
電動車いすにおける自律移動のための 制御システムに関する研究

The Research of the Regulating System for Autonomous Mobile on Electric Wheelchair.

大原 誠 橋詰 努 室崎千重 村井裕樹

OHARA Makoto, HASHIZUME Tsutomu, MUROSAKI Chie, MURAI Hiroki

キーワード：

電動車いす、バリア走破、フィードバック制御、
スロープ

Keyword:

Electric wheelchair, Negotiating barriers,
Feedback control, Slope

Abstract:

Joysticks are used as standard of input devices for control of electric wheelchairs. If users of electric wheelchairs can't use joysticks for their handicaps, operating switches are used as input devices. The operating switches are activated by their arms or hands, voice, wink and breath.

The users control the wheelchairs with the switches less smoothly than to control with the joysticks. For example, in order to drive the wheelchairs straight on crossing slopes, the users must frequently operate. Moreover, if the center of gravity leans to the left/right side, it strains much more on the users.

This research presents an approach to guide electric wheelchairs to run straight ahead in order to reduce operating loads on slopes with switches. The straight-ahead system is required to design beforehand the proper control rule for each user, to redesign in the cases when the condition of road is unknown and the characteristic of the wheelchairs included the users change.

As a previous step for making the proposed system, we make a simulation model and a prototype system by the feedback control with switches. Through our experiments with the simulation and the prototype system, it confirms

that the proposed system is effective and applicative.

1 はじめに

電動車いすでは標準的な入力装置としてジョイスティックが用いられているが、使用者が四肢麻痺などの重度な障害を有する場合など、ジョイスティックによる操作ができない場合がある。このようなときには、前進・後進・旋回をスイッチで操作する方法などが用いられる^{1),2)}。操作スイッチは、僅かな指先の運動、まばたき、呼吸、音声など、随意に動かせる身体機能で電動車いすを操作できる装置であるが、細かい方向転換には不向きであり、特にバリアを走破する際などに使用者の大きな負担となっている。例として傾斜路面を横断する場合、電動車いすは重力によって進行方向が斜面下方へと傾くため、直進するためには細かく方向を修正する必要がある^{3)~5)}。さらに、使用者の重心が電動車いす本体に対して左右方向に対して偏りのある場合には、より一層使用者の操作負担が大きくなると考えられる⁶⁾。まちにあるすべてのバリアを除去することは現実的には不可能であることから、電動車いすにバリアを走破しやすい機構を付与する研究がなされている^{7),8)}。

本研究では操作負担の軽減を目的とし、まちにある代表的バリアとして傾斜路面に着目し、一度のスイッチ操作で直進走行をさせる直進走行システムを提案する。このシステムには次の3つの要件が課せられる。

- (1) 使用者一人一人に合わせた適切な制御ルールが実現されること、
- (2) 未経験の路面を走行する場合や使用者の重心位置、車輪の空気圧が変化した場合など、使用者

- を含む電動車いすの特性が変化した場合においても、適切な制御ルールが維持されること、
- (3) 使用者を含む電動車いすに関して、観測できる情報が不完全であっても適切な制御ルールが構築されること。

これらを満たすために、フィードバック制御に機械学習手法を組合せた枠組みを構築する⁸⁾。実機での学習には時間が掛かるため、シミュレーションによる事前の学習を考える。そのためにシミュレーションモデルを構築した。また、フィードバック制御^{9),10)}を実装した試作システムを製作し、フィードバック制御によって直進走行が実現できるかを確認した。

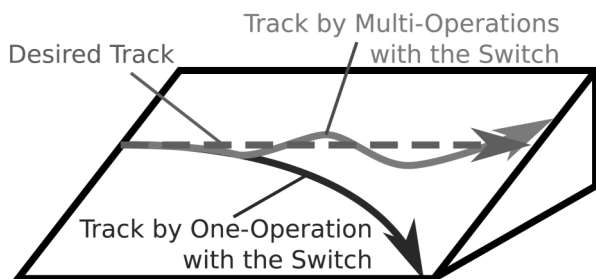


図1 斜面上での電動車いすの走行軌跡
Fig.1 Example of tracks on the slope

2 直進走行システム

2.1 概要

直進走行を考えた場合、使用者は電動車いすが向いている方向（ヨー角）の延長線上にある目標地点に向かうのが目的と考えられる。しかし、現在地点から目標地点への直進軌跡をセンサによって検知するのは困難である。そこで、直進走行スイッチが押されたときのヨー角を目標ヨー角とし、これを維持することを直進走行と呼ぶことにする。

直進走行では、入力装置（スイッチ）から直進信号出力されているときに、センサによって測定されたヨー角（方位角）から、制御ルールに基づいて左右モータの電圧を決定する。モータからのトルクによって電動車いすの姿勢が変化し、そのときのヨー角をセンサが測定し、次のモータ電圧を決定する。以下これを繰り返し走行する。また走行中目標ヨー角とヨー角のずれを最小とするように制御ルールの学習を行う。センサからの入力によってモータの電圧を適切に設定する機構を電圧調整器と呼ぶ。

しかし、出力する電圧をそのまま学習した場合、学習に膨大な時間が必要となり、また学習結果をすべて把握することが困難なため危険な出力が発生す

る可能性がある。そこでフィードバックによる制御を基本としそのパラメータを機械学習手法にて学習することで学習対象を減らし時間の短縮と安全性を確立する。また実際にシステムを運用する場合には、シミュレーションによる学習を行った後で使用者による運用を開始する。運用中にも追加の学習を行うことでシステムの精度を高める。以上の手順により使用者の安全性と学習に関する負担軽減を目指す。

2.2 モデル化

本研究で対象とするシステムについて、問題の物理的側面・要件を表した物理層と情報の流れ・意思決定過程を表した情報層からなる階層モデルとして捉え、以下に問題の基本的要件を示す。ただし各要素の先頭に付した記号は、各モジュールにおいて、
+ 入力、
- 出力、
であることをそれぞれ表す。

(1) 物理層

(a) 電動車いす（ユーザを含む）

- 車体姿勢（ピッチ角・ロール角） ψ^P, ψ^R
- 抵抗 F_L, F_R
- + 左右後輪速度 $\dot{\theta}_L, \dot{\theta}_R$

(a-1) 左モータ

- 制御電圧 V_L
- + 駆動トルク τ_L

(a-2) 右モータ

- 制御電圧 V_R
- + 駆動トルク τ_R

(b) 斜面

- 左右後輪速度 $\dot{\theta}_L, \dot{\theta}_R$
- + 車体姿勢（ピッチ角・ロール角） ψ^P, ψ^R
- + 左右転がり抵抗 F_L, F_R

(2) 情報層

(c) 入力装置（スイッチ）

- 操作信号 o

(d) 電圧調整器

- + 操作信号 o
- + 車体姿勢
(ヨー角・ピッチ角・ロール角) ψ^Y, ψ^P, ψ^R
- 制御電圧 V_L, V_R

図2にモジュール間の入出力関係を示す。

3 シミュレーションモデル

事前学習のため物理層のシミュレーションモデルを構築する。

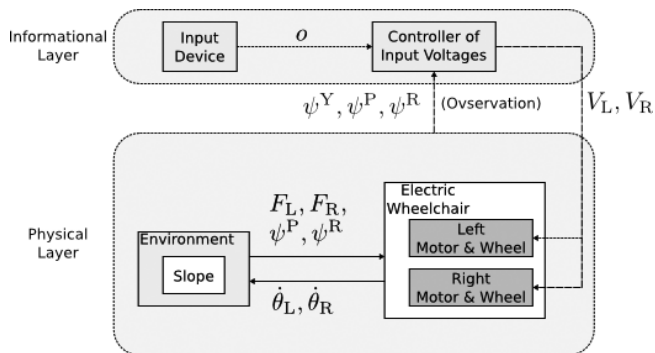


図2 提案システムの構成
Fig.2 Overview of the proposed system

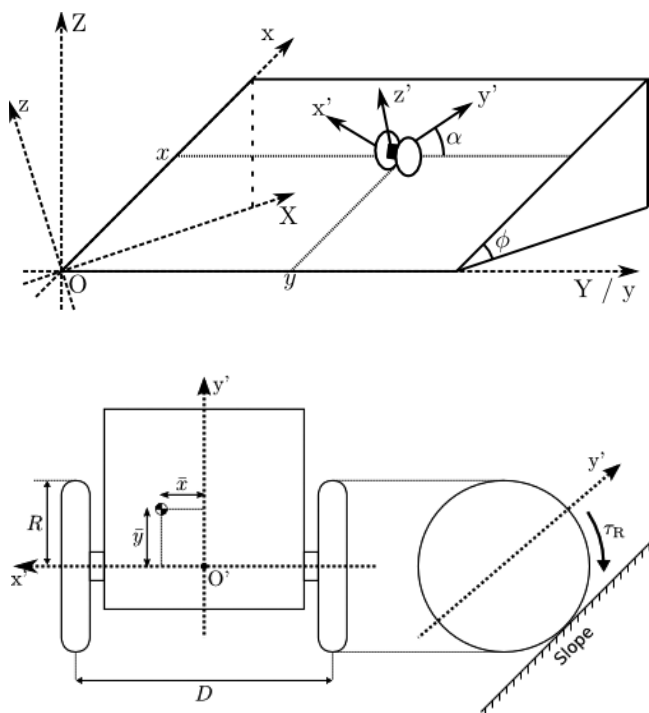


図3 座標系
Fig.3 The system of coordinates

3.1 基本要素

以下のような直交座標系を考える (図3)。

- O-XYZ: ワールド座標系。
- O-xyz: 斜面に沿って取った静止座標系。
- O'-x'y'z': 電動車いすの後輪軸中心点を原点とし斜面に沿って取った運動座標系。

次に状態変数や定数を述べる。

- x, y : 車いす後輪軸中心点のO-xyz上での位置[m]、
- \bar{x}, \bar{y} : 車いす重心のO'-x'y'z'上での位置[m]、
- α : y軸と車いすの進行方向がなす角[rad]、
- θ_L, θ_R : 左右後輪の回転角[rad]、

- M : 車いすの質量[kg]、
 - R : 左右後輪の半径[m]、
 - D : 後輪の車輪幅[m]、
 - ϕ : 斜面が地面となす角[rad]、
 - I_B : z'軸周りの車いすの重心における慣性モーメント[kg · m²]、
 - I : x'軸周りの左右後輪の慣性モーメント[kg · m²]、
 - β_c : モータ軸摩擦定数[m · N · s]、
 - g : 重力加速度[m/s²]。
- また、一般化座標 \bar{r} として

$$\bar{r} = (x, y, \alpha, \theta_L, \theta_R) \quad (1)$$

を考える。

3.2 ダイナミクス

電動車いすの後輪軸中心点(O')のx'軸方向への移動速度を $v_{x'}^W$ 、y'軸方向への移動速度を $v_{y'}^W$ 、重心回りの回転速度を ω^W としたとき、微小時間内において以下の式が成り立つ。

$$v_{x'}^W = 0 \quad (2)$$

$$v_{y'}^W = \frac{R}{2} (\dot{\theta}_R + \dot{\theta}_L) \quad (3)$$

$$\omega^W = \frac{\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L}{D} R \quad (4)$$

また、O-xyz上において、

$$\dot{x} = v_{y'}^W \sin \alpha \quad (5)$$

$$\dot{y} = v_{y'}^W \cos \alpha \quad (6)$$

が与えられる。またO-xyz上での重心の座標 (x_{cg}, y_{cg}) は、

$$x_{cg} = x + d \sin(\alpha + \beta) \quad (7)$$

$$y_{cg} = y + d \cos(\alpha + \beta) \quad (8)$$

となる。ただし、 $d = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$ 、 $\tan \beta = \bar{x}/\bar{y}$ である。

ここで、電動車いすのもつ運動エネルギーを K 、ポテンシャルエネルギーを U として、

$$\begin{aligned}
K &= \frac{1}{2} M \left((v_y^w - d\dot{\alpha} \sin \beta)^2 + (d\dot{\alpha} \cos \beta)^2 \right) \\
&+ \frac{1}{2} I_B \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} I (\dot{\theta}_R^2 + \dot{\theta}_L^2) \\
&= \frac{1}{2} M (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} (I_B + Md^2) \dot{\alpha}^2 \\
&+ \frac{1}{2} \left(I - \frac{MdR^2 \sin \beta}{D} \right) \dot{\theta}_R^2 \\
&+ \frac{1}{2} \left(I + \frac{MdR^2 \sin \beta}{D} \right) \dot{\theta}_L^2
\end{aligned} \quad (9)$$

$$U = Mg(x + d \sin(\alpha + \beta)) \sin \phi \quad (10)$$

である。以上より拘束条件を取り入れたラグランジアン \tilde{L} を、

$$\begin{aligned}
\tilde{L} &= K - U \\
&- \lambda_1 \left(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 - \frac{R^2}{4} (\dot{\theta}_R + \dot{\theta}_L)^2 \right)^2 \\
&- \lambda_2 \left(\dot{\alpha} - \frac{R}{D} (\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L) \right)
\end{aligned} \quad (11)$$

で定義する。これを用いて \vec{r} についてラグランジュの運動方程式を解くと、

$$\dot{x} = \frac{R}{2} (\dot{\theta}_R + \dot{\theta}_L) \sin \alpha \quad (12)$$

$$\dot{y} = \frac{R}{2} (\dot{\theta}_R + \dot{\theta}_L) \cos \alpha \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
\ddot{\alpha} &= \frac{R}{D} \{ (A_1 - A_2) \tau_R + (B_1 - B_2) \tau_L \\
&- (C_1 + C_2) \sin \alpha \\
&+ (D_1 + D_2) \cos(\alpha + \beta) \\
&- \beta_c (E_1 + E_2) \dot{\theta}_R - \beta_c (F_1 + F_2) \dot{\theta}_L \\
&- \text{sign}(\dot{\theta}_R) G (E_1 + E_2) \\
&- \text{sign}(\dot{\theta}_L) G (F_1 + F_2) \}
\end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta}_R &= 2A_1 \tau_R + 2B_1 \tau_L \\
&- C_1 \sin \alpha + D_1 \cos(\alpha + \beta) \\
&- \beta_c A_1 \dot{\theta}_R - \beta_c B_1 \dot{\theta}_L \\
&- \text{sign}(\dot{\theta}_R) G A_1 - \text{sign}(\dot{\theta}_L) G B_2
\end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta}_L &= 2A_2 \tau_R + 2B_2 \tau_L \\
&- C_2 \sin \alpha + D_2 \cos(\alpha + \beta) \\
&- \beta_c A_2 \dot{\theta}_R - \beta_c B_2 \dot{\theta}_L \\
&- \text{sign}(\dot{\theta}_R) G A_2 - \text{sign}(\dot{\theta}_L) G B_1
\end{aligned} \quad (16)$$

となる。ただし、 $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1, D_2, E_1, E_2, F_1, F_2, G$ は定数である。

3.3 課題

今後実機の挙動とシミュレータの結果を照らし合わせ妥当性を確認する必要がある。

4 試作システム

4.1 概要

提案システムの有効性を確認するためにスイッチ式入力装置と入力電圧調整器をPCによって構築した試作システムを作製する。試作システムでは学習機構を搭載せず、フィードバック制御のみを行っている。

4.2 入力電圧の設定

試作システムでは、ヨー角のずれから左右モータへの制御電圧を決定する際に仮想的なジョイスティックを設定し決定する。

スティックの極座標系の位置 (r, θ) によって、左右モータへの入力電圧 V_L, V_R は以下のように定まる (図4)。

$$V_L = V_M - r \sin \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (17)$$

$$V_R = V_M - r \cos \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (18)$$

ここで、 V_M は基準電圧であり $V_L = V_R = V_M$ のとき、電動車いすは停止状態となる。

試作システムではジョイスティックによる電圧操作をもとに電圧を決定する (仮想ジョイスティック)。今回は、あらかじめ r を定めておき、 θ を操作することでモータへの入力電圧を決定する。

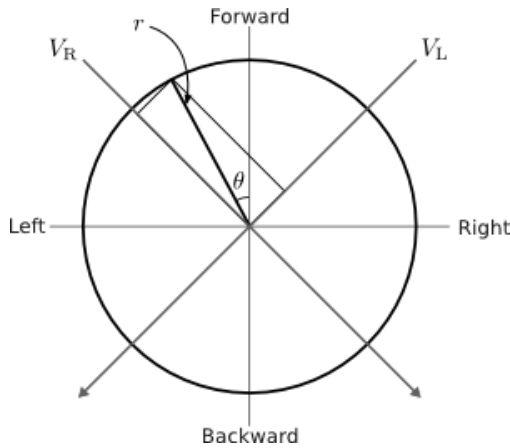


図4 ジョイスティックによる入力電圧の決定
Fig.4 Conversion from the virtual joystick's position
(r, θ) to input voltages of motors V_L, V_R

4.3 制御機構の設計

制御機構としてフィードバック制御の比例制御を実装する。直進走行スイッチを押した時のヨー角を目標ヨー角 φ_d^y とし、現在のヨー角 φ^y との偏差を用いた比例制御を行う。ここで仮想スティックの傾き θ を、

$$\theta = K(\varphi_d^y - \varphi^y) \quad (19)$$

とする。 K は定数である。

4.4 実験

提案システムの有効性を確認するために電動車いすに試作システムを搭載し実験を行う。

設定

模擬環境として傾斜角 $3[^\circ]$ の片流れ斜面上を製作し、電動車いすにセンサと試作システムを構築したPCを取り付け、試作システムによる制御がある場合とない場合、すなわち直進走行スイッチを押し続けた場合と前進スイッチを押し続けた場合の走行軌跡の違いを見る。

結果

傾斜路面での制御なしの場合の走行軌跡を図5に、制御ありの場合の走行軌跡を図6に示す。

考察

傾斜路面の結果について前進スイッチを押した場合は傾斜路面に乗った後、斜面下方へと進路が傾き、

模擬環境外へ出ていることがわかる。直進走行スイッチを押した場合、傾斜路面上で斜面下方へと進路が傾くがその後修正し、模擬環境外へと出ることなく走行することができている。以上より短距離では目標ヨー角の維持が実現できているといえる。長距離での場合や他の傾斜角の場合についての検証が必要となるが、提案システムが電動車いす使用者による方向修正を減らし操作負担を軽減できる可能性を示せた。

4.5 課題

オンライン学習機構を搭載し、ユーザや環境の変化に対応できるようにする。また、その実現のためにセンサからの応答性を高める目的で角度センサに加えてより高速な角速度センサを併せて搭載する。

5 おわりに

本研究では、傾斜路面における電動車いす使用者の操作負担軽減を目指し、スイッチ一つで電動車いすを直進走行させるシステムの提案を行った。システムでは電動車いす本体のヨー角を用いることで、駆動モータへの入力電圧を調節する。この提案システムは、次のことが期待できる。

- (1) 使用者一人一人に合わせた適切な制御ルールが実現されること、
- (2) 未経験の路面を走行する場合や使用者の重心位置、車輪の空気圧が変化した場合など、使用者を含む電動車いすの特性が変化した場合においても、適切な制御ルールが維持されること、
- (3) 使用者を含む電動車いすに関して、観測できる情報が不完全であっても適切な制御ルールが構築されること。

そして、シミュレータによる学習に向けてのシミュレーションモデルの作成および試作システムを用いた模擬環境下での実験を通して提案システムの有効性を確認した。また、提案システムを用いることによって使用者の操作負担を少なくすることも合わせて確認できた。

今後の課題として、

- 1) 学習機構を搭載した試作システムの製作、
- 2) 様々な模擬環境下での提案システムの実験および定量的な評価、

などが挙げられる。

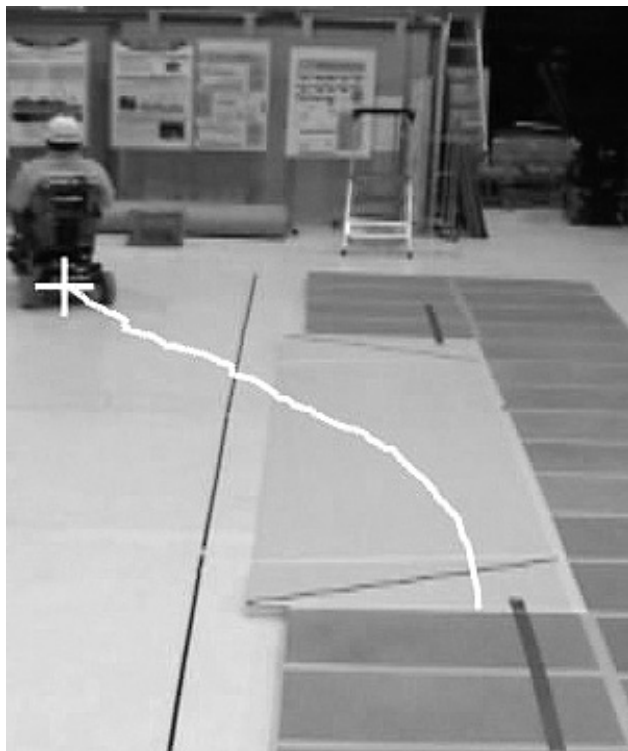


図5 傾斜路面において前進スイッチを押した場合の軌跡
Fig.5 Track on the slope without the prototype system



図6 傾斜路面において直進走行スイッチを押した場合の軌跡
Fig.6 Track on a slope with the prototype system

参考文献

- 1) 齋藤隆之、林豊彦、中村康雄、通所直樹：「利用可能な身体機能に応じた障害者用操作スイッチの選択支援システム」、信学技報、TL2003-9、pp.49-54、2003
- 2) 小宮加容子、中島康博、橋場参三、景川耕宇、黒須顕二：「狭い空間における音声指令による電動車いす走行テスト」、日本機械学会論文集C、Vol.69、No.688、pp.210-217、2003
- 3) 米田郁夫、橋詰努、藤記拓也、木原寿紀、平川雅子、鎌田実：「片流れ路面が車いす利用者に強いる負担増の定量的評価」、第14回リハ工学カンファレンス、pp.81-84、1999
- 4) 水口文洋、大鍋寿一：「片流れ横断歩道の手動車いすによる横断シミュレーション」、第16回リハ工学カンファレンス、pp.53-56、2006
- 5) 長瀬浩明、北野哲彦、吉田健二、浜淳、相澤淳平：「動作特性にもとづく車椅子等の傾斜路面適合化技術に関する研究」、長野県情報技術試験場研究報告、No.18、pp.6-10、2002
- 6) 大垣斉、池田義弘、竹田晴見：「電動車いすのモデルについて」、システム制御情報学会論文誌、Vol.7、No.6、pp.207-212、1994
- 7) 濱上知樹、平田廣則：「知的車椅子における環境適応のための状態空間の構成法」、電気学会論文誌D、Vol.123、No.10、pp.1118-1124、2003
- 8) 黒住亮太、山本透：「強化学習による電動車椅子の障害物回避補助システムの構築」、システム制御情報学会論文誌、Vol.19、No.1、pp.7-14、2006
- 9) J.B.Shung、M.Tomizuka、D.M.Auslander、G.Stout：「Feedback Control and Simulation of a Wheelchair」、Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control、Vol.105、pp.96-100、1983
- 10) J.B.Shung、G.Stout、M.Tomizuka、D.M.Auslander：「Dynamic Modeling of a Wheelchair on a Slope」、Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control、Vol.105、pp.101-106、1983