きな力が必要であるという問題もある. その他, 一般の車椅子と同様に介助者が後方から押すことで移動を支援する場合には, 常に搭乗者が操舵ハンドルで操舵輪を操る必要があり, 介助者だけの操作力で車椅子を自由に移動させることができない. また, 搭乗者がいない場合に介助者が車椅子を搬送するような状況では, 常に操舵輪を持ち上げて方向転換を行う必要がある.

市販されている足こぎ車椅子は, ペダルによる駆動力がチェーンを介して右車輪のみに伝達される. そのため, 右車輪が主に回転する左旋回は容易に行うことができるが, 右車輪近傍を回転中心とした旋回を行う場合には駆動力を伝えることができず, 結果的に右急旋回が非常に難しくなる. このため, 利用者は左右の回転特性が異なることで操作性が悪く感じてしまう.

そこで本研究では, このような操舵特性に関する問題を解決する新しい足こぎ車椅子システムを提案する. 具体的には Fig.1 に示すように現在の足こぎ車椅子の回転運動を実現するために用いられている操舵輪を取り外し, 左右車輪と複数のキャストによって支持される手こぎ車椅子と同様の構造とする. そして, 左右両輪にサーボブレーキを取り付け, そのサーボブレーキを適切に制御することにより, 利用者の意図した方向に運動を行うことが可能となるシステムを開発する.



Fig. 1 Cycling Wheelchair

2. 操舵輪を用いない足こぎ車椅子システムの開発

本節では, 後方の操舵輪を取り外し, 左右車輪のみで操舵する足こぎ車椅子システムを提案する. 従来の足こぎ車椅子のようにペダルからの駆動力が右車輪のみにしか伝達されない場合には, 車いすの回転運動を適切に制御することができない. そこで, ペダルからの駆動力をディファレンシャルギヤを用いて左右両車輪に分配することを考える. そして, 左右車輪に取り付けられたサーボブレーキを使うことによって各車輪に加わる走行抵抗を適切に制御することで, 操舵輪を用いなくても左右車輪に回転差を発生させ, 目的の方向に向きを変えるシステムを考える. 本研究では従来著者らが提案してきたパッシブロボティクスに基づくブレーキ制御手法 [2] を適用することで, 安全かつ低消費電力な足こぎ車椅子システムの開発を目指す.

ブレーキ制御によって回転方向を指定する際に, その指定方法はジョイスティックなど一般的なインタフェースを用いることで, 従来の力を要する操舵ハンドルを使うことなく, 容易に回転方向が指定できる. また, 人間の重心移動などで電動車いすを制御する研究が進められているが, このような方法を応用すれば, 左右の重心位置変動によって回転方向を指定することができ, 手を使わずに車椅子を利用することが可能となる. これは, 販売されている車椅子では実現されておらず, 移動中に両手が自由になることは, 車いすを用いながら手を使う作業を行う場合に大きな利点となる.

3. ブレーキを用いた操舵制御

本節では左右車輪のブレーキ力を制御することによりシステムの回転運動を制御することを考える. 利用者はペダルを回転させることによりディファレンシャルギヤを介して各車輪に等価な駆動力を発生させることができる. その等価に分配された駆動力をサーボブレーキからのブレーキトルクにより走行抵抗として与えることで, ディファレンシャルギヤにより左右車輪に速度差が発生する. ここでは各車輪にどのような走行抵抗を発生させるべきかについて考える.

車椅子の回転を制御するためには様々な制御が考えられるが, 本研究では現在市販されている操舵輪付きの足こぎ車椅子の操作性に近い運動特性を実現する. そこで, はじめに Fig.2 に示すような仮想操舵輪を持つシステムを考える. いま, 人間がペダルを漕ぐことにより車輪に駆動力を伝えると, その合力は人間の駆動力として f_h で表すことができる. また, 路面の状況によって車輪に発生する走行抵抗や坂道などで重力方向に加わる外力のために, 車いすの車軸中心にはある外力・外モーメント f_e, n_e が発生する.

いま, 実際に操舵輪がある場合について考えると, 人間からの駆動力および外力・外モーメントは, 操舵輪の中心において f_{sx}, f_{sy} で表される. ここで, x 軸方向は足こぎ車椅子の進行方向とすると, f_{sx}, f_{sy} は次式となる.

$$f_{sx} = f_h + f_e \quad (1)$$

$$f_{sy} = \frac{n_e}{r_{wb}} \quad (2)$$

ここで, r_{wb} は左右車輪の車軸中心から操舵輪中心までの距離を

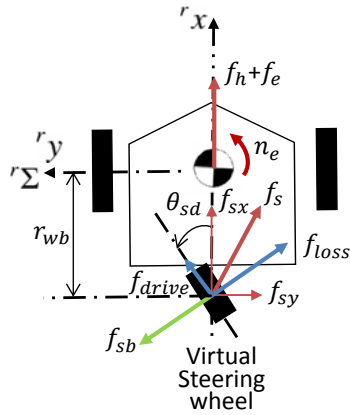


Fig. 2 Control of Cycle Wheelchair without Steering Wheel

表す。いま、操舵輪に加わる力を $f_s = [f_{sx} \ f_{sy}]^T$ とすると、この力は、操舵輪の方向によって f_{drive} と f_{loss} に分解される。すなわち、人間および外力によって発生する f_{drive} によって足こぎ車椅子は各車輪軸交点周りに駆動されることになる。ここで、操舵輪が車軸方向に滑ることがなければ、 f_{loss} は車輪と地面との摩擦力によって相殺される。それが結果として左右車輪の走行抵抗となり、ディファレンシャルギヤの特性によって生じる回転差でシステムが回転運動を行う。

本研究では操舵輪を取り外しているため、同じ場所に仮想操舵輪を定義し、そこに働く f_{loss} に対して反対方向にブレーキ力 f_{sb} を発生させることで結果的に操舵輪があるシステムと同等の運動特性を実現することを考える。すなわち、仮想操舵輪中心に働くブレーキ力 f_{sb} は、次式で表すことができる。

$$f_{sb} = -(f_{sx} \sin \theta_{sd} + f_{sy} \cos \theta_{sd}) \quad (3)$$

ここで、 θ_{sd} は車輪の目標操舵角度とする。そして、この f_{sb} を足こぎ車椅子の左右車輪軸中心周りのブレーキ力・ブレーキモーメント f_b, n_b に変換すると次式となる。

$$f_b = f_{sb} \sin \theta_{sd} \quad (4)$$

$$n_b = r_{wb} f_{sb} \cos \theta_{sd} + k_s (\theta_{sd} - \theta_s) \quad (5)$$

ただし、ブレーキモーメントに関しては、後述する外乱推定オブザーバーで正確に人間の駆動力 f_h および外力・外モーメント f_e, n_e が推定できない場合の推定誤差を考慮したフィードバック項を加えている。ここで、 k_s はフィードバックゲインを表し、仮想操舵輪角度 θ_s は次式で計算することができる。

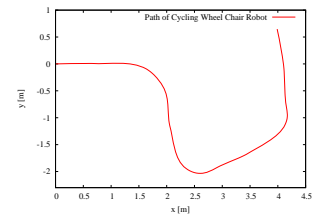
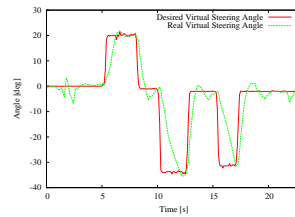
$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{r_{wb} \dot{\theta}}{\dot{x}} \right) \quad (6)$$

ただし、 \dot{x} は足こぎ車椅子の進行方向の速度、 $\dot{\theta}$ は足こぎ車椅子の回転角速度を表す。上式より導出されたブレーキ力・ブレーキモーメントを目標力としてサーボブレーキから出力すれば、足こぎ車椅子の回転運動が実現できる。

この手法を適用するためには以下の2つの点を考える必要がある。ひとつはペダル部や左右車輪部にトルクセンサを搭載しない限り、制御に必要な人間の駆動力 f_h および外力・外モーメント f_e, n_e を計測することができないことである。そこで本研究では外乱推定オブザーバーを利用することで人間の駆動力を推定する[3]。またもうひとつは、たとえ上式で目標力が導出されたとしても、ブレーキでシステムを制御する場合には、発生できる制御入力に制限が生じるという問題がある。そこで著者らが提案してきたブレーキ制御可能領域を用いた運動制御技術[2]を本システムにも適用することで、適切なブレーキ力・モーメントを出力する。

4. 操舵実験

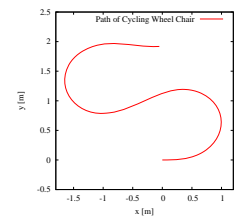
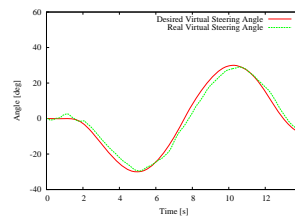
本節では、前節で提案した手法を用いた足こぎ車椅子の操舵実験の結果を示す。前節で提案した手法では、仮想操舵輪の目標角度を指定することにより、足こぎ車椅子の進行方向を変化させることができる。すなわち、ジョイスティックなどのインタフェースを用いて目標角度を指定すれば、利用者の意図した方向へ車椅子を動かすことができ、目標角度を環境に応じて設定すれば経路追従制御や障害物・段差回避制御が実現できる。



(a) Angle of Steering Wheel

(b) Path of Cycling Wheelchair

Fig. 3 Experimental Results of Manual Steering Control



(a) Angle of Steering Wheel

(b) Path of Cycling Wheelchair

Fig. 4 Experimental Results of Automatic Steering Control

はじめに、インタフェースを用いて利用者が直接仮想操舵輪の目標角度を指定することで意図した方向に旋回する実験を行った。インタフェースとしてはポテンシオメータを用い、ポテンシオメータを回転させることで仮想操舵輪の目標角度を指定した。このときの実験結果を Fig.3 に示す。本実験でははじめに右回転を行い、その後、左回転を2回行った。Fig.3(a)に仮想操舵輪の目標角度と実際の角度を示し、Fig.3(b)に足こぎ車椅子の実際の経路を示す。本実験で用いたポテンシオメータは、慣性が非常に小さいため瞬間的に回転させることが可能である。そのためステップ入力に近い目標角度が入力され、足こぎ車椅子自体はすぐに目標角度に追従出来ていないが、定常状態では目標角度に収束していることがわかる。

次に、仮想操舵輪にあらかじめ決定した目標角度を指定することで経路追従と同等の実験を行った。本実験では、目標角度が滑らかに変化するように $\theta_{sd} = 30 \sin x$ [deg] を用いて目標角度を決定した。ここで x は車椅子の進行方向の移動距離を表す。この式を用いることで、車いすが移動するにつれて仮想操舵輪の目標角度が変化し、結果として八の字を描くことになる。実際に経路追従を行うためには、床面に書かれた経路を実時間で検出しそれに追従するような目標車輪角度を導出することや、環境に存在する障害物や段差の情報から目標経路を生成することで実現できる。

実験結果を Fig.4 に示す。Fig. 4(a) は仮想操舵輪の目標角度と実際の角度を表しており、Fig.4(b) は、ロボットの実経路を表している。多少誤差はあるものもほぼ目的の運動が実現できていることが分かる。

5. おわりに

本研究では、現在市販されている足こぎ車椅子の操舵に関する問題点について指摘し、一般に広く使われている手こぎ車椅子とほぼ同じ構造を有する新しい足こぎ車椅子システムを提案した。そして、サーボブレーキを用いることで回転運動を生成する手法を提案し、インタフェースを用いた操舵制御および経路追従制御が実現できることを示した。

今後の課題としては実際の利用者の意見をもとに、どのような操作インタフェースを用いるべきかについて検討を行う。特に、今回提案した手法は車椅子利用者が上肢を使わずに車椅子を操作できる可能性を示したものであり、これにより足こぎ車椅子利用者が効率的に日常空間や仕事現場で活動できると考える。

参考文献

- [1] <http://www.h-tess.com/> (参照 2012-03-08)
- [2] Y. Hirata, Z. Wang, K. Fukaya, K. Kosuge, "Transporting an Object by a Passive Mobile Robot with Servo Brakes in Cooperation with a Human", *Advanced Robotics*, Vol. 23, No. 4, pp. 387-404, 2009.
- [3] H. Yabushita, Y. Hirata, K. Kosuge, Z. Wang, "Environment-Adaptive Control Algorithm of Power Assisted Cycle", *Proceedings of the IECON*, pp. 1962-1968, 2003.