

足こぎ車いすのための操舵支援制御

Steering Assistive Control for a Cycling Wheelchair

○ 窪田昌和（東北大学） 平田泰久（東北大学） 小菅一弘（東北大学）

Masakazu KUBOTA, Tohoku University  
Yasuhisa HIRATA, Tohoku University  
Kazuhiro KOSUGE, Tohoku University

**Abstract:** In recent years, a new type of wheelchair called the cycling wheelchair is developed. The user with lower limb handicap can move the wheelchair by pedaling with his/her legs and change direction using a steering handle. However, the commercially available cycling wheelchair has several hardware limitations so that the user is required comparatively large force and feels difficulty to use steering handle. Therefore, we propose new hardware and control methods to realize steering assist. Furthermore, we develop a prototype which can verify the steering method, and propose a cycling wheelchair that the user can operate without his/her hands.

**Key Words:** Cycling Wheelchair, Steering Assist

1. 緒言

高齢化が進みそれに伴い肢体に不自由を持つ方が増加の傾向にある。このような人々の移動を支援するために、手こぎ式の車いすや電動車いすといった移動支援機器が広く用いられている。しかし、このような移動支援機器は下肢を全く使用しないため、下肢機能が低下してしまうという問題がある。そこで近年歩行が困難な方であってもわずかに下肢を動かすことが出来れば車椅子前部に取り付けられたペダルをこぐことで移動できる足こぎ車いすが開発されている<sup>(1)</sup>。市販の足こぎ車いすでは、操舵輪にワイヤで繋がれたレバーを動かすことで旋回運動を行う。しかし、このようなレバーを用いた操舵は比較的大きな力が必要であったり、左に曲がるためにはレバーを押し、右に曲がるためにはレバーを引くなど進みたい方向とレバーを動かす方向が異なるため操舵が難しいという指摘がある。そこで、本研究では操舵支援を実現する新しいハードウェアおよび運動制御系を提案し、様々な操舵方法を検証できるプロトタイプを開発するとともに、最終的には手を用いることなく操舵を可能とする新しい足こぎ車いすを提案する。

2. 足こぎ車いすの操舵制御

2.1 足こぎ車いすの構造

まず、現在販売されている従来の足こぎ車いすの構造を Fig.1 に示す。人がペダルを踏む力（踏力）は、チェーンとギアを通して片輪に伝えられる。操舵はハンドルによって操舵輪の方向を変えることを行う。

次に、今回提案する足こぎ車いすの構造を Fig.2 に示す。踏力はチェーンをディファレンシャルギアを通して両輪に伝えられる。また、操舵輪を取り外し、左右の車軸に対しベルトを通して

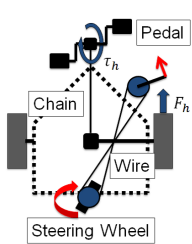


Fig.1 Conventional Cycling Wheel Chair

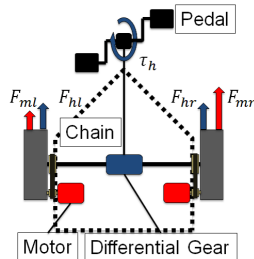


Fig.2 Proposed Cycling Wheel Chair

任意のトルクを加えられるようモータを配置した。これより操舵インターフェースに搭載されたセンサ情報から指令値を算出することで目標の回転運動を決定し操舵を行うことができる。

2.2 提案する足こぎ車いすの運動方程式

足こぎ車いすの並進方向、回転方向に関する運動方程式を以下に示す。

$$M\dot{v} + Dv = F_l + F_r \tag{1}$$

$$I\dot{\omega} + D_\theta\omega = \frac{T}{2}(F_l - F_r) \tag{2}$$

ここで、 $M$  は系全体の質量、 $D$  は並進方向の粘性定数、 $I$  は慣性モーメント、 $D_\theta$  は回転方向の粘性係数、 $F_l$ 、 $F_r$  は左右車輪の駆動力、 $T$  は左右車輪間の距離である。また、 $F_l$ 、 $F_r$  は Fig.2 から次のように与えられる。

$$F_l = F_{hl} + F_{ml} \tag{3}$$

$$F_r = F_{hr} + F_{mr} \tag{4}$$

ここで、 $F_{hl}$ 、 $F_{hr}$  は人の踏力による左右車輪の駆動力、 $F_{ml}$ 、 $F_{mr}$  はモータによる左右車輪の駆動力である。左右車輪のモータによる駆動力は任意に決めることができる。また、踏力がディファレンシャルギアを通してどのように分配され、左右車輪の踏力による駆動力がどのように決定されるかについては次の節で述べる。

2.3 ディファレンシャルギア

Fig.3 にディファレンシャルギアのスケルトン図を示す。ここで、 $\tau_h$  はキャリアに加わるトルク（踏力によるトルク）、 $\omega_h$  はキャリアの回転角速度、 $\tau_l$ 、 $\tau_r$  は左右の軸がキャリアから伝えられるトルク、 $\omega_l$ 、 $\omega_r$  は左右の軸の角速度である。これらキャリア  $h$  と左軸  $l$  と右軸  $r$  の3つの端子の角速度とモーメントの関係は以下の式で与えられる<sup>(2)</sup>。

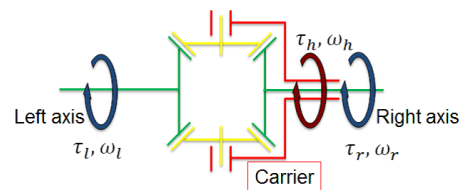


Fig.3 Differential Gear

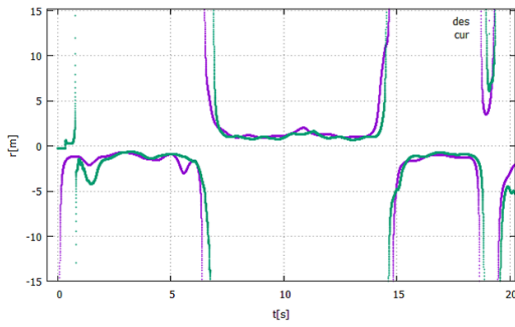


Fig.4 Result of Experiment using Steering Handle

$$j_{hl}^r \omega_l + j_{hr}^l \omega_r + (-1) \omega_h = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\tau_l}{j_{hl}^r} = \frac{\tau_r}{j_{hr}^l} = \tau_h \quad (6)$$

ここで、 $j_{hl}^r$ 、 $j_{hr}^l$  は速度係数と呼ばれ端子間の回転速度の伝達比を示している。また、キャリアを固定したときの、右軸から左軸への回転速度の伝達比は以下の式で示される

$$j_{lr}^h = \frac{\omega_l - \omega_h}{\omega_r - \omega_h} \quad (7)$$

本研究で開発した足こぎ車いすのディファレンシャルギアは、左右の歯車の端数が等しいことから  $j_{lr}^h = -1$  となることがわかる。従って、以下の伝達比の相互関係を用いることで他の係数についても  $j_{lh}^r = \frac{1}{2}$ 、 $j_{hr}^l = 2$  と求めることが出来る。

$$j_{hl}^r = \frac{1}{j_{lh}^r} = \frac{1}{1 - j_{lr}^h} \quad (8)$$

求めた係数を三端子の関係の式 (5)(6) に代入すると次のような関係が求まる。

$$\omega_h = \frac{1}{2}(\omega_l + \omega_r) \quad (9)$$

$$\tau_l = \tau_r = \frac{\tau_h}{2} \quad (10)$$

以上からキャリアの角速度は左右の軸の平均の速度になっており、キャリアに加わるトルクは左右に等しく分配されていることがわかる。よって、2.2 節で述べた  $F_{hl}$ 、 $F_{hr}$  は以下ようになる

$$F_{hl} = F_{hr} = \frac{F_h}{2} \quad (11)$$

ここで  $F_h$  は人の踏力による駆動力であり、車輪の半径  $R$  を用いて  $F_h = \frac{\tau_h}{R}$  で与えられる。

#### 2.4 足こぎ車いすの旋回運動制御

本研究では、並進運動を人の踏力のみによって実現し、回転運動をモータのみによって実現することを考える。そこで足こぎ車いすの運動特性が以下のようなみかけの運動特性を持つようにモータを制御する。

$$M\dot{v} + Dv = F_h \quad (12)$$

$$I\dot{\omega} + D\theta\omega = TF_m \quad (13)$$

(1) 式、(2) 式で示された足こぎ車いすの運動特性と、上式のみかけの運動特性から、左右のモータによる駆動力は  $F_m = F_{ml} = -F_{mr}$  の関係を満たすように発生する必要があることが分かる。すなわち、左右のモータは同じ大きさで向きが反対のトルクを出

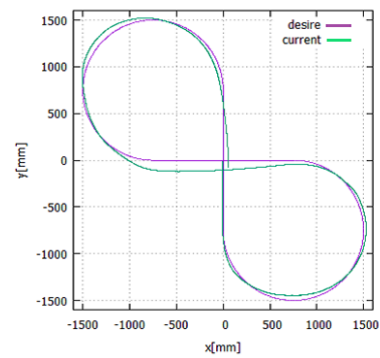


Fig.5 Experimental Result without Steering Handle

力すればよいこととなる。また、モータトルクの大きさは、操舵インターフェースの指令値によって決定される足こぎ車いすの回転中心と車いすの距離  $r$  を用いて決定する。これにより、目標の回転角速度に追従するようにモータを制御すればよい。

#### 2.5 操舵ハンドルを用いた走行実験

前節で述べた足こぎ車いすの操舵制御が可能であるか検証するため、ハンドルにポテンションメータを取り付け、その値を指令値として操舵を行う走行実験を行った。その結果を Fig.4 に示す。目標の回転中心との距離に追従できていることがわかり、前節で述べた方法で操舵制御が可能であることがわかる。

#### 3. 手を使わない操舵インターフェース

人は左右に曲がろうとするとき曲がりたい方向に体を傾けるといった傾向があることが知られている。これより、背もたれに加わる力を測定し回転運動を決定することで手を使わずに操舵できると考えられる。そこで本研究では、背もたれの左右二カ所に圧力センサ FSR402 を設置し、その値によって回転中心の位置を決定する。また、圧力センサ FSR402 の感応部は直径 14.08mm と小さいためプラスチック板の板を用いて力を加えやすくした。また、左右のセンサによって回転中心との距離  $r$  を次式で決定する。

$$f = f_l - f_r \quad (14)$$

$$r = \begin{cases} \infty & f < |f_t| \\ \frac{a}{f+f_t} & f < f_t \\ \frac{a}{f-f_t} & f > f_t \end{cases} \quad (15)$$

ここで、 $f_l$ 、 $f_r$  は左右のセンサに加わる力、 $f$  は左右のセンサに加わる力の差、 $f_t$  は閾値、 $a$  は定数である。軌道追従実験を行い操舵が可能であるか検証を行った。8 の字の目標軌道を床にテープで示し、操縦者がそれに追従するように足こぎ車いすを操作した。実験結果を Fig.5 に示す。実験結果より、目標の軌道にほぼ追従ができており、提案した方法で手を使わない操舵が出来ることがわかる。

#### 4. 結言

本研究では操舵支援を実現する新しいハードウェアおよび運動制御系を提案し、様々な操舵方法を検証できるプロトタイプを開発するとともに、最終的には手を用いることなく操舵を可能とする新しい足こぎ車いすを提案した。今後は、その操舵性能の定量的な評価を行う。

#### 参考文献

- (1) <http://www.h-tess.com/>(2016年6月25日)
- (2) 矢田浩二，“歯車応用機構の設計”，機械技術協会,2011.