力覚呈示機能をもつ車いす仮想体験システムの試作と空間認知実験*

藤本 英雄^{*1}, 陳 連 怡^{*1}
佐野 明 人^{*1}, 櫻井 陽 一^{*2}Development of Wheelchair Experience System with Force Feedback and
Experiments of Spatial Recognition in Virtual EnvironmentHideo FUJIMOTO, Lian-Yi CHEN,
Akihito SANO and Yoichi SAKURAI

As an application of virtual reality to welfare work, an obstacle experience system was proposed in which a healthy person can experience the situation with a wheelchair. It is considered that such wheelchair experience system is necessary in dealing with the wheelchair's problems such as the development of new wheelchair and other welfare implements, and the design of cities and various facilities. In this research, a wheelchair experience system, which is capable of moving in a virtual environment with vision information and force feedback, was constructed. This paper describes mainly the development of force feedback system and a fundamental experiment about the movement characteristics with spatial recognition. Experiments of distance assessing by movement are done in the real and virtual environment with the attention to concept of sensory integration and active to evaluate the necessity of force feedback. The results of the experiment are discussed and the effectiveness of present system are inspected.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Human Interface, Virtual Reality, Wheelchair Experience, Force Feedback, Spatial Recognition

1. 緒 言

近年、福祉・医療に関して社会的な関心が高まり、それに伴い福祉・医療分野への工学的研究がなされている⁽¹⁾。また、人工現実感（バーチャルリアリティ）が、新しいヒューマンインタフェース技術として注目され、さまざまな分野で応用研究が行われている。工学分野での人工現実感の最大の魅力は、人を中心と扱うその概念である。この意味から人を対象とする福祉工学への人工現実感の応用への期待が大きい。福祉分野では、リハビリテーション訓練のため、人工現実感のアミューズメント性やシミュレーション技術が用いられている⁽²⁾。

本研究では、人工現実感を利用した障害体験システムとして、車いす体験システムの開発を目的としている。車いすは、福祉機器としてよく利用されているが、その性能の限界や、都市環境の不整備によって、実際多くの問題が生じている。しかも、一般の人々の、これらの問題に対する認識は、極めて低く、対策も十分

ではない。そこで、車いす体験システムによって、車いすによる移動状況を仮想的に体験することにより、障害者に対する理解、車いすの問題の認識や、新たな車いすの開発、また車いすの移動特性を考慮した施設や都市の設計ができるのではと考えている。

数年前から、日本の労働省や米国のオハイオ州立大学で電動車いす操縦訓練用のシミュレータが開発されている。また最近、商用ベースの高齢者向け電動車いすシミュレータが開発され、福祉施設や病院などへの導入の動きが活発化してきている。一方、より多くの利用者がある手動車いすの体験システムの研究・開発例はまだ非常に少ないのが現状である。しかし、安易性、安全性およびリハビリ効果の面から、手動車いすの利用がこれからも広がっていくことが予想され、手動車いす体験システムの開発が急務とされている。

上述の理由から、本研究では手動車いすを対象としている。これまで開発してきたシステムでは、視覚呈示を中心としたものであった⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、仮想環境において、臨場感を高めるためには、できるだけ複数の感覚情報と運動系を整合させることが望ましい⁽⁵⁾⁽⁶⁾。近年、視覚に伴う触覚や力覚呈示の必要性が認識されつつある⁽⁷⁾。特に障害体験を考えたとき、例えば、実際の道路には必ず存在する坂道等での乗り具

* 原稿受付 1997年7月30日。

^{*1} 正員、名古屋工業大学工学部 (☎ 466-8555 名古屋市昭和区御器所町)。^{*2} 日本電信電話(株) (☎ 100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-7)。

合を体験する場合、よりリアルに困難さを呈示するためには、運動による力覚情報や環境からのフィードバックなどの力覚呈示が必要となる。

そこで、本論文では、感覚統合と能動性⁽⁸⁾の観点から、移動中の視覚情報とともに車いすを漕いだときの力覚情報に着目し、力覚呈示システムを開発、新たに力覚情報や環境からのフィードバックなどの呈示機能を車いす体験システムに取入れる。さらに、手動車いすの移動による空間認知の問題は、ある意味で視覚と触運動（力覚を伴った車いすを漕ぐ動作）の統合の問題と見ることができることから、車いすの移動による空間認知を、新たに試作した車いす体験システムの評価基準として採用する。

2章では、空間認知に対して感覚統合の観点から、標準スケールにおける能動性の影響について調べる。3章では、試作した力覚呈示機能を付加したシステムの構成を述べる。4章では、平坦路と坂道を考慮した車いすの運動方程式、および力覚呈示・制御の方式について説明する。5章では、試作したシステムを用いて、車いす体験における力覚呈示の有意性について実験的な検証を行う。また、試作したシステムは実空間を反映することができるかどうか、システムの妥当性を確かめる。

2. 車いすの移動における能動性の影響

2.1 力覚呈示と能動性 これまでの人工現実感および福祉の研究では、組立作業やコンピュータの画像によるリハビリテーションのような手の届く範囲を対象とした視知覚空間と呼ばれる狭い範囲（スモールスケール）⁽⁹⁾のものが多く、それに対し、車いす体験システムでは、比較的大きな空間（標準スケール）を対象にしている。

従来の研究により、スモールスケールでの感覚統合には、能動性が影響することがわかっている⁽¹⁰⁾。一方、標準スケールでも能動性の影響があるとすれば、その現れである触運動に着目する必要がでてくる。すなわち、仮想空間で車いすによる移動状況を体験する場合、自分自身で車いすを漕ぐ際の力覚情報の呈示の必要性がでてくる。そこで、本章では、標準スケールにおける能動性の影響について調べてみる。

2.2 実空間における空間認知実験 標準スケールにおける能動性の影響を調べるために、感覚系と運動系の兼ね合いの中で認識が行われるという観点から、車いすの移動による空間認知の問題を取り上げる。すなわち、通常的車いすによる実空間での距離の

評価実験を行う。

車いすが直線移動できる環境を設定し、ゴールに目標を示す旗を立て、スタート地点からゴール地点の旗までの移動距離を刺激とする。また、移動方式として、次の二つを考える。

1. 自己移動方式（A：active）、被験者自身が車いすを漕ぐ。
2. 補助移動方式（P：passive）、第三者の人間に車いすを押してもらう。

被験者は、あらかじめ基準距離5mを移動して、その距離感覚を覚えておき、次に呈示距離を移動する。本実験では、呈示距離を4, 6, 8, 10, 12, 14mの6種類とする。また、6種類の距離をそれぞれ4回、ランダムに呈示する。さらに、自己移動、補助移動の両方式について実験するため、被験者一人につき試行回数は48回となる。

評価距離の回答は、あらかじめ覚えてもらった基準距離との比較で距離を評価し、目盛りづけされた直線経路の図に、ゴールの位置を書き込む方式で行った。なお、目盛りは最小が50cmである。被験者は男性3名で、車輪の回転数を数えたりせず、あくまでも直感的に距離の評価を行うように指示した。

2.3 結果と考察 実験結果は、被験者全員の幾何平均値を用いる。図1は、呈示距離に対する評価距離の幾何平均、距離ごとの全被験者での最大値、最小値を示している。横軸は呈示距離、縦軸は評価距離で

(a) Active movement

(b) Passive movement

Fig. 1 Results of distance estimate in real environment

ある。また、図1(a)は自己移動方式、図1(b)は補助移動方式の場合を示している。

図1の(a)と(b)を比較してみると、明らかに能動性のある自己移動方式の方が距離の評定のばらつきが小さい。能動性が欠けている補助移動方式では、呈示距離が基準距離の5mから長くなるに従って、評定距離の値のばらつきが大きくなる。

また、距離ごとの全被験者での評定距離の最大値と最小値のばらつきを比較してみると、自己移動方式の方が、補助移動方式より小さい。さらに、評定距離の誤差について、有意水準5%で t 分布を用いた統計的検定の結果から、自己移動方式と補助移動方式の間に6mの場合を除いて、すべての距離について有意差が見られた。

以上の結果から、自己移動が能動性の影響を有することによって、移動距離の認知の補助をしていると言える。すなわち、標準スケールでも視覚-触運動の統合に対する能動性の影響があると言える。したがって、仮想空間で車いすによる移動を体験する場合でも、車いすを漕ぐ際の力覚情報の呈示が重要であることがわかる。そこで、これまで試作してきた車いす体験システムに力覚呈示機能を付加し、視覚と力覚を統合したシステムを製作した。力覚呈示システムを含めた詳細を3章で述べる。

3. 力覚呈示機能をもつ車いす体験システム

3.1 車いすシステムの全体構成 図2に試作した車いす体験システムの概観図を示す。体験者は、定位置に固定された車いすに着座、頭部搭載形ディスプレイ(HMD)を装着し、車輪のハンドリムを操作することで、車いすによる移動を体験できる。車いすの移動量は、車輪に取付けたロータリエンコーダ(オムロン製、E6B2-CWZ6C)から算出し、頭部の動きは、磁気センサ(Polhemus社製3SPACE)により計測する。

Fig. 2 Experience system of wheelchair

仮想空間内の壁や床などの構造物の映像(CG)の構築には、RB2システム(VPL社製)を用いた。車いすの移動と頭部の動作に応じた仮想空間内の壁や床などの動画は、コンピュータ(Mac)によって計算し、ワークステーション(IRIS)によって描画する。その画像をスキャンコンバータによってNTSC信号(ビデオ信号)に変換し、HMDによって体験者に視覚呈示する。この視覚呈示システムに関しては、前報(3)、(4)を参照されたい。

3.2 力覚呈示システム

3.2.1 システム構成 図3に力覚呈示システムの外観を示す。また、図4は力覚呈示システムの構成図である。図3および4に示すように、車いすの後輪は、左右独立に二つのローラの上に乗せられている。車いすが乗ったローラをDCサーボモータによって、左右独立に駆動することによって、力覚呈示機能を車いす体験システムに付与している。具体的な力覚呈示方式は、4章で述べることとし、本項では力覚呈示部のハードウェアについて詳しく示す。

前方のローラには、車いすの移動距離を計測するために、ロータリエンコーダ(サンクス製、ORE-38-

Fig. 3 Force display system

Fig. 4 Force feedback system

2000 C 05) を取付けた。エンコーダの分解能は 2000 P/R である。また、制御用のパーソナルコンピュータ (NEC 製, PC 98) に取込むために、エンコーダカウンタボード (インタフェース製, AZI-6201) を使用した。

後方のローラは、DC サーボモータとタイミングベルトおよびプーリを介して結ばれている。力センサで体験者が車いすを漕ぐ力を測定し、力信号をひずみゲージアンプで増幅した後、A/D 変換器 (AZI-3123) を介して制御コンピュータに取込む。また、4 章で述べる制御入力を D/A 変換器 (AZI-3324) を介してサーボドライバに出力し、DC サーボモータを制御する。

3・2・2 駆動系 DC サーボモータはハーモニックドライブシステムズ製の RHS-20-3007 を使用した。このアクチュエータは、精密制御用減速装置 (ニューハーモニックドライブギア) を組込んだ高トルク、高精度のアクチュエータである。本研究で使用したモータは、1:100 の減速比である。また、サーボドライバとしてサーボランド製のはん用モーションサーボ (MOVOSVDM 6-A) を使用した。

ハーモニックドライブギア付の DC サーボモータは、図 4 に示すように 1:1 のギアを介してタイミングプーリに接続されている。さらに、タイミングベルトを介してローラに接続され、駆動力が伝達される。また、この駆動系は、左右に配置されており、左右の車輪に対して、独立に力覚呈示が可能となっている。

3・2・3 力センサ 体験者の漕ぐ力を測定するために、図 5 に示すような力センサを自作した。このセンサは、センサの一端を車軸側に、もう一端をハンドリム側に取付け、センサのひずみをひずみゲージにより検出することで、漕ぐ力を測定している。

構造材としてアルミを使用した。左右の力センサそれぞれにつき、4 枚のひずみゲージ (共和電気工業製, KGF-1-120-C 1-23 N 15 C 2) をはり付けてブリッジ

を構成した。また、ひずみゲージアンプ (ユニパルス製, AM 20) により信号増幅し、A/D 変換器を介してコンピュータ内に取込む。さらに、実際の測定結果に基づいて、最小二乗法による校正を行った。

4. 車いすの運動と力覚呈示

4・1 運動方程式 図 6 に、車いすの運動方程式を導出する上で必要となるパラメータを示しておく。 M は、体験者が乗った状態での車いすの総重量であり、

$$M = M_1 + M_2 + 2M_3 \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで、 M_1 は体験者の体重、 M_2 は車いす本体 (車輪を除く) の質量、 M_3 は車いすの車輪一つの質量を表す。また、 g は重力加速度であり、後輪にかかる質量比率を λ とする。

ここで、前輪は本体の回転を防ぐために付けたもので、転がり摩擦はないものとし、垂直抗力のみと仮定する。平坦路での系全体の運動方程式は、次のようになる。

$$M \frac{dv}{dt} = 2\lambda Mg \tan \phi \dots\dots\dots (2)$$

ここで、車いすの速度を v とし、転がり摩擦 R が鉛直方向となす角を ϕ とする。また、各車輪についての運動方程式は、次のように与えられる。

$$I \frac{d\omega}{dt} = Fr - \lambda Mgl - \lambda Mgr \tan \phi \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 I 、 r および ω は、それぞれ車輪の慣性モーメント、半径および回転速度である。また、 F は体験者の漕ぐ力であり、 l は転がり摩擦係数である。

本研究では、 $v = \sigma r \omega$ とし、 σ は $0 < \sigma \leq 1$ の範囲をとる滑り係数とする。 $I = M_3 r^2 / 2$ の関係から、式 (3) は次のように書き直せる。

$$\frac{M_3}{2} r^2 \frac{1}{\sigma r} \frac{dv}{dt} = Fr - \lambda Mgl - \lambda Mgr \tan \phi \dots\dots (4)$$

式 (4) の両辺を r で割り、式 (2) を代入し整理する

Fig. 5 Force sensor built in wheel

Fig. 6 Systematic definition

と,

$$\frac{1}{2} \left(M + \frac{M_3}{\sigma} \right) \frac{dv}{dt} = F - \frac{\lambda M g l}{r} \dots \dots \dots (5)$$

を得る.

一方, 坂道の場合では, 坂の傾斜角度を θ とすると (図 7 参照), 系全体の運動方程式は, 次のようになり,

$$M \frac{dv}{dt} = 2\lambda M g \cos \theta \tan \phi - 2\lambda M g \sin \theta \dots (6)$$

平坦路の場合と同様の計算から,

$$\frac{1}{2} \left(M + \frac{M_3}{\sigma} \right) \frac{dv}{dt} = F - \frac{\lambda M g l \cos \theta}{r} - \lambda M g \sin \theta \dots \dots \dots (7)$$

を得る.

4.2 力覚呈示方式 本研究では, 漕ぐ力 F に応じて車いすの速度 (車輪の回転速度) を制御することによって, 力覚を伴った車いすでの移動を再現する.

図 8 に制御系のブロック線図を示す. 体験者の漕ぐ力 F を力センサで測定し, 式(5)あるいは式(7)の運動方程式 (車いすモデル) から目標速度 v_{ref} を求める. この v_{ref} と実測された車いすの速度 v (車輪の回転速度から算出された見かけ上の車いすの速度) の偏差 e を比例倍して, サーボドライバに出力する (比例制御).

以上の制御方式により, 力覚呈示機能を実世界と一致させるための校正実験を行った. 実験方法は, 被験者 2 人に, 車いすに乗って, 通常の 1 回漕ぎをしてもらい, 進んだ距離をそれぞれ 10 回測定し, それらの平均を取る. 次に, 仮想体験システムにおいて, 同じ動作と同じ力具合を行ってもらい, 両者の平均移動距離が一致するように車いすモデルのパラメータ λ および l の調整を行った. 5 章では, この試作したシステムに対して, 空間認知に基づく実験的な検証を行う.

Fig. 7 Hill road case

Fig. 8 Block diagram of force feedback control

5. 力覚呈示によるシステムの検証

5.1 仮想空間における空間認知実験

車いす体験における力覚呈示の有意性を, 試作したシステムを用いた空間認知実験, 具体的には移動による距離の評定実験により検証する. さらに, 試作したシステムは, 2 章で述べた実空間での移動状況および空間認知特性を反映することができるかどうかについて検証する.

実験では, 実空間と同様な環境を仮想空間内に作成し, スタート地点からゴール地点まで移動することにより得られる距離を刺激とする. 本実験では, 図 9 に示すように, 幅 3 m の直線経路と高さ 3.2 m の壁を準備した. また, 被験者には図 9(a) のような映像が呈示される.

力覚呈示については, 次の二つを設定する.

1. 力覚呈示あり (F: with force feedback)
2. 力覚呈示なし (N: without force feedback)

また, 基準距離と評定距離の設定, 呈示および回答方式は, 2 章での実験と同じとする.

力覚呈示を行わない場合の実験は, 単純に図 4 に示したタイミングベルトを外し, ローラをフリーにした状態で行う. 被験者が車輪のハンドリムをまわすと, それに応じて車輪軸に取付けたロータリエンコーダから移動距離が算出され, 仮想空間内の映像が提示される.

5.2 実験結果 図 10 に, 仮想空間での被験者全員の呈示距離に対する回答距離の幾何平均, 距離ごとの最大値, 最小値を示す. 横軸は呈示距離, 縦軸は評定距離である. 図 10(a) は力覚呈示がある場合, 図 10(b) は力覚呈示がない場合の結果である. また, 実空間での実験 (2 章) と仮想空間での実験 (本章), 四つすべてについて, 呈示距離からの平均誤差, および標準偏差を求めたものを図 11 に示す.

さらに, 実験条件別のデータ間に有意差が認められるかを統計的に検討するために, 有意水準 5% で t 分布を用いて検定を行った. 表 1 は自己移動方式を基準に, 各評定距離での有意差の有無および誤差の大小関

Fig. 9 Virtual environment of experiment

(a) With force feedback

(b) Without force feedback

Fig. 10 Results of distance estimate in virtual environment

係をまとめたものである。ここで、有意差が見られない結果は、基準の自己移動方式(A)と一致していると認定し、中央欄に記入した。また、有意差が見られた結果に関しては、評定距離の誤差の大小で分けて記入した。誤差の大きさは30 cm以上で、小は30 cm未満とした。

5.3 結果の考察と検証

5.3.1 力覚呈示の有意性 図10と11の実験結果から、力覚呈示なしと力覚呈示ありを比較してみると、評定距離の平均誤差の絶対値において、力覚呈示がある場合のほうが、ない場合より小さくなっている。また、両者について有意水準5%で統計的検定を行った結果、すべての呈示距離について有意差が見られた。さらに、標準偏差の比(Nd/Fd)を計算してみると、表2のように、1.18~3.13となり、力覚呈示なしの場合は、ばらつきが大きいことがわかる。

また、力覚呈示なしの場合は、図10(b)からわかるように、過小視傾向が強くでている。一方、自己移動方式と力覚呈示ありの場合については、多少、過小視しているものの力覚呈示なしの場合ほどではない。

以上の結果から、車いすの移動による空間認知では、力覚呈示の有意性があるといえる。

5.3.2 システムの妥当性 図1(a)と図10(a)、図11および表1の実験結果から、実空間での自己移動方式と仮想空間での力覚呈示ありの場合のデータの比較を行うと、両者の評定距離の誤差、標準偏差など

Table 1 Error comparison

Distance	Error		
	Big	Same with basis(A)	Small
4 m	P*, N*	F	
6 m		P, F	N*
8 m	P*, N*	F	
10 m	P*, N*	F	
12 m	N*	F	P*
14 m	P*, N*	F	

A: Active F: With force feedback

P: Passive N: Without force feedback

*: Appear with the significant difference

A: Active N: Without force feedback
P: Passive F: With force feedback

Fig. 11 Error and deviation at distance estimate

に関して、ほぼ一致した結果が得られていることがわかる。

両者に対して有意水準5%で統計的検定を行った結果は、表1に示したように、すべての呈示距離に対して、有意差は見られなかった。また、表2からわかるように、標準偏差の比(Fd/Ad)は0.85~1.30であり、1に近い値となっている。つまり、実空間と仮想

Table 2 Results comparison

Results		Distance					
		4 m	6 m	8 m	10 m	12 m	14 m
Error (cm)	Ne	-49.08	-13.08	-38.25	-76.67	-162.67	-118.41
	Fe	-6.75	-4.25	-13.92	-12.67	-40.75	-48.45
Standard deviation (cm)	Nd	53.95	81.71	66.85	90.03	94.01	61.50
	Fd	31.71	45.85	29.42	28.69	73.17	52.12
	Ad	30.34	35.23	33.99	28.39	85.68	60.31
	Nd / Fd	1.70	1.78	2.27	3.13	1.28	1.18
Fd / Ad		1.05	1.30	0.87	1.01	0.85	0.86

Ne: Error in "without force feedback"

Fe: Error in "with force feedback"

Nd: Standard deviation in "without force feedback"

Fd: Standard deviation in "with force feedback"

Ad: Standard deviation in "active"

空間での移動状況および空間認知特性がほぼ一致している。これらの結果から、試作した仮想体験システムは、手動車いすによる実際の移動を反映しうるものといえる。

6. 結 言

本研究では、福祉分野への人工現実感の応用研究として車いす体験を取上げた。特に、手動車いすによる移動状況をよりリアルに体験できるように、力覚呈示システムを新たに開発した。力覚呈示の有意性およびシステムの妥当性を評価・検証するために、移動による空間認知の基礎実験を行った。以下に得られた結果をまとめる。

(1) 実空間での空間認知実験により、移動における視覚-触運動の統合に対して、車いすによる移動といった標準スケールでも能動性の影響があることが確かめられ、力覚呈示の必要性に有力な根拠を得た。

(2) 力覚呈示システムを新たに開発し、手動車いすの両車輪に、運動を伴う力覚情報の呈示ができるよ

うにし、視覚呈示とともに、仮想体験システムを試作した。

(3) 平坦路と坂道を考慮した車いすの運動方程式を導出し、速度制御を基礎とした力覚呈示方式を提案し、実世界と同様な移動状態を実現した。

(4) 力覚呈示を行わないと、車いすの移動による空間認知では、実空間における結果との差、および力覚呈示がある場合の結果との差が大きくなるため、力覚呈示の有意性があることがわかった。

(5) 実空間と仮想空間での移動状況および空間認知特性がほぼ一致し、試作した仮想体験システムは、手動車いすによる実際の移動を反映しうるといえる。

本研究の一部は平成8年度科学研究費基盤研究(B)の助成による。

文 献

- (1) 舟久保康・初山泰弘監修, 福祉工学, (1995), 2, 産業図書.
- (2) 藤本英雄編著, 人工現実感の展開, (1994), 37, コロナ社.
- (3) 陳連怡・藤本英雄・原田友康, 車いす体験システムにおける空間認知の特性, 第11回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, (1995), 483-490.
- (4) Chen, L., Fujimoto, H. and Harada, T., Spatial Recognition in 「Wheelchair Experience」 System Using Virtual Reality Technology, *Proc. 1996 Jp.-U.S.A. Symp. Flexible Automation*, (1996), 237-240.
- (5) 福井幸男・ほか2名, 視覚と触覚・力覚の協調動作での課題, *Human Interface N & R*, Vol. 7 (1992), 239-242.
- (6) 館璋, 人工現実感と運動/行動の制御, 計測と制御, 33-4 (1994), 316-320.
- (7) 岩田洋夫・松田敬吾, 凹凸面を有する仮想空間を歩行するための人工現実感, 第6回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, (1990-10), 21-24.
- (8) 赤松幹之・石川正俊, 形状知覚における視-触覚の感覚統合過程の解析, バイオメカニズム, 10 (1990), 23-32.
- (9) 箱田裕司編, 認知科学のフロンティア I, (1991), 73, サイエンス社.
- (10) 穴吹まほろ・ほか3名, 視触覚統合における能動性の影響, *Human Interface N & R*, Vol. 11 (1996), 273-278.