

背面圧力分布を利用した電動車椅子操縦システムの開発

大塚 弘文* 吉川 大史**

A Development of Electric Wheel Chair Maneuvering System Using Pressure Distribution of Chair Back

Hirofumi Ohtsuka*, Daishi Yoshikawa**

Recently, some developments for a high performance wheelchair have been proposed. For example, the hand-free control system of wheelchair is one of the useful function in the case that operator wants to do the handwork. In this study, we propose an intelligent wheelchair maneuvered by operator's posture change. When we drive a car or motorcycle, we intend to incline our body to the traveling direction. So, the amount of posture change involves the operator's intention to move with expecting direction and velocity. We arranged the pressure-sensitive mat on the back of wheelchair in order to measure of the amount of posture change, and also developed a control signal generating system by the use of pressure distribution data. In this report, we describe a concrete composition of the control system and results of evaluation experiment.

キーワード：車椅子，ファジィ制御，推論法，人間-機械系，意思推定

Keywords: Wheel chair, Fuzzy control, Inference method, Human-machine system, Intension estimation

1. はじめに

最近，身体障がい者や高齢者，重傷患者の移動手段として多用されている電動車椅子の高機能化に関する研究開発が活発に行われている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾．例えば，ジョイスティック操作では手を車椅子の操縦のために拘束してしまい，ツールや荷物を把持しながらの移動や労働・作業を伴う際には非常に不便であることから，ハンドフリーで操縦可能とする知的電動車椅子操縦システム開発が注目されている⁽¹⁾⁽²⁾．

本研究ではそのようなシステムとして利用者の運転姿勢の変化によって操縦可能な電動車椅子を提案する．人が車やバイクを運転する際には身体を進行方向に傾斜させる動作が見られる．そこで，この姿勢変化量は操縦者の意図する移動方向や移動速度を反映しているものと考え，車椅子座席背面に配置した圧力分布センサーにより姿勢変化量を計測し，その計測値に基づき操縦指令信号を生成する制御装置の開発を検討する．

本論文では，操縦システムの具体的な構成と，操縦性能

の検証実験結果について示すが，特に特定被験者による日常生活を模したテストコースの走行実験と，複数被験者による前後進や左右旋回動作を含む操縦実験により得られた汎用性検証実験結果を示す．

2. 基本概念

日常生活において，何かツールを把持しながら，なおかつ移動を伴う作業は非常に多い．そのような場面において車椅子利用者は移動のために両手，あるいは片手を拘束されてしまうので実行可能な手作業は制約される．そこで，ハンドフリーで操縦可能な電動車椅子を提案する．なお，本研究では以下の点に留意して開発を行う．

1. 利用者の身体に操縦装置の装着は行わない
2. 既存の電動車椅子への追加機能としてハンドフリー操縦システムを付加する

身体への操縦装置の装着は，利用可能な身体状況を制限する可能性がある．装置装着を省くことで，装置装着の手間や操縦装置による違和感を無くし，肉体的疲労及び精神的疲労の軽減が期待できる．また，追加機能として付加することで，従来型電動車椅子の利用者も違和感無く利用でき，汎用性の向上が期待できる．

我々が車やバイクを運転する際の移動方向に身体を傾斜させるという行動の観察を通して，姿勢変化量には操縦者の意図する移動方向や移動速度が反映されているものと予測できる．

* 制御情報システム工学科
〒 861-1102 熊本県合志市須屋 2659-2
Department of Control and Information Systems Engineering
2659-2, Suya, Koshi, Kumamoto 861-1102

** 化学及血清療法研究所生産技術部
〒 860-8568 熊本市大窪一丁目 6 番 1 号
The Chemo-Sero-Therapeutic Research Institute
1-6-1, Okubo, Kumamoto-shi, Kumamoto 860-8568

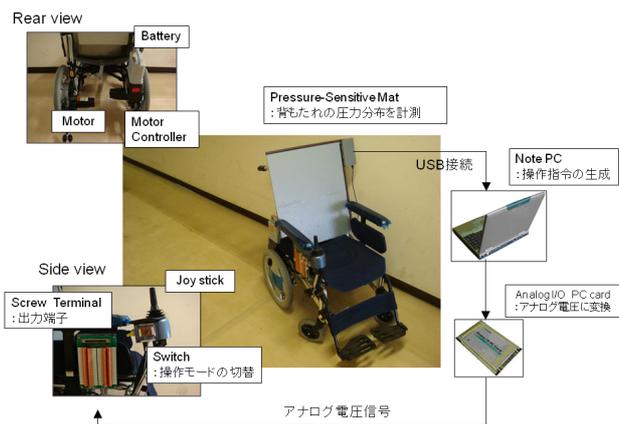


図1 システムの外観

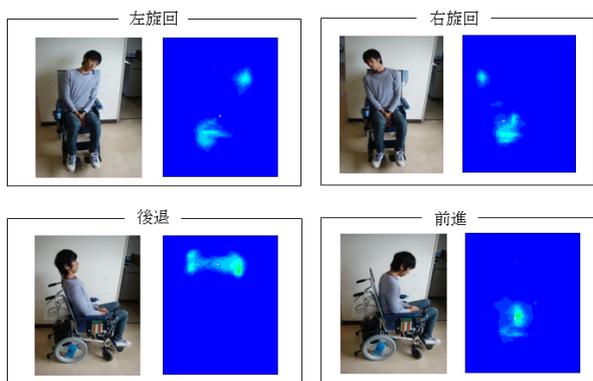
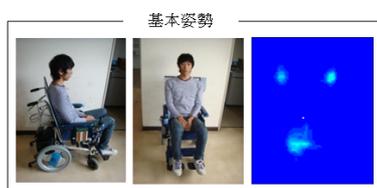


図2 圧力分布例

そこで、車椅子背もたれに圧力分布センサーを配置し、背面の圧力分布形状として得られる姿勢変化量を用いて、操縦指令信号を生成するものである。移動したい方向に身体を傾斜させる行動は自然かつ無意識的に行われるため、この操縦法の操縦者に与えるストレスは少ないことが期待できる。システムの構成要素と性能評価実験について、以下に述べる。

3. システムの概要

図1にシステムの外観を示す。車椅子の背もたれに圧力分布計測マット(株式会社シロク製、電磁誘導方式で駆動する検出素子が12.5[mm]間隔で縦45個、横37個配置されている。圧力に応じて電磁結合が変化し、その結合係数を出力する。)を設置し、操縦者の姿勢変化により生じる背面圧力分布データを計測する(図2)。圧力分布データはUSBインターフェイス装置を介してノートブック型パーソナルコンピュータ(以下、ノートPCと略記する。)へ伝送する。

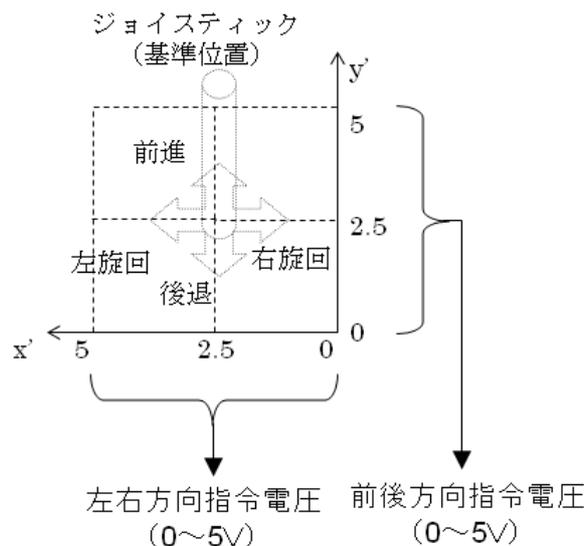


図3 ジョイスティックと出力電圧

ノートPC内部では、背面圧力分布データを入力変数として、電動車椅子のモータコントローラへの操縦指令値がファジィ推論に基づき算出される。この算出値はアナログI/O PCカード(株式会社コンテック製、ADA16-32(CB)F)によりアナログ電圧に変換され、モータコントローラへと出力されることとなる。

以上のハンドフリー操縦と通常のジョイスティックによる操縦との操縦モード切り替えはスナップスイッチの切り替えにより行う。ジョイスティックは、操縦に応じて前後方向(y' 軸)、左右方向(x' 軸)について、それぞれ0~5[V]の操縦指令電圧をモータコントローラへ与える。基準位置では前後、左右方向いずれも2.5[V]を与える(図3)。

4. 操縦指令信号生成システム

図4に操縦指令生成フローを示す。まず、取得した圧力分布データより特徴量の抽出を行う。求める特徴量は圧力分布の重心位置と加圧面積の重心位置とする。そして、姿勢変化時の重心位置と初期姿勢での重心位置の偏差をファジィ入力(前件部変数)とし、ファジィ規則に基づき、ファジィ推論を行う。なお、このとき後件部変数は図3に示すジョイスティックの出力電圧に対応するように作成する。そして、得られたファジィ推論結果に対し、マックスミニ重心法⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いて代表値を生成し、操縦指令信号とする。

4.1 ファジィ入力変数の算出 ノートPCでは、背面圧力分布データを用いてファジィ入力変数を作成し、マックスミニ重心法に基づくファジィ推論法を用いてジョイスティックの操縦指令に相当する操縦指令信号を生成する。本研究では、操縦姿勢の変化に伴う背面圧力分布データの特徴量として、以下の2種類の算出方法により圧力分布重心位置を求め、これをファジィ入力変数とする手法を検討する。いま、圧力分布重心位置を (g_x, g_y) と表記するものとし、

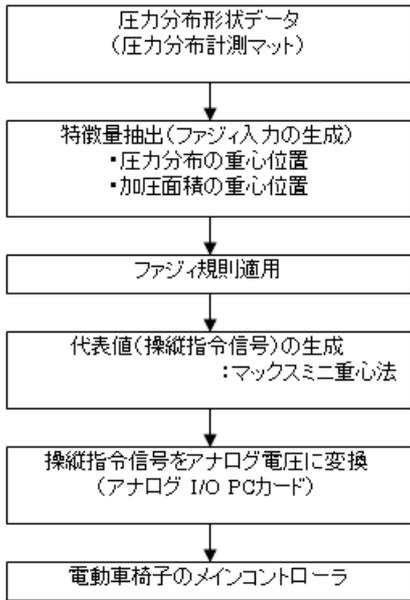


図 4 操縦指令生成フロー

$$g_{mx} = \frac{\sum_{i=1}^{37} \sum_{j=1}^{45} p_{ij} x_i}{\sum_{i=1}^{37} \sum_{j=1}^{45} p_{ij}} \dots\dots\dots (1)$$

$$g_{ax} = \frac{\sum_{i=1}^{37} \sum_{j=1}^{45} p'_{ij} x_i}{\sum_{i=1}^{37} \sum_{j=1}^{45} p'_{ij}} \dots\dots\dots (2)$$

$$g_{my} = \frac{\sum_{i=1}^{37} \sum_{j=1}^{45} p_{ij} y_j}{\sum_{i=1}^{37} \sum_{j=1}^{45} p_{ij}} \dots\dots\dots (3)$$

$$g_{ay} = \frac{\sum_{i=1}^{37} \sum_{j=1}^{45} p'_{ij} y_j}{\sum_{i=1}^{37} \sum_{j=1}^{45} p'_{ij}} \dots\dots\dots (4)$$

$$p'_{ij} = \begin{cases} 1 & (p_{ij} > 0) \\ 0 & (p_{ij} = 0) \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 p_{ij} は (x_i, y_j) における圧力測定値を表す。

$g_x = g_{mx}, g_y = g_{my}$ により入力変数とする方法を Case-1、 $g_x = g_{ax}, g_y = g_{ay}$ とする方法を Case-2 とする。図 5 および図 6 に Case-1 と Case-2 の場合の重心位置算出対象立体図形の例を示す。Case-1 では圧力データが荷重係数となっているが、Case-2 では加圧部面積の重心が算出される。なお、Case-1、Case-2 それぞれの方法について、x 軸方向、y 軸方向各 7 つずつの評価基準を設け、図 7 に示すメンバーシップ関数を作成した。ここで、各メンバーシップ関数は、初期重心位置からの移動距離（偏差）の x 軸および y 軸の各成分を圧力センサー素子個数に 0 から 1 までのグレード値を出力とする形式で定義している。

4.2 操縦指令信号の生成 ジョイスティックは前後方向、左右方向それぞれ 0~5[V]（基準位置において前後方向 2.5[V]、左右方向 2.5[V]）のアナログ電圧指令を電動車椅子のメインコントローラに与えることを前述した。つまり、ジョイスティックの操縦指令に相当するアナログ電圧

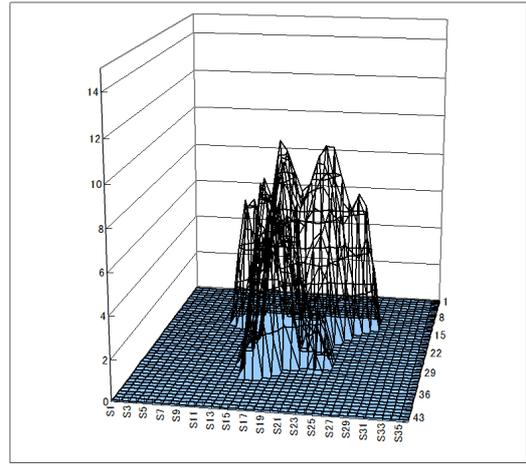


図 5 重心位置算出対象例 (Case-1)

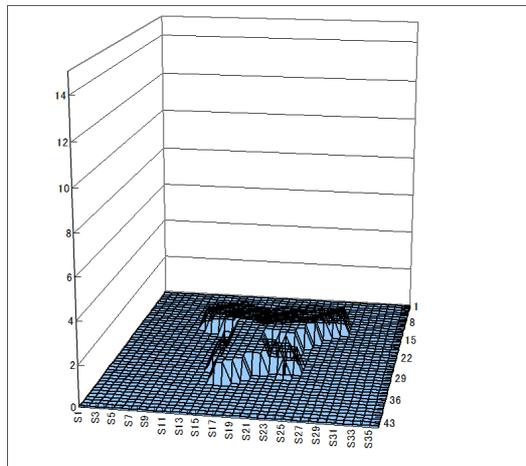


図 6 重心位置算出対象例 (Case-2)

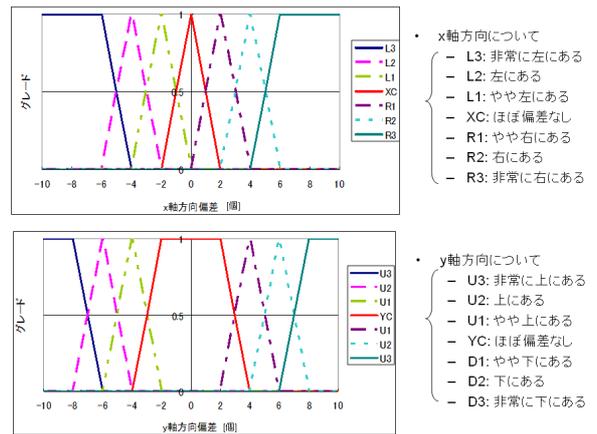


図 7 前件部メンバーシップ関数

指令を生成し、電動車椅子のメインコントローラへ与えることで、電動車椅子の操縦が可能になる。そこで、ジョイスティックを「前 (F)」「後 (B)」「左 (L)」「右 (R)」「左前 (FL)」「右前 (FR)」「左後ろ (BL)」「右後ろ (BR)」に倒す操作と、基準位置にある状態をメンバーシップ関数で表現した (表 1) (図 8 にジョイスティック操作とメンバーシッ

表 1 後件部メンバーシップ関数

評価基準		メンバーシップ関数
(操縦方向は) 前	F	$\mu_x(x', y') = 1 - \left -\frac{1}{2.5}x' - 2 - \frac{1}{2.5}y' \right $
後	B	$\mu_x(x', y') = 1 - \left -\frac{1}{2.5}x' - \frac{1}{2.5}y' \right $
左	L	$\mu_x(x', y') = 1 - \left 2 - \frac{1}{2.5}x' - \frac{1}{2.5}y' \right $
右	R	$\mu_x(x', y') = 1 - \left \frac{1}{2.5}x' - \frac{1}{2.5}y' \right $
左前	FL	$\mu_{xz}(x', y') = 1 - \left 2 - \frac{1}{2.5}x' - 2 - \frac{1}{2.5}y' \right $
右前	FR	$\mu_{rx}(x', y') = 1 - \left \frac{1}{2.5}x' - 2 - \frac{1}{2.5}y' \right $
左後ろ	BL	$\mu_{lx}(x', y') = 1 - \left 2 - \frac{1}{2.5}x' - \frac{1}{2.5}y' \right $
右後ろ	BR	$\mu_{rx}(x', y') = 1 - \left \frac{1}{2.5}x' - \frac{1}{2.5}y' \right $
移動しない	N	$\mu_x(x', y') = 1 - \left -\frac{1}{2.5}x' - \frac{1}{2.5}y' \right $

FR: 右前

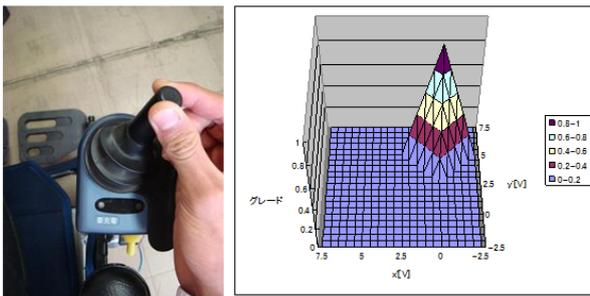


図 8 後件部メンバーシップ関数例

ブ関数の対応例として FR の事例を示す。) マックスミニ重心法を用いることで得られたファジィ推論結果に対して重心位置 $G'(g'_x, g'_y)$ を求め、その g'_x をジョイスティックの左右方向の操縦指令値 x' 、 g'_y を前後方向の操縦指令値 y' (いずれも 0~5 の範囲内の電圧指令値) として出力する。

4.3 ファジィ規則 ファジィ規則(表 2)に示す。最上行に前件部 1 (x 軸方向偏差)、最左列に前件部 2 (y 軸方向偏差) の評価基準を定めており、対応する欄内にその後件部を 4.2 節において定義したジョイスティック操作記号を用いて表記している。なお、各前件部の評価記号は図 7 と同様である。x 軸方向、y 軸方向ともに偏差が生じていない場合は、N (移動しない) とするが、車椅子の挙動変化により発生する操縦姿勢の微小変化によって重心移動が発生し得ることを考慮して、L1 (やや左にある) から R1 (やや右にある) および U1 (やや上にある) から D1 (やや下にある) に対応する 9 個の規則についても同様に N (移動しない) としている。また、後退動作は着座状態の操縦

表 2 ファジィ推論規則表

x 軸方向偏差に関する評価基準

	L3	L2	L1	XC	R1	R2	R3
U3	BL	L	B	B	B	R	BR
U2	BL	L	B	B	B	R	BR
U1	FL	FL	N	N	N	FR	FR
YC	FL	FL	N	N	N	FR	FR
D1	FL	FL	N	N	N	FR	FR
D2	FL	FL	F	F	F	FR	FR
D3	FL	FL	F	F	F	FR	FR

y 軸方向偏差に関する評価基準

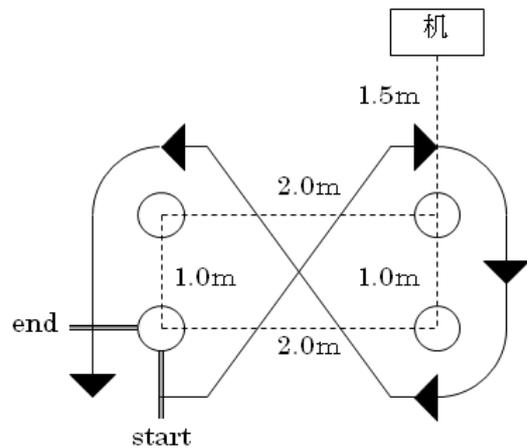


図 9 走行実験コース

者にとって後方の視認が困難であるので実行頻度が低く設定し、U1 (やや上にある) における L2, L3, R2, R3 については前進による左右の方向転換動作を行う規則に設定している。そして、後退動作となる B, BL, BR は U2 (上にある) および U3 (非常に上にある) に対して設定している。

5. 実験

5.1 特定被験者に対する実験 図 9 に示すテストコースにおいて、ペットボトル容器を乗せたトレー (総重量約 2[kg]) を両手で把持した状態での走行実験を行った。図 10 に走行状態の連続写真を示す。走行開始後、机に向かって、コーンの間を通過し、机上にトレーを置く。その後、矢印で示す 8 の字を描く順路に従いゴールへ向かう。図 9 中の印はコーンの位置を表す。走行実験は開発したシステムを用いた場合とジョイスティック操作の場合とでそれぞれ 10 回ずつ行った。表 3 に完走までに要した時間 (括弧内の数値はスタートからトレーを机上に置くまでに要した時間) を示す。そして、走破平均時間 84.6(s) に最も近い 6 回目

表 3 実験結果（走破時間）

回数	走破時間[s]	
	開発したシステム	ジョイスティック
1	75 (25)	39 (14)
2	102 (50)	40 (15)
3	102 (43)	39 (15)
4	83 (21)	42 (16)
5	62 (22)	10 (16)
6	85 (27)	39 (15)
7	67 (23)	41 (16)
8	114 (32)	41 (15)
9	80 (28)	37 (15)
10	76 (26)	38 (15)
平均	84.6 (29.7)	36.6 (15.2)

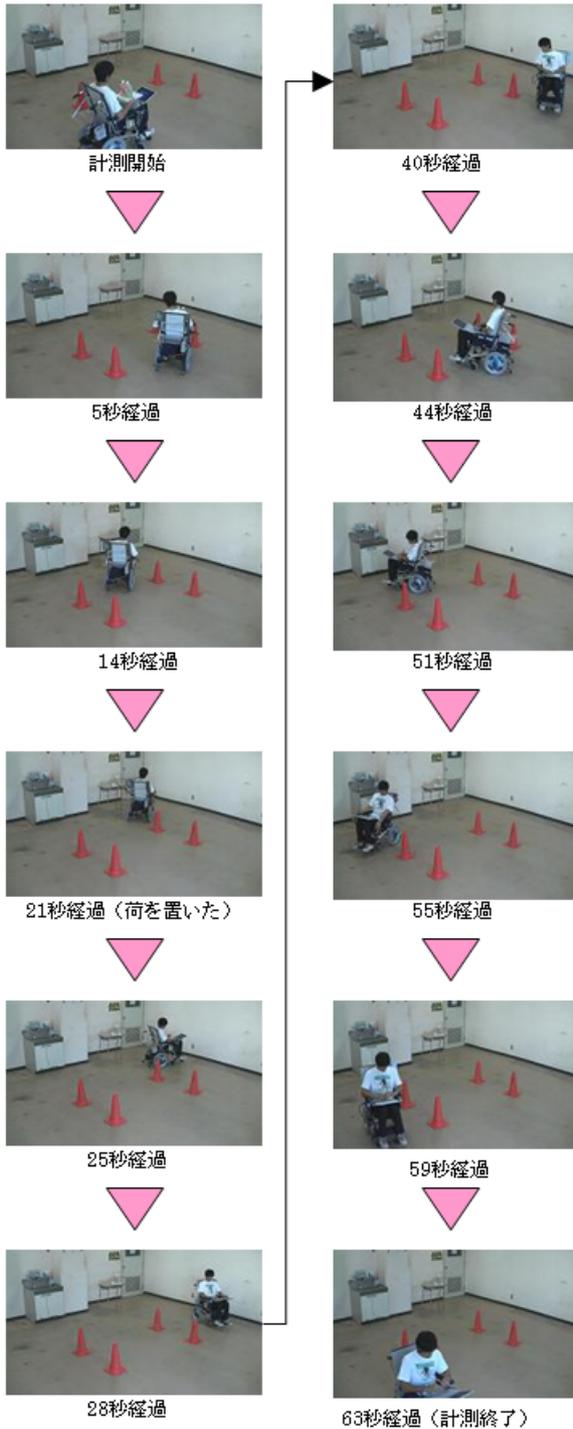


図 10 走行実験結果

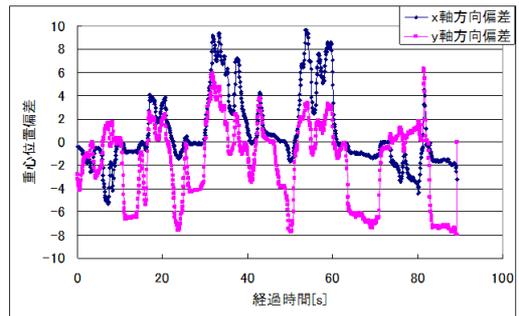


図 11 重心位置偏差信号

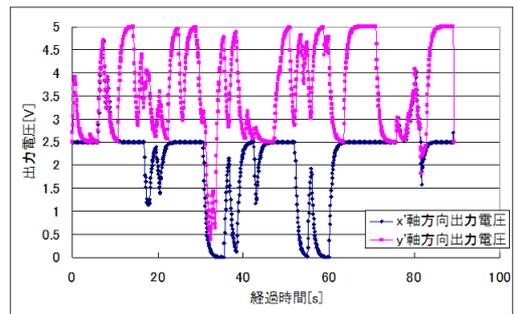


図 12 操縦指令信号

の実験における圧力分布重心偏差信号および操縦指令電圧信号を図 11 および図 12 にそれぞれ実験結果として示している。

また、理解を容易とするために、図 12 の操縦指令電圧履歴を図 3 に対応したジョイスティック出力電圧信号に変換したジョイスティック操作等価信号履歴を図 13 に示しておく。フリーハンド操縦の場合、試行毎に走破時間のバラつきが発生した。これは、実験中に操縦者が操作の不具合を

感じ、初期姿勢の再設定（初期化）をコース走行中に行ったためである。その結果、走破時間、トレーを机上に置くまでの時間の双方にジョイスティック操縦の場合の 2 倍程度の時間を要した。しかしながら、全ての実験でコースを完走できたことから、ジョイスティック操縦には劣るものの、設定した室内移動課題を達成するには十分な操縦性能を達成できていると考える。

「配膳作業を行う」という視点で見れば、ジョイスティック操縦の場合、片手でトレーを把持せざるを得ない不安定動作を示したが、フリーハンド操縦の場合は両手でしっかり把持することができ、安定感を損なうことはなかった。

5・2 複数被験者に対する実験 複数の被験者に対して、Case-1 および Case-2 の操縦性能比較実験を実施した。実験は図 14 に示すコースによる走行練習（2 分）とテスト走行（3 回）を Case-1, Case-2 の順に行った。実験直後に実

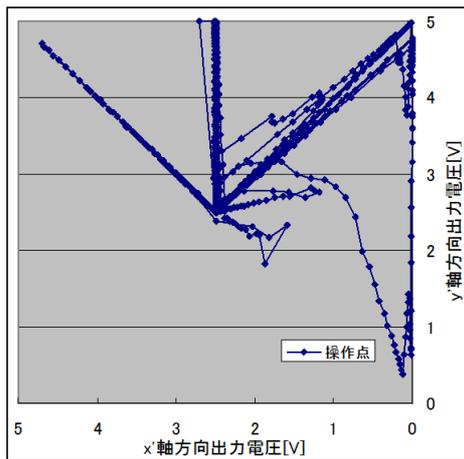


図 13 ジョイスティック操作等価信号

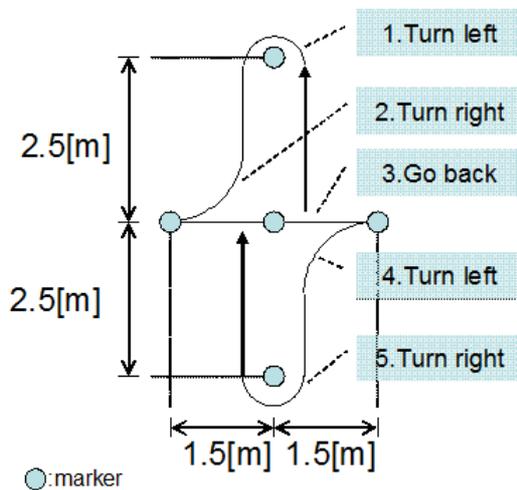


図 14 重心位置偏差信号

表 4 被験者アンケート結果

		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	average
Case-1	turn	2	2	1	3	5	2	2	2	4	4	2.70
	go straight	3	2	2	5	5	1	3	4	4	5	3.40
	acceleration	3	1	2	3	4	3	3	3	4	4	3.00
	deceleration	3	1	1	3	5	3	3	4	2	2	2.70
	easiness	3	2	2	5	5	1	4	3	3	4	3.20
Case-2	turn	3	3	2	3	3	4	5	3	2	3	3.10
	go straight	3	3	2	5	5	4	5	3	1	4	3.50
	acceleration	3	3	2	5	5	3	3	3	2	2	3.10
	deceleration	4	3	1	4	4	4	5	2	4	2	3.30
	easiness	4	3	1	5	4	3	4	3	3	4	3.40

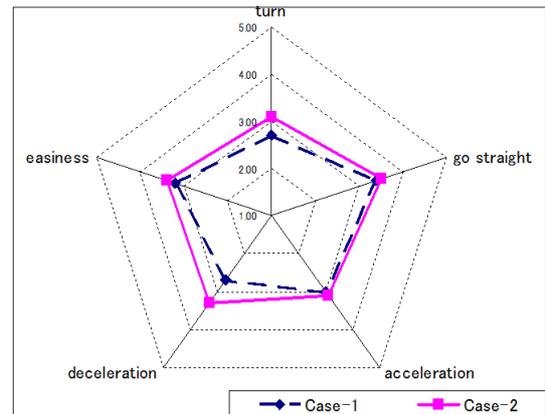


図 15 アンケート整理結果

施したアンケート調査結果（被験者数 10 名）を表 4 に示す。アンケートでは、旋回性・直進性・速度調節の容易さ・制動性・操作の簡単さの 5 項目の質問を設定し、それぞれ 5 段階評価で回答する形式とした。a～h は被験者を表す。5 項目全てにおいて Case-1 よりも Case-2 が高い評価平均値であることから、Case-2 の手法が有効であると考えられる。被験者からは、「より操作に慣れれば快適に操縦が出来ると予測できる」といった感想が得られている一方で、「初期姿勢によって大きく操縦感が変わる」といった感想も得られており今後の重要な解決課題である。

Case-1 に対して低い評価となった原因として、圧力分布重心位置は操縦者の脊柱や肩甲骨、筋肉量による背面形状の相違に左右されるため、被験者によっては姿勢変化による圧力分布重心位置に偏差が生じず、操縦指令に反映されにくいことが考えられる。

6. まとめ

本報告では、操縦者の姿勢変化によって生じる背面の圧力分布の変化を利用した電動車椅子の操縦システムを提案・試作し、走行実験によりその実現可能性を示した。特定被験者に対する実験より、手先によるジョイスティック操縦時と比較して円滑さにやや劣るものの、再現性のある操縦性能が得られた。また、複数被験者に対する実験より、操縦者の相違に対してハンドフリー操縦システムが十分に性能維持されることを実証した。操縦性能向上のためのファジィ規則調節指針の明確化が今後の課題であり、さらに初期姿勢の設定により操縦性能が劣化する場合があることを被験者から指摘されている点も重要な課題と位置づけられる。

また、実用化に向けた大きな課題としてフェールセーフの徹底、実生活環境における作業への適用実験、身体障がい者等による操縦性能評価実験が挙げられる。本稿で示した実験結果は健常者が操縦した場合の結果であるため、実用化に向けて身体障がい者の利用時においても動作確認しておくことが極めて重要である。

今後の展望として、より忠実に操縦者の意図を反映することを目的として、現状の圧力分布に基づく姿勢変化検出に加え、視線変化や音声認識といった他のハンドフリーセンシング法との複合システムの構築も考えられる。また、八

ンドフリー操縦電動車椅子の活動領域を比較的整備された環境から屋外や悪路へと広げること、車椅子利用者をより広範囲に社会復帰へ導くことを可能にするを考える。
(平成 21 年 9 月 25 日受付,平成 21 年 11 月 10 日再受付)

文 献

- (1) 中島康弘,安田星季,吉成哲,牧野功,但野茂:電動車いす用タッチパッド型コントローラの開発,北海道立工業試験場報告 No.301
- (2) R.A.M.Braga, M.Petry, A.P.Moreira, L.P.Reis: INTELL WHEELS ~ A Development Platform for Intelligent Wheelchairs for Disabled People ~ ,Proceedings of ICINCO 2008 FUNCHAL, MEDEIRA -PORTUGALMAY 11-15,(2008)
- (3) 天野隆,石部剛史:頭部操作式電動車椅子の製作,
http://www.tetras.uitec.ehdo.go.jp/download/GinouGijutu/200501/20050109/20050109_index.html
- (4) 横田祥,大山恭弘,橋本洋志,余錦華:身体動作操作に基づく電動車椅子,第 8 回システムインテグレーション部門講演会論文集,(2007)
- (5) 山下元,須田宏共著:ファジィ数学入門 ソフトサイエンスの基礎,森北出版株式会社(2006)
- (6) 坂和正敏著:ファジィ理論の基礎と応用,森北出版株式会社(1990)