

路面環境に対応したアシスト車椅子の制御法の提案

Proposal of Control Method of Power Assist Wheelchair for Driving on Slope

○ 利根川 司 (東京都市大学) 和多田 雅哉 (東京都市大学)

山田 睦雄 (流通経済大学) 斉藤 克子 (霞ヶ関南病院)

Tsukasa TONEGAWA, Masaya WATADA, Tokyo City University

Mutsuo YAMADA, Ryutsu Keizai University

Katsuko SAITO, Kasumigaseki Minami Hospital

Key Words: Wheelchair, Power Assist, Control Method, Driving on Slope

1. 緒言

現在、日本は高齢化社会であり高齢者の人口が増加し、高齢者の中でも多くの人が生活に支障を感じている⁽¹⁾。高齢者は、健常者に比べて筋肉を動かす機会が少ないため筋力が低下しやすいたことが考えられる。そのため、介護者が必要となるが少子化という点から人手不足となり福祉機器の需要が増加している。中でも、移動に関する福祉機器の需要が多く、その中で車椅子は高い割合で利用されている。

本研究室では、片麻痺患者を対象としたパワーアシスト車椅子の開発⁽²⁾を行っている。通常、片麻痺患者が車椅子を使用すると、健常側の手・足により直進走行・軌道修正・方向転換が行われるため、腕・足の負担が大きい問題がある。そこで、片手により車椅子を直進走行が出来るよう制御し、フットスイッチによる操作で方向転換が可能となっている。しかし、車椅子の走行上の問題点として悪路・段差・坂道などの状況による走行が挙げられる。中でも坂道走行は使用者にとって大きな問題である。

今日、福祉機器・生活支援機器としてパワーアシスト機器というものが開発されている。これは、モータなどの機械的な力によって人間の動作を補助するものである。この機能は、様々な分野で活躍されるが、その中でパワーアシスト車椅子というものがある。これは、高齢者に利用可能であるため介護者の負担低減や高齢者の自立支援に繋がることと考えられる。そのため、このパワーアシスト車椅子は今後の高齢化社会において大いに活躍することが期待される。現在、多くのパワーアシスト車椅子が市販・開発されている。中でも代表的なものとして、ヤマハ発動機製のパワーアシストユニット JW-II (以下 JW-II) がある。これは、車椅子のハンドリムを漕ぐ力とそれに応じて出力されるモータ駆動力を合わせた推進力を発生させる。そのため、高齢者など腕の力が弱い人でも容易に走行することが可能となる。しかし、多くのパワーアシスト車椅子の問題点の一つとして、上り坂走行時はモータにより走行が容易になるが、走行する傾斜角度に限界がある。また、下り坂走行時は減速機構では減速しきれず、加速する危険性がある。

本研究では、坂道走行において車椅子利用者及び介護者の負担を低減させ、車椅子利用者の自立支援に繋げることを目的としたパワーアシスト車椅子の開発を行う。本稿では、パワーアシスト車椅子の制御系を設計する上で車椅子をモデル化し、坂道を考慮した車椅子の運動学・動力学を算出する。次に、算出した運動学・動力学を基にブロック線図を製作し、車椅子の走行シミュレーションを行い、車椅子の軌跡を把握する。そして、上記システムを構築するための制御方法の提案を行う。

2. 車椅子のモデル化及び動作シミュレーション

パワーアシスト車椅子の制御系を設計する上で、車椅子をモデル化する必要がある。本章では、坂道を考慮した車椅子の運動学及び動力学について述べる。また、算出した運動学・動力学を基に製作したブロック線図より車椅子の坂道走行のシミュレーションを行う。

2-1 車椅子の運動学・動力学

Fig.1 に車椅子の運動モデルを示す。また、Table.1 に車椅子に使用する変数・定数を定義する。ここで、Fig.1 より坂道の方法は x 軸方向であると定義する。

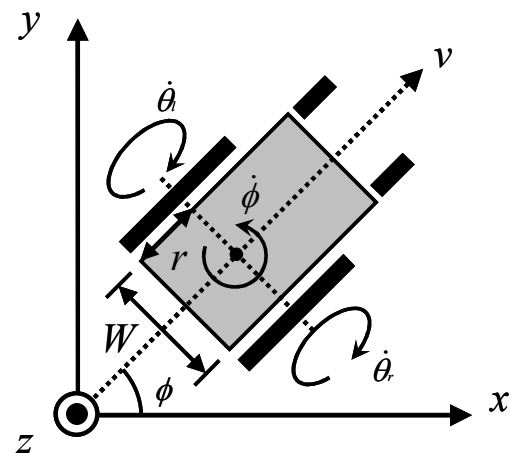
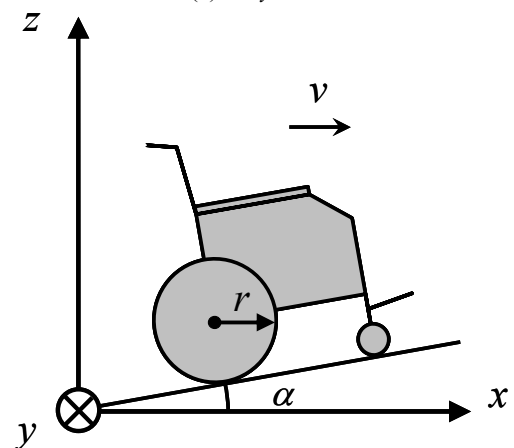
(a) x - y Plane.(b) x - z Plane.

Fig.1 Model of Wheelchair.

Table.1 Parameter and Constant of Wheelchair

Item	Unit
Wheelchair of Speed : v	m/s
Wheelchair of Acceleration : \dot{v}	m/s ²
Wheelchair of Angular : ϕ	rad
Wheelchair of Angular Speed : $\dot{\phi}$	rad/s
Drive Wheel of Angular Speed : $\dot{\theta}_r, \dot{\theta}_l$	rad/s
Drive Wheel of Angular Acceleration : $\ddot{\theta}_r, \ddot{\theta}_l$	rad/s ²
Radius of Wheel : r	m
Diameter of Wheelchair : W	m
Pitch : α	deg
Acceleration of Gravity : g	m/s ²
Moment of inertia of Wheelchair : J_B	kgm ²
Moment of inertia of Drive Wheel : J_r, J_l	kgm ²
Torque of Drive Wheel : τ_r, τ_l	N·m
Mass of Wheelchair (Person is included) : M	kg
Component of Gravity : f_N	N
Coefficient Friction of Drive Wheel : δ_r, δ_l	

Fig.1 の座標系の時間微分で求められる車体の移動速度は、式(1)のように表すことが出来る。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & a \\ b & b \\ c & c \\ d & -d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $a = \frac{r}{2} \cos \alpha \cdot \cos \phi$, $b = \frac{r}{2} \cos \alpha \cdot \sin \phi$

$$c = \frac{r}{2} \sin \alpha, \quad d = \frac{r}{W} \quad \text{とする。}$$

これが、車椅子の運動学である。また、動力学も Fig.1 のモデルで考えると式(2)のように表される。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_r \\ \ddot{\theta}_l \end{bmatrix} = \frac{1}{AC - B^2} \begin{bmatrix} C & -B \\ -B & A \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta & 0 \\ 0 & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} - f_N \right) \quad (2)$$

$$\text{ただし、} \quad A = \frac{Mr^2}{4} + \frac{J_\delta r^2}{W^2} + J_r, \quad B = \frac{Mr^2}{4} - \frac{J_\delta r^2}{W^2}$$

$$C = \frac{Mr^2}{4} + \frac{J_\delta r^2}{W^2} + J_l, \quad D = \frac{Mgr}{2} \sin \alpha \cdot \cos \phi \quad \text{とする。}$$

以上の車椅子の運動学・動力学を基に、シミュレーションブロックを製作する。

2-2 シミュレーションによる車椅子の走行軌跡の把握

坂道を考慮した車椅子の運動学・動力学よりブロック線図を製作し、MATLAB/Simulink により、坂道走行時のシミュレーションを行った。Fig.2 に坂道走行を考慮した車椅子のブロック線図、Table.2 にシミュレーションに用いたパラメータを示す。

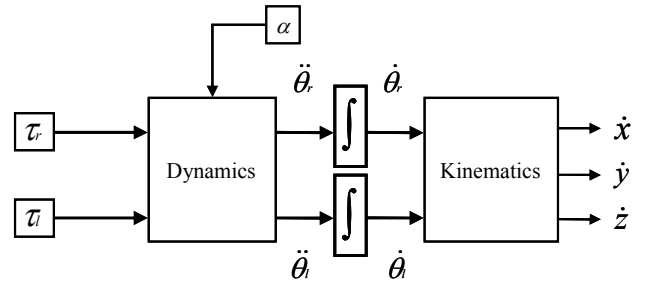


Fig.2 Block Diagram of Wheelchair for Driving on Slope.

Table.2 Parameter of Simulation

Parameter	Unit	Quantity
Mass of Wheelchair (Person is included) : M	kg	80
Radius of Wheel : r	m	0.3
Diameter of Wheelchair : W	m	1.0
Moment of inertia of Wheelchair : J_B	kgm ²	2.5
Moment of inertia of Drive Wheel : J_r, J_l	kgm ²	0.25
Coefficient Friction of Drive Wheel : δ_r, δ_l		0.0035 ⁽³⁾

Fig.2のブロック線図は、車椅子の駆動輪のトルク τ_r, τ_l を入力とし、車椅子の速度 v を出力する。そして、傾斜上で車椅子にかかる重力成分の力 f_N を外乱として扱うブロック線図となっている。

まず、車椅子の両駆動輪のトルクを 0 N·m、坂道の傾斜角度を 0 deg に設定し、上り坂及び下り坂で車椅子を漕いでいないときのシミュレーションを行った。Fig.3 に x - z 平面の車椅子の軌跡を示す。ここで、初期位置は、原点とし車椅子の後輪の軸上とする。

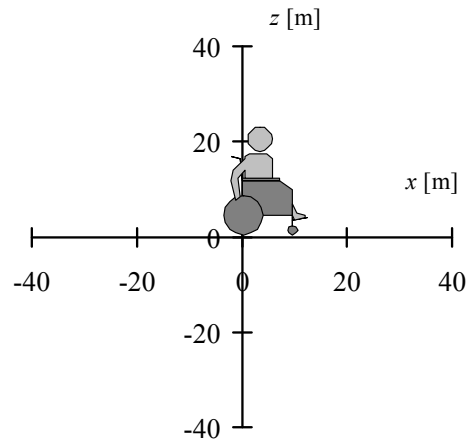


Fig.3 Trajectory of Wheelchair ($\tau_r, \tau_l = 0$ N·m, $\alpha = 0$ deg).

Fig.3の車椅子の軌跡より、平地で車椅子を漕いでいない状態であるため、初期位置に静止した状態の軌跡が見られる。次に、坂道の傾斜角度は変えずに、車椅子の右車輪のトルクを 10 N·m、左車輪のトルクを 0 N·m に設定し、平地で車椅子を左旋回するシミュレーションを行った。Fig.4 に入力トルク波形、Fig.5 に x - y 平面の車椅子の軌跡を示す。

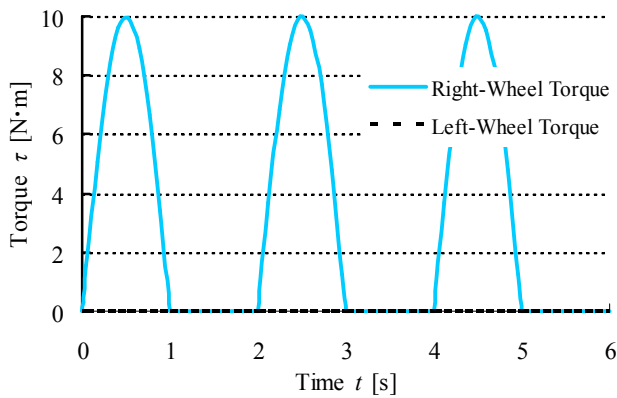


Fig.4 Input Torque Wave.

Fig.4の入力トルク波形は、車椅子のハンドリムの漕ぎ方を半波正弦波として模擬させたもの⁽⁴⁾であり、右車輪のトルクを10 N·mで2秒ごとに15秒間漕いだ時の波形である。

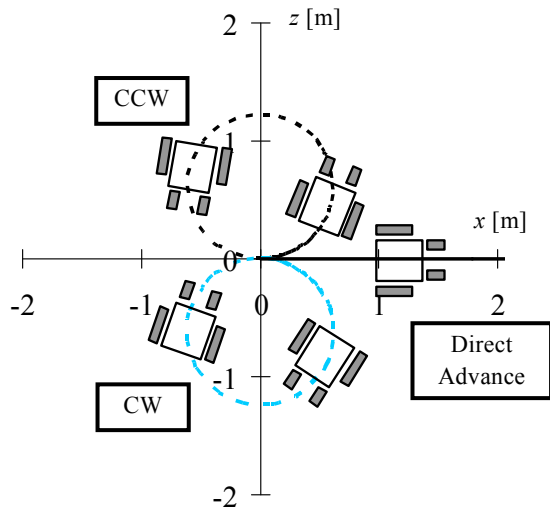


Fig.5 Trajectory of Wheelchair.

Fig.5より右車輪のトルクが左車輪のトルクより大きい場合は、反時計回りの軌跡が描かれる。また逆に、左車輪のトルクが右車輪のトルクより大きい場合は、時計回りの軌跡が描かれる。そして、両車輪のトルクの大きさが同じ場合は、直進する軌跡が描かれる。

そして、車椅子の両駆動輪のトルクを0 N·m、坂道の傾斜角度を45 degに設定し、上り坂及び下り坂で車椅子を漕いでいないときのシミュレーションを行った。Fig.6にx-z平面の車椅子の軌跡を示す。Fig.6の車椅子の軌跡より、上り坂では漕いでいない状態であるため進行方向に対して後退する軌跡が描かれる。また、下り坂では徐々に進行方向に坂を下る軌跡を確認できた。

最後に、坂道の傾斜角度は変えずに、車椅子の両車輪のトルクを10 N·mに設定し、上り坂及び下り坂で車椅子を漕ぎ直進するシミュレーションを行った。Fig.7にx-z平面の車椅子の軌跡を示す。なお、入力トルク波形は、Fig.4と同様の波形を用いた。

Fig.7の車椅子の軌跡より、上り坂では車椅子をまっすぐに漕いでいるため進行方向に坂を上る軌跡が描かれる。

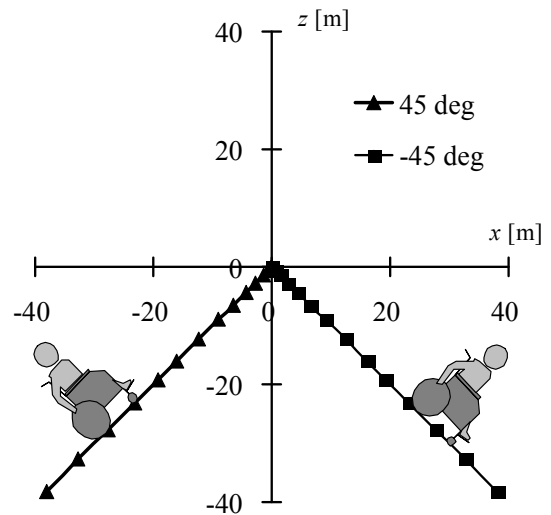


Fig.6 Trajectory of Wheelchair($\tau_r, \tau_l = 0 \text{ N}\cdot\text{m}, \alpha = \pm 45 \text{ deg}$).

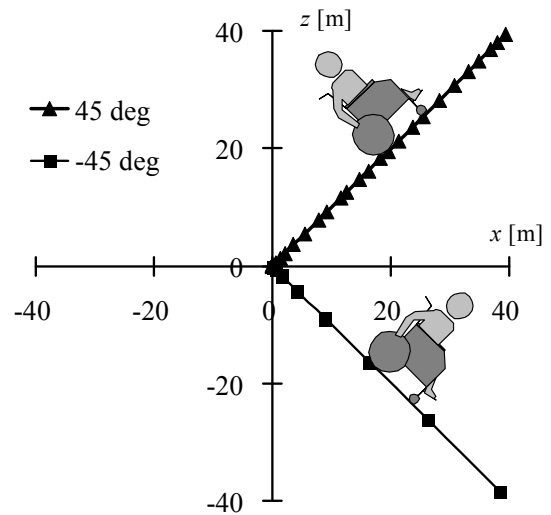


Fig.7 Trajectory of Wheelchair($\tau_r, \tau_l = 10 \text{ N}\cdot\text{m}, \alpha = \pm 45 \text{ deg}$).

しかし、坂道を上っているため、Fig.6とは違い、狭い間隔で走行していること分かる。また、下り坂ではFig.6と同様に徐々に進行方向に坂を下る軌跡を確認できた。しかし、Fig.6とは違い車椅子を漕ぎながら坂道を下っているため、広い間隔で坂道を下っていることが分かる。以上より、坂道上において駆動輪にトルクを加えた時・加えていない時の車椅子の走行をシミュレーションにより模擬することが出来た。

3. 坂道走行時の制御法の提案

本章では、坂道走行時のシステム概念、制御方法について述べる。

3-1 坂道走行時のシステム概念

Fig.8に坂道走行時のシステム概念図を示す。Fig.8の坂道走行のシステム概念図は、路面の傾斜角度と車椅子のハンドリムを漕ぐ力を検出し、アシスト制御を行い、モータを駆動させる。そして、手動力とモータ駆動力を合わせた推進力を発生させる。このシステムにより、常に平地走行時と同様の感覚で走行可能なシステムを構築する。

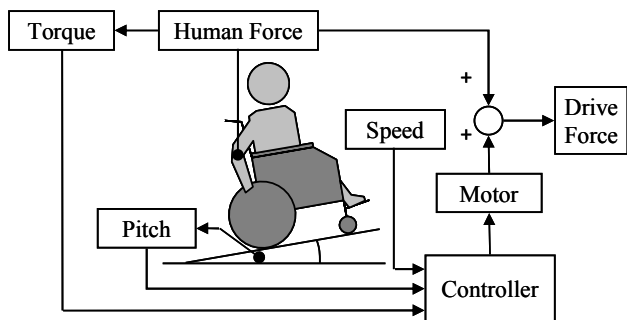


Fig.8 System Concept for Driving on Slope.

3-2 坂道走行時の制御方法

前項の坂道走行時のシステム概念より、常に平地と同じ感覚で走行可能なシステムを構築すると述べた。このことから、坂道上で車椅子を漕いでいないときは、坂道上で静止し、漕いでいるときは平地走行時と同じ力で走行しなければならない。そのため、坂道走行の駆動システムを構築する上で、坂道上で車椅子のハンドリムに力が加わっていない状態(静的状態)と力が加わっている状態(動的状態)に分けて考える必要がある。

静的状態時は、ハンドリムに力が加わっていない状態で坂道上を静止すると、重力成分による力で坂道を徐々に坂道を進行・後退する。この時、坂道上でハンドリムに力が加わっていない状態で、路面の傾斜角度と車椅子の走行速度をそれぞれジャイロセンサ、ロータリエンコーダにより検出する。そして、車椅子の速度情報と路面の角度情報により傾斜角度に応じてモータを駆動させ、人間と車椅子の重力成分による力を相殺させるような制御を構築する。

動的状態時は、坂道からの車椅子の漕ぎ出しの際、通常よりも大きな力を必要となる。この時、ハンドリムに加わる力を力センサにより間接的に検出する。そして、ハンドリムの力情報と路面の角度情報により操作者の手動力のみで走行可能な制御を構築する。

4. 結言

本稿では、まず坂道でのパワーアシスト車椅子の制御系を構築するために車椅子のモデル化を行い、車椅子の運動学・動力学について述べた。また、それを基に路面傾斜を考慮した車椅子の走行シミュレーションの設計及び検討を行った。結果、坂道上において駆動輪にトルクを加えたときの車椅子の走行をシミュレーションにより模擬することが出来た。そして、坂道走行のシステム概念、制御方法の提案を行った。今後の方針として、坂道走行の駆動システムを構築する。また、実機を製作し、上記システムが構築可能か検討を行う。

参考文献

- (1) 厚生労働省：「平成 19 年版高齢社会白書」2007.
- (2) 矢島 裕介, 和多田 雅哉, 山田 睦雄, 齊藤 克子, 内藤 貴司：「片手漕ぎアシスト車椅子の操作性の評価」, 第 18 回 MAGDA コンファレンス in 東京, 講演論文集, pp.337-340, 2009.
- (3) 百生 登, 大島 徹：「電動車いすにおける体幹の振れの抑制による乗り心地の向上」 富山県立大学工学部 パイオメカニズム学会誌, Vol.31, pp.4 No.1, 2007.
- (4) 内山敦, 福井巧：「パワーアシスト車椅子の制御システム」, 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集, Vol.1997, pp.204-208, 1997.