操作入力と環境認識に基づく操作性の低いデバイスを利用する知的車いすの行動制御

石 原 悠^{*1} 高 橋 正 樹^{*2}

Action Control based on Input Commands and Environment Recognition for Smart Wheelchairs Controlled by Low Operability Devices

Yu Ishihara^{*1} and Masaki Takahashi^{*2}

Powered wheelchair is a mobility commonly used for people with disabilities. Recently, to improve the safety and efficiency of powered wheelchairs, various systems with control assistance are proposed. However most of the systems suppose joystick as input device and doesn't consider about people with difficulties using it. Not all devices alternative to joystick have enough operability compared to joystick. In this paper, considering corridor passing as verification environment, an action control method to drive through the corridor safely and efficiently for wheelchairs controlled by devices with low operability is presented. To achieve safe and efficient driving, proposed method considers the passenger's input commands and combines the environmental information to select effective direction and speed for the wheelchair instead of passenger. Moreover for environment recognition, corridor detection algorithm is also proposed. To verify the effectiveness of proposed method, several simulations and experiments were carried out.

Key Words: Smart Wheelchair, Man-Machine Interaction, Corridor Detection, Action Control

1. 緒 言

近年の高齢化などに伴い、車いすの需要が増加している [1] [2]。現在市販されている車いすは、移動に際し、操作や安全の確認を搭乗者が自ら行わなければならないが、車いす利用者の 61% 以上は、十分な操作や安全の確認を行うことが困難であるため、障害物回避機能などのアシスト機能を搭載した車いすが必要であると言われている [2]。そのような背景から、機械側が搭乗者をアシストすることにより、安全で効率的な移動を可能にする研究が広く行われてきた [3]~[6]。しかし、それらの多くは、ジョイスティックによって操作することを前提としており、上半身が不自由であるなど、ジョイスティックを扱うことが困難である人は想定してこなかった。ジョイスティックに代わるデバイスである、音声認識や顔認識、ブレインマシンインタフェース (Brain Machine Interface: BMI) などを扱い、車いすを動かす研究も複数行われているが [7]~[11]、従来は主に、デバイスを利用していかに車いすを動かすかに焦点が当てられ、これらが一般的にもつ、入力方向が少ない、動作周波数が低いといった特徴を陽に考慮していない。そのため、移動に際して搭乗者

が複雑な入力を行い、車いすの方向を微調整したり、方向転換の度に車いすを停止させたりする必要があるなど、必ずしも効率的に移動が行えているとは言えず、操作時の搭乗者の負担が大きという問題があった。

これまでに、操作性の低いデバイスを利用する車いすのアシスト手法としては、自動走行 [9] と、リアクティブな障害物回避手法を適用するもの [7] [12] の二つのアプローチがある。前者は、搭乗者が直接車いすを操作する必要がないことから、操作性の低さはあまり問題とならないが、あらかじめ環境地図などの事前情報を必要とするため、事前に情報が得られない地点には移動できず、行動範囲に制限がある。後者は、障害物回避機能により安全に移動できるが、前述したように、デバイスの操作性の低さを補ってはおらず、効率的な移動が実現できていない。そのため、操作性の低いデバイスを用いる車いすの安全で効率的な移動には、デバイスの操作性を補い、かつ、環境地図を必要とせずアシスト可能なシステムを構築する必要があると考えられる。本研究では、このような操作性の低いデバイスを利用する車いすの安全で効率的な移動の実現を目的とする。

車いすが環境地図を持たずアシストを行うためには、各時刻において直進や右左折、障害物回避といった、搭乗者の行動意図を知り、センサ情報を基にリアクティブに行動を生成する必要がある。しかしながら、デバイスの操作性が低い場合、デバイスからの入力のみでは、どの方向を搭乗者が目指し、何を目的として入力を行ったのか不明瞭であるため、適切なアシストを

原 2011 年 11 月 9 日

^{*1}慶應義塾大学大学院理工学研究科

^{*2}慶應義塾大学理工学部

^{*1}Graduate School of Science and Technology, Keio University

^{*2}Faculty of Science and Technology, Keio University

■ 本論文は提案性で評価されました。

Fig. 1 Situation which deceleration is needed

行うことが難しい。すなわち、入力方向の少なさや低い動作周波数、といったデバイスの有する問題点を他のセンサ情報などを利用し、補完しなくてはならない。解決法の一つとして、顔の向きを利用する方法が提案されているが[11]、このように特定の動きを要求することは負担であり望ましくない。また、車いす利用者は、必ずしもそのような運動が可能とは限らない。

そこで本研究では、壁や人などの障害物を認識し、その回避を行うだけでなく、車いす周囲の通路認識を行い、デバイスから得られる入力情報に加えて、通路の位置情報を利用することで搭乗者の行動意図を推定する。そして、推定した行動意図や環境に応じた速度指令を決定し、安全で効率的な移動を可能にする車いすの行動制御手法を提案する。本研究では、数値シミュレーションと市販の電動車いすを利用した実験により、提案手法の有効性を次の二点から検証する。

(a) 十字路進入時および方向転換時の車いすの自動的な速度と角速度の調整

(b) 滑らかで効率的な通路の右左折

(a) は速度や角速度の調整をせずに移動した場合、右左折するための入力を行う時間を十分確保できず、方向転換に失敗する場合がある。加えて、十字路に進入した際、Fig. 1 のようにセンサで検知できない動的な障害物と接触する危険性を下げるためである。一方、(b) は方向転換のたびに停止するの必要をなくし、効率的な移動を実現するためである。

2. 車いすの制御システム

Fig. 2 に提案する制御システムの概略図を示す。本制御システムは操作入力と環境の認識結果を同時に考慮し、速度指令を決定する。その特徴は、ある時刻において同じ入力を搭乗者が行っても、環境の状態だけでなく、入力に応じて車いすへの出力が変化する点および周囲の通路の位置を行動決定時に利用する点である。次節以降、本制御システムにおける、通路検出手法、目標速度と目標角速度の設定方法および障害物回避手法について述べる。具体的な行動制御系の設計法については3章で述べる。本研究では、入力方向が「前」、「右」、「左」の三方向を与えることができ、その動作周波数が2.0 [Hz] であるような非侵襲型のBMIを用いて操作する車いすを仮定する[10][13]。

また、センサとして、前方を0 [deg] とし、 ± 120 [deg] の範囲で最大4.0 [m] まで周囲の物体との距離を測定できるレーザーレンジファインダー (Laser Range Finder: LRF) が搭載されている2輪駆動の電動車いすを制御対象として想定する。

Fig. 2 Overview of proposed assist facility system

Fig. 3 Corridor detection ($e_{th}=0.07$ [m], $w_{th}=0.30$ [m])

2.1 通路検出

提案する通路検出手法について説明する。ここで通路は、二つの平行な直線で表現できるものとする。まず、通路の候補を抽出するため、次式を用いて Fig. 3 に示すような、壁の端（本論文では以下、エッジ）を検出する。

$$|l_i - l_{i-1}| > e_{th} \quad (1)$$

ここで、 l_i は LRF の i 番目の距離データであり、 e_{th} はエッジ検出のための閾値である。すなわち、式 (1) を満たす場合、 i 番目のデータをエッジとみなす。このとき、 $l_i - l_{i-1}$ の正負に応じて、Fig. 3 に示すように、右側と左側に対応するエッジを区別する。ここではデータの番号付けを反時計回りに行っているため、 $l_i - l_{i-1}$ が正のときは右側、負のときは左側と認識する。

次に、右側から左側にエッジが切り替わる箇所の、エッジ間の円弧の長さ w_j を次式で計算する。

$$w_j = l_j \times r_{res} \times d_{edge} \quad (2)$$

式 (2) 中の l_j は車いすと右側のエッジの距離、 r_{res} は1スキャンあたりの LRF の角度分解能、 d_{edge} は右側と左側のエッジのスキャン番号の差である。そして、閾値 w_{th} を用いて、 $w_j \geq w_{th}$ であればそれを通路として検出し、右側と左側のエッジの中点方向を通路方向 φ_C とする。本研究では予備実験に基づき、 e_{th} を 0.07 [m]、 w_{th} を 0.30 [m] とした。これは幅 2.0 [m] の通路を、十字路の中心より手前 2.0 [m] 地点から検出するための値である。

さらに本論文では、上記の提案手法に加え、より正確に通路の位置を検出するため、文献[14]を参考にした、通路検出アルゴリズムも併用した。具体的には、位置の正確性は劣るが検出率の高い提案手法により、通路候補を検出する一方、文献[14]

Fig. 4 Example of Ferguson curve

を基にしたアルゴリズムで、通路の位置が正確に導出できた場合は、そちらを優先して利用するといった方法をとった。

2.2 目標速度および目標角速度の設定

操作入力と通路認識結果に基づき、目標速度と目標角速度を設定する。

初めに、目標速度の決定法について述べる。まず、車いすと前節で検出した各通路を結ぶ、Fig. 4 に示すような曲線を計算する。Fig. 4 の曲線は、次式のファーガソン曲線 [15] である。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_c(t) &= \begin{bmatrix} x_c(k) & y_c(k) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} k^3 & k^2 & k & 1 \end{bmatrix} \mathbf{A} \mathbf{B} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_s \\ \mathbf{x}_e \\ \mathbf{v}_s \\ \mathbf{v}_e \end{bmatrix} \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

α および β は係数であり、本論文ではいずれも試行錯誤的に 3 とした。また、式 (3) における k は 0 以上 1 以下の媒介変数、 $\mathbf{x}_s$ 、 $\mathbf{x}_e$ はそれぞれロボット現在地および通路の位置ベクトル、 $\mathbf{v}_s$ は、ロボットの速度ベクトルを正規化し、大きさ 1 としたベクトル、 $\mathbf{v}_e$ は、同様に大きさ 1 で通路方向のベクトルとする。これらのベクトルはすべて、車いすに固定された座標系を基準として計算する。本論文では、この曲線の曲率半径から、通路方向へ向かう場合に、どの程度旋回する必要があるかを評価し、行きすぎや急激な駆動とならないよう、車いすの並進速度の最大値 v_{max} を調整する。ここでは、曲線を追従するように車いすを制御するのではないことに注意されたい。 m 番めの通路と車いすを結ぶ曲線の曲率半径の最小値 r^m は次式で求められる。

$$r^m = \min_k \left| \frac{\left(\left(\frac{d^2 x_c}{dk^2} \right)^2 + \left(\frac{d^2 y_c}{dk^2} \right)^2 \right)^{3/2}}{\frac{dx_c}{dk} \frac{d^2 y_c}{dk^2} - \frac{d^2 x_c}{dk^2} \frac{dy_c}{dk}} \right| \quad (0 \leq k \leq 1) \quad (4)$$

Fig. 5 Region for avoiding obstacle

以上を用いて、検出された m 番めの通路に対する速度の最大値 v_{max}^m を次式で算出する。

$$v_{max}^m = \min(\sqrt{a_{max} r^m}, v_{wheel}) \quad (5)$$

a_{max} は車いすの旋回中心方向の加速度の最大値であり、ISO [16] で規格化されている人間が不快に感じにくいとされる加速度の範囲を参考に、本論文では $a_{max} = 0.3 [\text{m/s}^2]$ とした。 v_{wheel} は車いすが物理的に出すことが可能な最大速度である。本論文では $v_{wheel} = 0.75 [\text{m/s}]$ とした。すなわち、 v_{max}^m は旋回中心方向の加速度が、 a_{max} を超えずに、曲線上を移動可能な速度となる。これより、並進速度の最大値 v_{max} を次式で求める。

$$v_{max} = \max_m (\min(v_{max}^m, v'_{max})) \quad (6)$$

v'_{max} は、車いすが右左折しないにもかかわらず停止してしまい、移動できなくなることを防ぐための速度制限値の下限である。本論文では、 $0.25 [\text{m/s}]$ に設定した。

次に目標方向について述べる。目標方向は、操作入力があり、左側に通路が検出されていれば、検出された左側の通路を目標方向に、通路がない場合は目標方向を $25 [\text{deg}]$ に設定する。操作入力がある場合はその逆である。それ以外の場合は直進するように目標方向を定める。最後に回転角速度は、前方に通路が検出されている場合は、最大値 ω_{max} を $15 [\text{deg/s}]$ にする。これは、回転中に前方に通路が発見された場合、回転を遅くすることにより、入力を待ち、前方に進むのか、さらに回転を行い、別の通路を目指すのか判断するためである。それ以外の場合、 ω_{max} を $45 [\text{deg/s}]$ にする。

2.3 障害物回避

車いすが障害物と接触しないようにするため、相対的な位置関係に基づき、LRF の各観測点に対し、Fig. 5 に示す灰色で示す領域を計算する。各観測点に対して上記の領域を計算するため、任意形状の障害物を回避することが可能である。Fig. 5 に示す灰色で示す領域は、車いすに外接する半径 r_{wheel} の円に対し、その中心が移動した場合に、観測点と距離 d_{th} 以上を保ちながら移動可能な領域を表す。具体的には、次式で計算される、方向 φ_R と φ_L の外側を車いすが移動するように制御を行い、障害物を回避する。ここで次式の l_o は、車いすと観測点との距離である、

$$\varphi_R = \varphi_L = \arcsin((r_{wheel} + d_{th})/l_o) \quad (7)$$

3. ファジィポテンシャル法に基づく行動制御系の設計

2章で述べたシステムの実現には、目標方向への移動や障害物回避などの様々な要求を考慮し、車いすの制御を行う必要がある。本研究では、提案するシステムのリアクティブな行動制御手法に基づく設計の一例として、複数の要求を同時に考慮することが可能な、ファジィポテンシャル法 (Fuzzy Potential Method: FPM) [17] に基づく行動制御の設計法を提示する。FPM は目標方向への移動や障害物回避といった、各基本行動を表現する、横軸が車いす正面からの相対角度、縦軸がその角度に対する優先度を表すポテンシャルメンバーシップ関数 (Potential Membership Function: PMF) を作成し、それらをファジィ演算で統合することにより、各基本行動の要求を考慮して目標速度指令を決定する手法である。以下に、PMF の設計法および車いすの速度指令値の算出法を述べる。

3.1 目標方向に進むための PMF

車いすを目標方向に移動させるため、Fig. 6 に示す三角形の PMF μ_d を作成する。Fig. 6 の方向は反時計回りを正とし、車いす前方を 0 [deg] としている。頂点の位置 φ_d は、2.3 節で述べた目標方向であり、直進時は 0 [deg]、右左折時は ± 25 [deg] もしくは検出した通路方向 φ_c となる。しかし、Fig. 7 のように、壁とそのマージン d_{th} を考慮した場合に、通路方向への直接の進行が阻まれてしまう場合は、Fig. 7 に示す φ'_c を目標方向とする。これは、壁とそのマージンに進行が阻まれない方向の中で、 φ_c に最も近い方向、すなわちマージンに接する方向である。 $d_{th} = 0$ [m] の場合、 φ'_c は φ_c に一致する。グレードの最大値は常に 1.0 となるように設計する。

3.2 障害物を回避するための PMF

障害物を回避するため、Fig. 5 に示した φ_R と φ_L を用いて、Fig. 8 に示すような凹型の PMF μ_o^n を作成する。添え字 n は、 n 番目の障害物に対する PMF であることを表す。この PMF μ_o^n のグレード a は次式より算出する。ここで $l_o < l_{th}$ のとき、 a を 0 とせず、次式で求めるのは、FPM ではグレードの値で速度が決まるため、急減速しないようにするためである。式中の l_{th} は、障害物を回避し始める距離である。

$$a = \begin{cases} \frac{(l_o - d_{th} - r_{wheel})}{(l_{th} - d_{th} - r_{wheel})} & \text{if } l_o < l_{th} \\ 1.0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

そして、全 N 個の障害物に対する PMF の論理積をとること、で、周囲の障害物を回避するための PMF μ_o を得る。

$$\mu_o = \mu_o^1 \wedge \cdots \wedge \mu_o^N \quad (9)$$

3.3 指令値の決定

PMF を統合し、各要求を考慮した速さ v_{out} と角速度 ω_{out} を算出する。まず、PMF μ_d と μ_o の代数積をとり、PMF を統合する。

$$\mu_{mix} = \mu_d \cdot \mu_o \quad (10)$$

次に、車いすの進行方向 φ_{out} と速さ v_{out} を、式 (10) で統合した PMF と 2.2 節の式 (6) で算出した v_{max} を基に次式で計算する。

Fig. 6 Example of PMF μ_d

Fig. 7 Example situation which the driving of wheelchair is blocked by the wall and its margin

Fig. 8 Example of PMF μ_o^n

$$\varphi_{out} = \arg \max(\mu_{mix}) \quad (11)$$

$$v'_{out} = \mu_{mix}(\varphi_{out}) \cdot v_{max} \quad (12)$$

$$v_{out} = v'_{out} \left(1 - \frac{1}{1 + \exp(-\gamma(|\varphi_{out}|/90 - 0.5))} \right) \quad (13)$$

式 (13) は回転成分を優先するため、出力制限を行うシグモイド関数である [17]。設計パラメータ γ は、文献 [17] に基づき $\gamma = 25$ とした。最後に、角速度 ω_{out} は次式で決定する。

$$\omega_{out} = \min(\varphi_{out}, \omega_{max}) \quad (14)$$

4. 数値シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

提案する行動制御手法の有効性を検証するため、車いすを長さ 1.05 [m]、幅 0.65 [m] の長方形としてモデル化し、幅 2.0 [m] の通路を左折する数値シミュレーションを行った。ここで、デバイスからの入力 は 0.5 [s] 間隔でなされるが、車いすの制御は LRF の動作周波数に合わせて、0.1 [s] 間隔で行う。車いすは、Fig. 9

Fig. 9 Simulation environment for direction change

Table 1 Comparison of the methods

Method	Control of angular velocity	Target direction	Deceleration
Method 1	×	Fixed	None
Method 2	×	Fixed	uniformly 0.25 [m/s]
Method 3	○	Fixed	uniformly 0.25 [m/s]
Method 4	○	Corridor	uniformly 0.25 [m/s]
Proposed	○	Corridor	Dynamically

に示す、スタート地点 $(x, y) = (0.0 \text{ [m]}, 0.0 \text{ [m]})$ から初速度 0.0 [m/s] で移動を始めたあと、A, B, C のいずれかの地点から左折を開始する。これは、どの地点から左折を始めるかあらかじめ分からないためである。このとき車いすに与える入力は、自動で、スタートから A, B, C の各地点までは「前」、左折開始後、車いすのヨー角が 70 [deg] を超えるまで「左」、その後ヨー角が 70 [deg] から 110 [deg] の間は「前」を与えた。また、もし車いすのヨー角が左折後 110 [deg] を超えた場合は「右」の入力を与えた。ヨー角は初め 0 [deg] である。左折の成否は、車いすの中心が Fig. 9 に示すゴールの線を超えたかどうかで判定する。また、設計パラメータ $d_{th} = 0.3 \text{ [m]}$ とした。本研究では、以降、断りのない限り、以上のパラメータを用いて数値シミュレーションと実験を行う。具体的には Table 1 の四つの手法と提案手法で挙動を調査し、提案手法の有効性を検証する。

4.2 シミュレーション結果

Fig. 10 (a) に手法 1, Fig. 10 (b) に手法 2, つまり十字路手前で減速して移動した場合の車いすの軌跡を示す。図中の車いすは 2 [s] ごとにプロットされている。両シミュレーションともに同じタイミングで入力を開始しているが、手法 1 では、入力が間に合わず十字路を通過してしまい、左折を行えていないが、手法 2 では、通路を検出し、十字路手前で減速を行うことで、搭乗者の入力を待つことができたため、左折に成功していることが分かる。また、Table 2 に手法 1, Table 3 に手法 2 における全シミュレーション結果を示す。表における「○」はヨー角が 110 [deg] を超えることなく左折に成功、「△」はヨー角が 1 回以上 110 [deg] を超えたが左折に成功、「×」は左折に失敗したことを示す。Table 2 と Table 3 の比較から、減速を行うことで左折に成功しているケースが増加しており、十字路手前での減速により、右左折時の移動性能が向上することが分かる。

(a) Method 1 (b) Method 2
Fig. 10 Trajectory of wheelchair
(From position A, Target direction 22.5 [deg])

Table 2 Simulation result with method 1

Target direction [deg]	Starting Position $(x \text{ [m]}, y \text{ [m]})$		
	A (0.0, 6.0)	B (0.0, 5.0)	C (0.0, 4.0)
22.5	×	○	○
45.0	△	○	○
90.0	○	×	×

Table 3 Simulation result with method 2

Target direction [deg]	Starting Position $(x \text{ [m]}, y \text{ [m]})$		
	A (0.0, 6.0)	B (0.0, 5.0)	C (0.0, 4.0)
22.5	○	○	○
45.0	△	○	×
90.0	×	×	×

Table 4 Simulation result with method 3

Target direction [deg]	Starting Position $(x \text{ [m]}, y \text{ [m]})$		
	A (0.0, 6.0)	B (0.0, 5.0)	C (0.0, 4.0)
22.5	○	○	○
45.0	○	○	×
90.0	△	×	×

Fig. 11 (a) に手法 2, Fig. 11 (b) に手法 3, つまり減速に加えて回転時の角速度の調整を行った場合の車いすの軌跡, Fig. 12 に両シミュレーションにおける車いすのヨー角の時刻歴を示す。これらの結果より、両者ともに左折に成功しているが、手法 2 に比べ、角速度の調整を行う手法 3 のほうが、ヨー角の履歴は振動的になっておらず、角速度調整の有効性が確認できる。また、Table 4 に手法 3 における全シミュレーション結果を示す。Table 3 と Table 4 の比較より、角速度の調整を行うことで、急旋回を要する場合の右左折の質が向上していることが分かる。これは、目標方向が大きい場合、大きな角速度を出力するように制御がなされるが、手法 3 では、角速度の調整を行うことにより、入力を待ち、先に進行するかどうか判断する時間が与えられたためであると考えられる。

最後に、Fig. 13 に、Fig. 11 と同様の位置から左折した場合における、手法 4 と提案手法の軌跡を示す。また、Table 5 に手法 3, Table 6 に手法 4 と提案手法における、左折開始から終了までに要した時間を示す。Fig. 11 と Fig. 13 の比較から、

Fig. 11 Trajectory of wheelchair
(From position A, Target direction 45.0 [deg])

Fig. 12 Time history of yaw angle

Fig. 13 Trajectory of wheelchair (From position A)

目標方向を固定せず、通路方向に設定することで、右左折がより滑らかに行っていることが分かる。さらに、Table 5 と Table 6 から、目標方向を動的に調整し、車いすを通路方向へ誘導した結果、車いすの左折終了までの時間が、目標方向を固定した場合と比較し、短くなっていることが分かる。特に C 地点からの移動において 2 [s] 以上早く移動が終了している。したがって、目標方向を通路方向にすることで、様々な位置からの右左折に対し、効率的な移動が実現できると言える。また、手法 4 と提案手法の差は、通路検出時に一定値まで減速させるか、その位置関係に応じて動的に速度調整を行うかであるが、今回のシミュ

Table 5 Traveling time for turning to left

Target direction [deg]	Starting Position (x [m], y [m])		
	A (0.0, 6.0)	B (0.0, 5.0)	C (0.0, 4.0)
22.5	6.8 [s]	7.7 [s]	13.8 [s]
45.0	11.8 [s]	18.5 [s]	×
90.0	15.5 [s]	×	×

Table 6 Traveling time for turning to left

Target direction [deg]	Starting Position (x [m], y [m])		
	A (0.0, 6.0)	B (0.0, 5.0)	C (0.0, 4.0)
Method 4	6.5 [s]	7.7 [s]	11.4 [s]
Proposed method	6.2 [s]	7.3 [s]	9.9 [s]

レーションにおいては、軌跡に大きな差は見られなかった。しかしながら、Table 6 から、通路から遠い位置で左折を始めるほど、提案手法のほうが移動時間が短くなることが分かる。これは手法 4 では、通路が検出されている限り、速度が一定値に保たれるが、提案手法では、通路の位置に応じて動的に速度が調整されるため、0.25 [m/s] 以下まで減速している時間が短いのである。以上より、提案する制御システムは、操作性の低いデバイスを利用する車いすの移動性能を向上させると言える。

5. 実験

5.1 実験条件

提案手法の実環境における有効性を検証するため、**Fig. 14** に示す、長さ 1.05 [m]、幅 0.65 [m] のヤマハ発動機製車いす電動化ユニット JWX-1 を搭載した車いすを利用した実験を行った。車いすには LRF として、前方約 0.40 [m]、床面から高さ 0.10 [m] の位置に北陽電機製測域センサ URG-04LX-UG01 が設置されている。LRF は数値シミュレーションとは異なり、車いすの中心に設置されていないが、幾何計算を行い、車いす中心から見たデータに変換したものを制御では利用する。電動化ユニットの特徴から、両輪の速度を指令値として与えることができないため、最大速度を JWX-1 で与えることのできる最小値である 0.47 [m/s] と固定し、提案手法による速度の調節は行わない。また、車いすには、パソコンからキーボードを用いて、疑似的に 2.0 [Hz] の動作周波数で「前」、「右」、「左」の入力を与えた。車いすは LRF のデータ取得周期に合わせて 0.1 [s] 間隔で制御を行う。また、障害物とのマージン d_{th} を 0.25 [m] とした。

実験は、特に行う頻度が高いと考えられる、右左折（ここでは右折）および障害物回避の二つの車いすの操作を対象に行い、提案手法の有効性を検証する。比較手法としては、「前」で前進、「右」で時計回りにその場旋回、「左」で反時計回りにその場旋回、の三つの動作のみを行うことができる車いすを対象とした。また、実験における車いすの操作は、提案手法について事前知識のない、本大学の学生 10 名（男：7 名、女：3 名）が行った。それから、被験者は「前」、「右」、「左」の各方向に入力する際、キーボードを押し続けることで入力を行うが、先述したように、デバイスの動作周波数を疑似的に 2.0 [Hz] にしているため、機械側には入力が 0.5 [s] 間隔で変化して見える。

右折の実験では、**Fig. 15** および **Fig. 16** に示すような環境

Fig. 14 Overview of wheelchair

Fig. 15 Experimental condition for direction change

Fig. 16 Experimental environment for direction change

において、スタート地点からゴール地点に向けて、比較手法、提案手法の両方で、右折を行う実験を行った。その際、被験者には、スタート後、ゴール地点の線を車いすが完全に通過するまで操作を行い、通過し終わったら判断したら操作を止めるよう指示し、右折にかかった時間および左右方向への搭乗者の入力回数を比較する。

障害物回避実験では、Fig. 17 および Fig. 18 に示すような環境において、幅 0.5 [m]、長さ 0.3 [m] の障害物を、車いすを操作し、回避しながら前進する実験を行った。また提案手法が、設定したマージンを維持して障害物を回避できるか確認するため、Fig. 19 に示すように、障害物周囲にマージンを視覚的に示すための線を引いた。車いすは、そのまま直進を行った場合、障害物に衝突するような位置から移動を開始する。また、車いすの操作は、右折の実験と同様、ゴール地点の線を車いすが完全に通過するまで行い、障害物回避にかかった時間および左右方向への搭乗者の入力回数を比較する。本実験では、提案手法がどのように搭乗者をアシストするかについて、被験者には事前に説明を行わず操作を行ってもらった。また、全試行は、比較手法で車いすを操作後、提案手法で操作をするという順番で行った。

Fig. 17 Experimental condition for obstacle avoidance

Fig. 18 Experimental environment for obstacle avoidance

Fig. 19 Experimental environment around obstacle

5.2 実験結果

5.2.1 右折

比較手法で移動した場合と提案手法で移動した場合の右折の様子を動画として撮影した。Fig. 20 に 1 人の被験者の移動の様子、Fig. 21、Fig. 22 にそのとき搭乗者が与えた入力の履歴を示す。図中の 0 から 3 までの数字はそれぞれ、「0: 入力なし」、「1: 前」、「2: 左」、「3: 右」に対応する。

Fig. 20 (a)、Fig. 20 (b) の結果を比較すると、提案手法のほうが比較手法より短時間で移動が終わっていることが分かる。これは提案手法では停止することなく、滑らかに右折できたのに対して、比較手法では車いすの進行方向を変えるために、一度停止し、旋回する動作を、2 回行う必要があったためである。実際に、Fig. 21 および Fig. 22 の入力の時刻歴から、提案手法では、右方向への入力は 5 [s] から 1 回、4 [s] 程度行っただけとなっているが、比較手法では、2 回右方向への入力を行っていることが確認できる。

また、Table 7 に各被験者が実験中、右もしくは左に入力した回数、Fig. 23 に移動に要した時間を示す。提案手法の方が比較手法に比べ、入力回数が少なく移動を行っており、ほとんどの被験者は提案手法において 1 回の右方向の入力で移動を終えている。これから、提案手法は比較手法に比べ、より少ない入力で右折を行うことができると考えられる。そして、いずれの被験者も比較手法で移動する場合より、提案手法で移動した場合の方が、入力を終えるまでの時間が短くなっており、移動時間も短縮できている。以上の結果より、実環境においても提案手法は、少ない入力で効率的な右折を、操作性の低いデバイスを用いる車いすで実現できることが分かった。

(a) Comparative

(b) Proposed

Fig. 20 Experimental result of direction change **Fig. 21** The input commands with comparative method in direction change experiment **Fig. 22** The input commands with proposed method in direction change experiment

5.2.2 障害物回避

前項の実験と同様に、比較手法で移動した場合と、提案手法で移動した場合の障害物回避の様子を動画像として撮影した。**Fig. 24**に1人の被験者の移動の様子、**Fig. 25**、**Fig. 26**にそのとき搭乗者が与えた入力履歴を示す。

Fig. 24の左右を比較すると、右折の実験と同様、提案手法の

Table 7 Input times to right or left while changing direction

Method	Subject									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Comparative	2	2	4	4	2	3	2	3	4	2
Proposed	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1

Fig. 23 Traveling time till finish turning to right

(a) Comparative

(b) Proposed

Fig. 24 Experimental result of obstacle avoidance

ほうが比較手法より短時間で移動が終わっていることが分かる。これは提案手法では障害物回避を自動的に行ったことによって、滑らかに移動することができたが、比較手法では3回ほどその場旋回を行い、小刻みに進行方向を調整する必要があったためである。これは**Fig. 25**、**Fig. 26**に示した搭乗者の入力からも確認でき、左右方向への入力回数は提案手法のほうが少なく、入力を終えるまでの時間も短い。

また、**Table 8**に各被験者が実験中、右もしくは左に入力した回数、**Fig. 27**に障害物回避を終了するまでに要した時間を示す。ここで、**Table 8**の「×」は障害物に衝突し、回避に失敗したことを表している。**Table 8**から、多くの被験者が移動

Fig. 25 The input commands with comparative method in obstacle avoidance experiment

Fig. 26 The input commands with proposed method in obstacle avoidance experiment

Table 8 Input times to right or left while avoiding obstacle

Method	Subject									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Comparative	5	4	×	2	3	3	3	3	3	5
Proposed	2	2	0	2	1	2	2	2	3	3

Fig. 27 Traveling time till finish avoiding obstacle

に際し、比較手法に比べ、左右方向への入力回数を減らすことができていことが分かる。特に被験者 C は左右方向に 1 回も入力することなく、障害物回避が行えている。これは、提案手法が自動的に搭乗者の目標を判断し、移動を行ったことによって、比較手法に比べ、細かな操作が不要になったことが主な理由として考えられる。さらに、Fig. 27 をみると、提案手法では比較手法のように、その場旋回等を行う必要がなかったことにより、多くの被験者が移動時間を短縮できていることが確認できる。被験者 D および被験者 F は、提案手法を適用したことで移動時間が増加しているが、これは、提案手法について事前知識がなかったことや、操作に慣れていなかったことが主な要因として考えられる。実際、被験者 C のように、今回のような障害物との位置関係では、提案手法は左右方向への入力を行わずとも、前方向への入力のみを与えることで、車いすが自動的に障害物を回避し、前進することができ、この特徴をあらかじめ知っていれば、効率的に移動が行えたと考えられる。

(a) Comparative (b) Proposed

Fig. 28 The input commands with conventional method 2

最後に、いずれの試行においても提案手法は、障害物やその周囲の壁などに衝突することなく、Fig. 19 に示したマージン内に車いすが侵入することはなかった。また、何人かの被験者は、比較手法では、Fig. 28 (a) のように、操作ミスや判断ミスにより、障害物に衝突してしまったり、障害物に非常に近づいてしまったりする場面が見受けられたが、同じ被験者でも、提案手法を適用することで、Fig. 28 (b) に示すように、障害物からマージンの距離を保ちながら移動が可能になったことを確認した。

以上より、提案手法は実環境においても、搭乗者の安全を確保しながら、少ない入力で効率的な障害物回避を、操作性の低いデバイスを用いる車いすにおいて実現できることが分かった。

6. 結 言

本研究では、入力方向が少ない、動作周波数が低いといった特徴を持つ、操作性の低いデバイスを利用して操作する電動車いすの安全で効率的な移動の実現を目的とした。デバイスの操作性の低さを補い、安全で効率的な移動を実現するアシストを行うため、搭乗者の操作入力と車いすに取り付けられた外界センサから得られる環境情報を同時に考慮し、搭乗者の行動意図を推定した。そして推定した行動意図や環境に応じた速度指令を決定し、移動を行う、車いすの行動制御手法を提案した。また、アシストシステムの具体的な設計法として、ファジィポテンシャル法に基づく行動制御系の設計例を提示した。さらに、環境認識のため、レーザレンジファインダを利用した、簡易的な通路検出アルゴリズムも提案した。そして、数値シミュレーションと市販の車いすを利用した実験を通じ、提案手法がデバイスの操作性の低さを補い、それを利用する車いすの、安全性と移動の効率性を向上させることを示した。

今後の課題としては、実物のブレインマシンインタフェースを利用した提案手法の有効性の検証、ノイズや入力ミスなどに起因する、操作入力の不確かさへの対応、行動制御系では今回考慮していない、車いす移動時に発生する前後および左右方向の振動低減による乗り心地の向上などが挙げられる。

謝 辞 本研究の一部は文部科学省グローバル COE プログラム「環境共生・安全システムデザインの先導拠点」によるものであることを記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- [1] ハンドル形電動車いすの安全性調査報告書。独立行政法人製品評価技術基盤機構、2008。
- [2] R. Simpson, E. LoPresti and R. Cooper: "How many people would benefit from a smart wheelchair?," Journal of Rehabilitation Research and Development, vol.45, no.1, pp.53-72, 2008.
- [3] S. Levine, D. Bell, L. Jaros, R. Simpson, Y. Koren and J. Borenstein: "The NavChair Assistive Wheelchair Navigation

- System,” IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, vol.7, no.4, pp.443–451, 1999.
- [4] E. Deemester, A. Huntemann, D. Vanhooydonck, G. Vanacker, H.V. Brussel and M. Nuttin: “User-adapted plan recognition and user-adapted shared control: A Bayesian approach to semi-autonomous wheelchair driving,” Autonomous Robots, vol.24, pp.192–211, 2008.
- [5] S. Katsura and K. Ohnishi: “Semiautonomous Wheelchair Based on Quarry of Environmental Information,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.53, no.4, pp.1373–1382, 2006.
- [6] E. Prassler, J. Scholz and P. Fiorini: “A Robotic Wheelchair for Crowded Public Environments,” IEEE Robotics and Automation Magazine, vol.8, pp.38–45, 2001.
- [7] R. Simpson and S. Levine: “Voice Control of a Powered Wheelchair,” IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol.10, no.2, pp.122–125, 2002.
- [8] T. Saitoh, N. Takahashi and R. Konishi: “Development of an Intelligent Wheelchair with Visual Oral Motion,” IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication, pp.145–150, 2007.
- [9] I. Iturrate, J. Antelis, A. Kubler and J. Minguez: “A Noninvasive Brain-Actuated Wheelchair Based on a P300 Neurophysiological Protocol and Automated Navigation,” IEEE Transactions on Robotics, vol.25, no.3, pp.614–627, 2009.
- [10] 青木治雄, 田中拓哉, 大竹博, 田中一男: “脳波を利用した運動イメージの識別と外界センサを利用した電動車椅子制御”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, 2011.
- [11] 足立佳久, 中西知, 久野義徳, 島田伸敬, 白井良明: “顔の視覚情報処理を用いた知的車椅子”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.3, pp.423–431, 1999.
- [12] G. Vanacker, J. Millan, E. Lew, P. Ferrez, F. Moles, J. Phillips, H. Brussel and M. Nuttin: “Context-Based Filtering for Assisted Brain-Actuated Wheelchair Driving,” Computational Intelligence and Neuroscience, vol.2007, pp.1–12, 2007.
- [13] J. Millan, F. Renkens, J. Mourino and W. Gerstner: “Noninvasive Brain-Actuated Control of a Mobile Robot by Human EEG,” IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol.51, no.6, pp.1026–1033, 2004.
- [14] J. Laarson, M. Broxvall and A. Saffiotti: “Laser Based Corridor Detection for Reactive Navigation,” Industrial Robot, vol.35, no.1, pp.69–79, 2008.
- [15] 三浦曜, 望月一正: CAD・CG 技術者のための実践 NURBS. 工業調査会, 2004.
- [16] ISO-2631-1:1997, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration- Part 1. General requirements, 1997.
- [17] 津崎亮一, 吉田和夫: “ファジィポテンシャル法に基づく全方位視覚を用いた自律移動ロボットの行動制御”, 日本ロボット学会誌, vol.21, no.6, pp.656–662, 2003.

石原 悠 (Yu Ishihara)

2010 年慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。2012 年慶應義塾大学大学院理工学研究科前期博士課程修了。(日本ロボット学会学生会員)

高橋正樹 (Masaki Takahashi)

2004 年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了。博士(工学)。主に知的制御, ロボット工学, 宇宙工学, ソフトコンピューティング, 人工知能の研究に従事。現在, 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科准教授。IEEE, AIAA, 日本機械学会, 日本航空宇宙学会, 計測自動制御学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)