

電動車いすによる自律移動を促進する開発およびまちの環境整備に関する研究

Development of the System for Adaptive Running of 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

Keywords:

Electric wheelchair, Negotiating barriers,
Feedback control, Slope

Abstract:

This paper presents an approach to guide an electric wheelchair to run straight ahead in order to reduce an operating load on a slope with a switching input device.

On a slope, a user of a electric wheelchair has to operate switches frequently so that it can go straight. That is a load for the user, so it demands a wheelchair which can go straight with one switch. 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 wheelchair included the user changes.

When the user pushes the straight ahead switch, the proposed system controls input voltages of left / right rear wheel motors to make the wheelchair drive straight ahead with a feedback controller and a learning module.

In order to confirm the effectiveness of the proposed system, we make a prototype system only with the feedback controller. Through the experiments using the prototype system, the effectiveness and the applicability of the approach have been confirmed.

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、肢体麻痺などの障害のためジョイスティックでの操作が困難な場合は、操作スイッチと呼ばれる入力装置が用いられる。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^{1),2)}。しかし操作スイッチはジョイスティックに比べて細やかな操作に不向きであり、特にまちにあるバリアを走破するときに問題となる。ユニバーサル社会実現のためには、このような重度の障害を持つ電動車いす使用者も安全・快適に移動できるまちの環境整備が必要となる。その一方で、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、電動車いすにまちのバリアを走破しやすい機構を付与するなどの対応も同時に必要となっている。そこで近年、電動車いす側からユニバーサル社会実現に向けた研究がなされている^{3),4)}。

ここで、まちのバリアの1つである傾斜路面において電動車いすを横断させることを考えた場合、使用者が幾度となく方向を修正することが必要となり^{5)~7)}、特に操作スイッチを用いる場合は、使用者にとって大きな負担となる。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⁸⁾。しかしながら現在、傾斜路面に対して有効な対策はほとんどなされていない。

そこで本研究では、まちにあるバリアとして傾斜路面に注目し、左右DCモータから駆動力を得る後輪駆動型電動車いすを対象として、傾斜路面においても1つのスイッチ入力で電動車いすに直進走行をさせるシステム（以下、直進走行システム）を考え

る。このようなシステムには次の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する、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・フィードフォワード制御に機械学習手法を組合せた枠組みを構築する^{9),10)}。また、提案システムの有効性および実際の電動車いすへの適用可能性を検討するため、フィードバック制御を搭載した試作システムを作製し、平坦路面および傾斜路面での走行実験を行った。

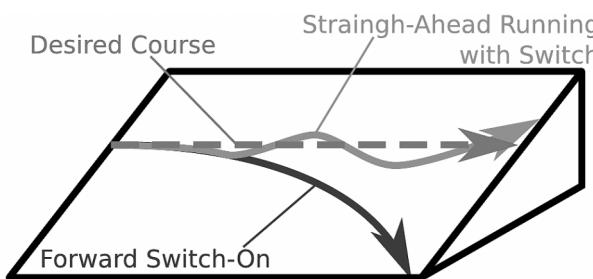


図1 斜面における電動車いすの走行軌跡の例
Fig. 1 Examples of tracks on the slope

2. 直進走行システム

2.1. 概要

システムは、次の5つのモジュールから構成される。

- (1) 使用者、
- (2) 操作スイッチ、
- (3) 左右のDCモータによって駆動力を得る後輪駆動型電動車いす (EMC-230、株今仙技術研究所)、
- (4) 電動車いす本体のヨー角 (方位角) やピッチ角 (水平面に対して前後方向に傾いている角度)、ロール角 (水平面に対して左右方向に傾いている角度) を検知できる3Dモーションセンサ (Vector Cube(VC-03)、株式会社センセーション) (以下、3Dセンサ)、
- (5) 入力電圧調整器 (以下、調整器)。

図2にシステムの構成を示す。なお、スイッチには通常の前進・左旋回・右旋回・後進スイッチに加えて直進走行システムを動作させる直進走行スイッチを設ける。EMC-230は定常状態における最高速度が6.0[km/h]となるように設定されている。3Dセンサは、ヨー角、ピッチ角、ロール角をそれぞれ分解能1°にて検知できる。

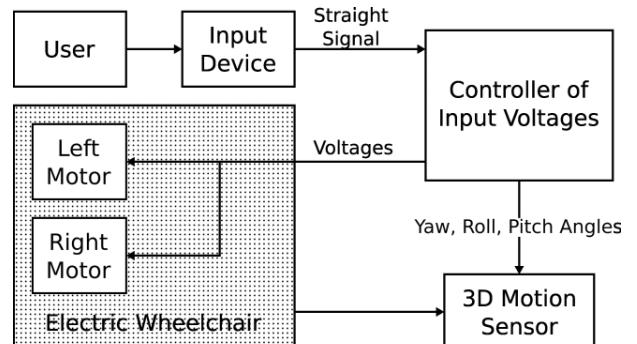


図2 提案システムの構成
Fig. 2 Structure of the proposed system

2.2. 設計

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。すなわち直進経路について観測が不完全なので観測可能な情報から直進走行を目指す。ここでは、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。これは一度直進軌跡からはずってしまった場合、そのズレを補正できず平行に走行し続けることとなる (図3)。しかし常に目標ヨー角を維持し続けることができれば直進軌跡からのズレは最小におさまると考えられる。

直進走行においては入力装置から直進信号が出力されている際に、3Dセンサからヨー角が調整器に入力され、制御ルールに基づき調整器から左右のモータに電圧が出力される。そしてその電圧に従い電動車いすが走行し、そのときのヨー角が3Dセンサから調整器に入力される。以下これを繰り返し走行する。このとき目標ヨー角とヨー角のズレを最小とするように制御ルールの学習を行う。

調整器は、3Dセンサから入力される電動車いすの情報を基づいて、適切な電圧をモータに出力する。制御ルールには次の3つの要件が課せられる。

- (1) 使用者一人一人に合わせたルールであること、

- (2) 電動車いすの特性が変化した場合においても適切な電圧を出力できるルールであること、
- (3) 観測できる情報が不完全であっても適切な電圧を出力できるルールが構築されること。これらを満たすため機械学習手法を用いることが考えられる。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・フィードフォワード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、使用者の安全と学習に関する負担軽減を目指す。

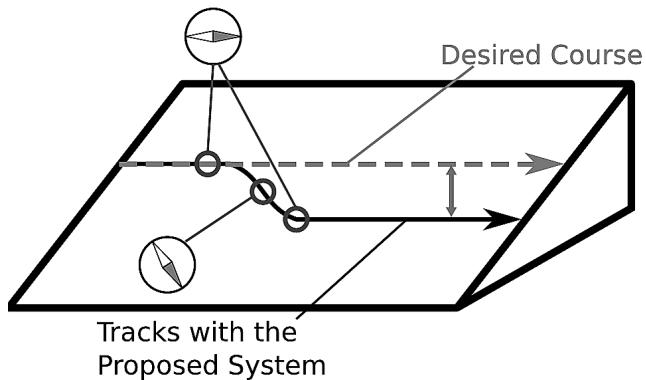


図3 ヨー角の観測のみでは補正できない例

Fig. 3 Example that the proposed system cannot be corrected only by observing yaw angle

3. 試作システム

3. 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。

3. 2. 入力電圧の設定

EMC-230ではジョイスティックを用いた場合、左右モータへの入力電圧 V_L , V_R は、スティックの

極座標系の位置(R_E, Θ_C)によって、以下のように定まる(図4)。

$$V_L = 2.5 - R_E \sin\left(\Theta_C + \frac{\pi}{4}\right) \quad (1)$$

$$V_R = 2.5 - R_E \cos\left(\Theta_C + \frac{\pi}{4}\right) \quad (2)$$

ここで、 $V_L = V_R = 2.5[V]$ のとき、電動車いすは停止状態となる。

試作システムでは仮想のジョイスティックを設けて電圧を決定する。あらかじめ R_E を定めておき、 Θ_C を操作することでモータへの入力電圧を決定する。

3. 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 Θ_d とし、現在のヨー角 Θ 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_C を、

$$\Theta_C = K_p (\Theta_d - \Theta) \quad (3)$$

とする。 K_p は定数である。また、左右モータのトルクを τ_L , τ_R 、左右後輪の回転角 θ_L , θ_R としたときの比例制御のブロック線図を図5に示す。

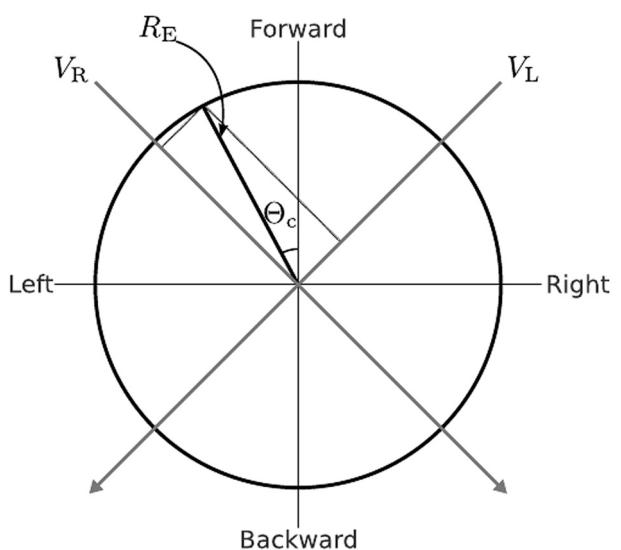


図4 ジョイスティックによる入力電圧の決定

Fig. 4 Input Voltages with Joy-Stick

4. 実験

提案システムの有効性を確認するためにEMC-230に試作したシステムを搭載し実験を行う。

4.1. 設定

あらかじめEMC-230は重心位置と左右タイヤの空気圧に偏りをもたせ、平地において前進スイッチを押しても左方向に曲がるように設定する。このEMC-230に3Dセンサと試作システムを構築したPCを取り付け、平坦路面および傾斜路面上で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（頭頂部）の違いを見る。

実験に用いたパラメータを表1に示す。

表1 パラメータ設定
Table 1 Setting of Parameters

Parameter	Value
R _E	1.5
K _P	2.0

4.2. 結果

平坦路面での制御なしの場合の走行軌跡を図6に、制御ありの場合の走行軌跡を図7に示す。傾斜路面での制御なしの場合の走行軌跡を図8に、制御ありの場合の走行軌跡を図9に示す。

4.3. 考察

平坦路面の結果について、前進スイッチを押した場合、すなわち提案システムによる制御がない場合は左方向に傾いている。通常の操作スイッチで直進するためには前進スイッチと右旋回スイッチを組み合わせなければいけないことが分かる。直進走行スイッチを押した場合、すなわち提案システムによる制御がある場合、はじめは左側にそれるが次第に右側に戻り直進走行スイッチ一つでほぼ直進できていることができていることが確認できる。ただし直進経路に対してはじめ左側に、その後右側に離れていくのは比例制御なので補正が強く働くのは目標ヨー角と現在ヨー角の偏差が大きくなつてからであるためと考えられる。

次に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てすぐに落ちていることが

わかる。直進走行スイッチを押した場合、前進スイッチの場合よりも傾斜路面上を長く走行した後落ち、傾斜路面から平坦路面に移った際に右側に戻る軌道を取る。これは平坦路面と傾斜路面で適切なパラメータが異なるためであると考えられ、路面の傾斜によってパラメータを変更する枠組みが必要だと考えられる。

最後に平坦路面・傾斜路面ともに短距離では目標ヨー角の維持が実現できている。長距離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。

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の方位角（ヨー角）をもとに、DCモータへの入力電圧を調節するシステムを提案した。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、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ならび実現可能性を確認した。また特に、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でき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、
- 3) 不完全な観測情報の補完に関する考察、などが挙げられる。

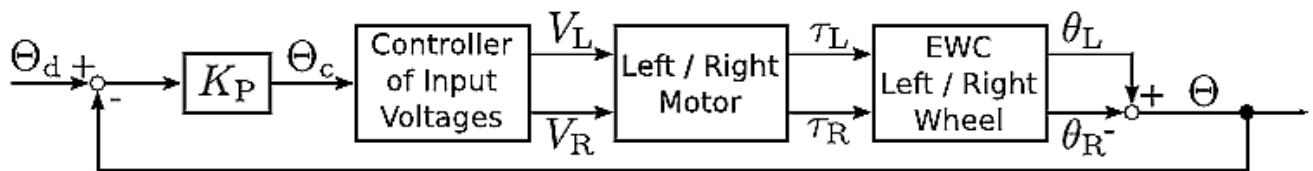


図5 比例制御のブロック図
Fig. 5 Block diagram of the proportional-controller



図6 平坦路面において前進スイッチを押した場合の軌跡
Fig. 6 Tracks on the flat road without the prototype system



図7 平坦路面において直進走行スイッチを押した場合の軌跡
Fig. 7 Tracks on the flat road with the prototype system

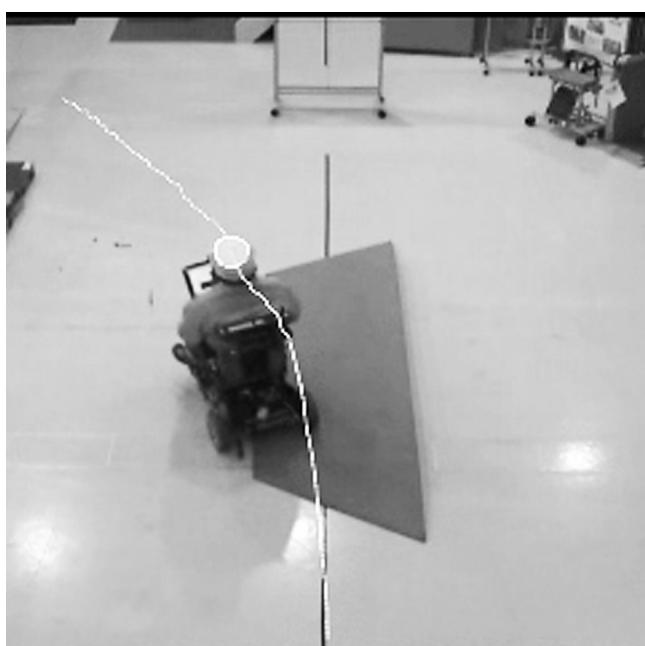


図8 傾斜路面において前進スイッチを押した場合の軌跡
Fig. 8 Tracks on the slope without the prototype system

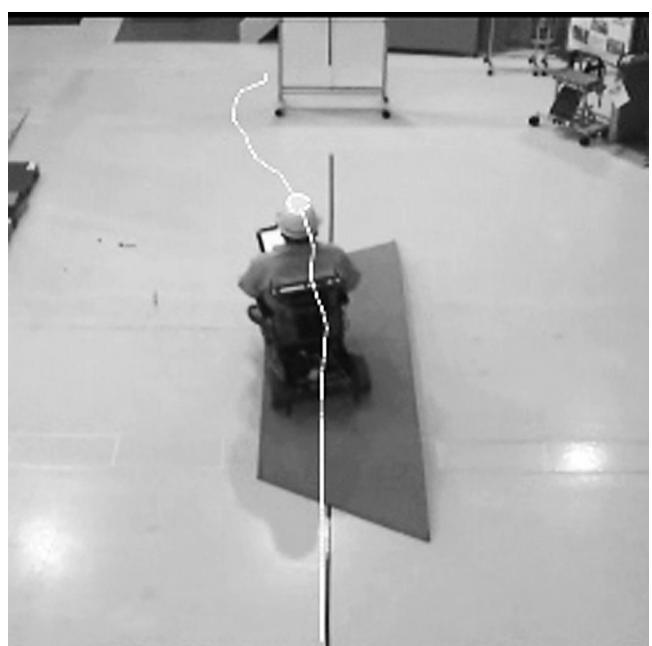


図9 傾斜路面において直進走行スイッチを押した場合の軌跡
Fig. 9 Tracks on the slope with the prototype system

参考文献

- 1) 斎藤隆之、林豊彦、中村康雄、遁所直樹：「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」、日本機会学会論文集C、Vol.69、No.688、pp.210-217、2003
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 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