

バリアフリー住宅設計支援システムの開発（第2報）

立川 英治* 田中 泰斗* 安藤 敏弘**

Development of a Barrier-Free House Design Support System

Eiji Tachikawa* Taito Tanaka* Toshihiro Andou**

あらまし VR技術を用いた手動車いす用住宅設計支援システムの開発を目的として、昨年度に引き続き車いすの運動特性について考察を行い、VRシミュレータの開発を行った。開発したシミュレータでは、実際の車いすを操作することにより仮想空間内を移動可能であり、狭路通過の可否を体験できる。さらには、操作者自身の運動を仮想空間内に反映することにより、空間認知度の向上を図っている。また、車いすの直線走行実験において、実車と計算モデルの速度変化はよく一致しており、導出した運動方程式を用い反力を提示することにより駆動時の抵抗や慣性走行感を表現可能な車いすシミュレータの開発が期待できる。

キーワード 車いす, バリアフリー住宅, 設計CAD, VR

1. まえがき

車いすによる移動の可否は、その大きさや旋回半径により制限されるため、車いす利用者の住宅設計の際には通常の住宅設計に比べ間取りや家具の設置場所など様々な配慮が必要である。また、設計された住環境が適正なものであったかどうかは施工後に利用者本人が経験することで初めて理解できるものであり、事前に検討することは難しい。特に、バリアフリー住宅は他の福祉・医療製品に比べ金銭的なリスクが大きく、適正な住環境を想定し設計できるか否かは、障害者にとって死活問題である。

このような問題を解決するため本研究では、車いす利用者の住宅を設計段階で評価、検討することを可能にするを目的として、VR技術を用いた手動車いす用シミュレーションシステムを開発する。昨年度は、車いすの基礎的運動を考察し、車いすに働く走行抵抗、駆動輪の回転量に基づく移動軌跡の計算および段差乗り越えに必要な力について知見を得た。本年度は、引き続き車いすの運動特性の解析を行うとともに、駆動輪に加えられたトルク値をもとに、車いすの移動、旋回を計算し実際の運動との比較を行った。また、実際の車いすの操作によって仮想空間内の移動が可能なVRシミュレーションシステムの開発を行った。

2. 車いすの運動

2.1 車いすの運動に関する主な記号

車いすの運動方程式を導出する際に利用する主な記号を以下に記す。また、図1に各記号とその座標系を記す。

$O-X Y Z$	: 静止座標系
$p-x y z$	: 車体の重心に固定した運動座標系
P	: 車いすの重心
U	: $O-X Y Z$ 座標系 X 軸方向速度成分
V	: " Y 軸方向速度成分
U_p	: $p-x y z$ 座標系 x 軸方向速度成分
V_p	: " y 軸方向速度成分(車いす進行向)
θ	: 車体姿勢角度 (Y 軸と y 軸のなす角)
Ffl	: 駆動輪と床面の接地点に作用する前後力
B	: 駆動輪と床の接地点に作用する横力の和
Fh	: ハンドリムに加える力
Mog	: Fs により発生するモーメント
Mof	: キャスタ輪の走行抵抗により発生するモーメント
Moc	: キャスタ輪の縦軸回り抵抗 (モーメント)
N	: F により発生するモーメント
Q	: 駆動輪回転量
Lf	: キャスタ輪と重心間距離
Lb	: 重心と駆動輪軸間距離
Fs	: 各車輪に働く重力の接地面と平行な分力
Rt	: 走行抵抗
F	: その他外力
Hr	: ハンドリム半径
Wr	: 駆動輪半径

* 応用担当, 生活技術研究所兼務

Application division, Gifu Prefectural Human Life Technology Research Institute, Takayama-shi

**岐阜県生活技術研究所 高山市

Gifu Prefectural Human Life Technology Research Institute, Takayama-shi

W_f : キャスタ軸間距離
 W_b : 駆動輪トレッド
 M : 車体重量 (操作者も含む)
 M_r : 駆動輪の重さ
 I : 車体縦軸回り慣性モーメント
 I_r : 駆動輪縦軸回り慣性モーメント
 J : 駆動輪回転軸回り慣性モーメント
 g : 重力加速度
 $[]_f$: キャスタ軸に関する値
 $[]_b$: 駆動輪に関する値
 $[]_i$: $i = 1$ は車いすの左側に関する値
 $i = 2$ は車いすの右側に関する値
 $[]_x$: x 方向成分
 $[]_y$: y 方向成分

2. 2 車いすの機構学的関係と運動方程式

車いすの運動方程式を導出するにあたって、次の3つの仮定を立てた。

車輪の横滑りはない。

車輪に働く走行抵抗は転がり抵抗であり、その抵抗は各車輪にかかる重量により変動する。

キャスタ軸の回転に伴う走行抵抗は生じない。

これらの仮定のもと、車いすの運動方程式を導出した。静止座標系 O と運動座標系 p の関係は次式である [1]。

$$U = -V_p \sin q + U_p \cos q \dots\dots\dots (1)$$

$$V = V_p \cos q + U_p \sin q \dots\dots\dots (2)$$

仮定 から x 方向の運動方程式は次式で示される。

$$\begin{aligned}
 M \frac{dU_p}{dt} = & F_x + B - (M + 2M_r) \frac{dq}{dt} V_p - R_{t_{f1x}} - R_{t_{f2x}} \\
 & + F_{s_{f1x}} + F_{s_{f2x}} + F_{s_{b1x}} + F_{s_{b2x}} \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

y 方向運動方程式の関数は次式で示される。

$$\begin{aligned}
 (M + 2M_r) \frac{dV_p}{dt} = & F_y + (F_{f1} + F_{f2}) - M \frac{dq}{dt} U_p \\
 & - R_{t_{f1y}} - R_{t_{f2y}} \\
 & + F_{s_{f1y}} + F_{s_{f2y}} + F_{s_{b1y}} + F_{s_{b2y}} \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

仮定 により駆動輪軸回りの回転運動方程式は式 (5) (6) で表される。

$$J \frac{d^2 Q_1}{dt^2} = F_{h1} H_r - F_{f1} W_r - R_{t_{b1y}} \dots\dots\dots (5)$$

$$J \frac{d^2 Q_2}{dt^2} = F_{h2} H_r - F_{f2} W_r - R_{t_{b2y}} \dots\dots\dots (6)$$

機構学的形状から、重心の速度と車体の旋回角および駆

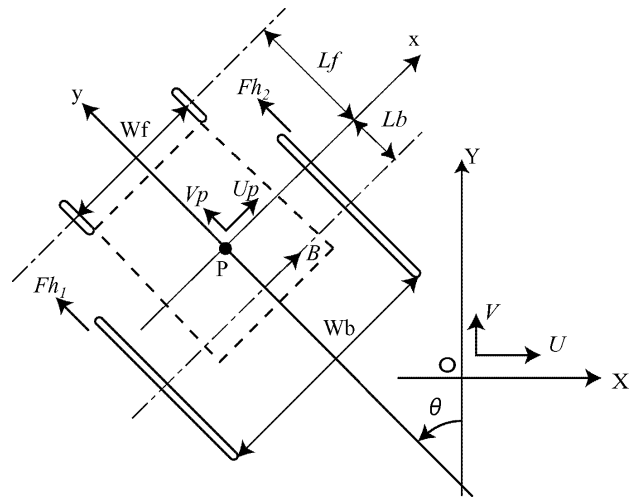


図1 座標系と記号

Fig.1 Coordinate systems and symbols

動輪の回転量の関係は式 (7) (8) (9) で表される。

$$U_p = -L_b \frac{dq}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

$$W_r \frac{dQ_1}{dt} = V_p - \frac{dq}{dt} W_b / 2 \dots\dots\dots (8)$$

$$W_r \frac{dQ_2}{dt} = V_p + \frac{dq}{dt} W_b / 2 \dots\dots\dots (9)$$

車体重心縦軸回り回転運動方程式を次式に示す。

$$\begin{aligned}
 \{ I + 2I_r + 2M_r (W_b / 2)^2 \} \frac{d^2 q}{dt^2} & = L_b B + (F_{f2} - F_{f1}) W_b / 2 \\
 & - 2M_r \frac{dq}{dt} V_p L_b + M_o g + M_o f + N \dots\dots\dots (10)
 \end{aligned}$$

仮定 のもと、走行抵抗 R_{t_f} は、キャスタの移動方向と反対方向に発生し、キャスタ軸に生じる走行抵抗による重心縦軸まわりのモーメントは次式であらわされる。

$$\begin{aligned}
 M_o f = & (R_{t_{f1x}} - R_{t_{f2x}}) W_f / 2 \\
 & - (R_{t_{f1y}} + R_{t_{f2y}}) L_f \dots\dots\dots (11)
 \end{aligned}$$

重力による影響

車いすの各車輪にかかる力としては、床からの走行抵抗と垂直抗力があげられる。垂直抗力は常に斜面の法線方向に働くため、車いすが斜面を移動する際には平坦路を移動する時とは異なる車体の旋回や反力が生じる。ここでは、斜面移動時における車いすの運動について考察する。

$n(a, b, c)$ を法線ベクトルとして持つ任意の斜面と静止座標系の $X Y$ 平面とがなす角 ψ は $\cos \psi = c$ で表すことができる。ここで、計算のため新たな座標系 $O' - X' Y' Z'$ を定義する。この座標系は静止座標系を

Z軸まわりに回転したもので n を法線ベクトルとして持つ面と Y' 軸は ψ の角度をなすものとする．この座標系が静止座標系となす角は式(12)(13)で表すことができる．
 $a > 0$ の場合

$$\tan x = \frac{b}{a} \dots \dots \dots (12)$$

$a < 0$ の場合

$$\tan(p + x) = \frac{b}{a} \dots \dots \dots (13)$$

車いすの進行方向を表す座標軸 y を XY 平面に投影したベクトルと座標系 O' の Y' 軸のなす角 z は $z = \theta - \xi$ となる．車輪にかかる荷重を M_w とすると、各車輪に働く重力の接地面と平行な分力 F_s は次式で表すことができる．

$$F_{s_x} = -M_w g \sin y \sin z \dots \dots \dots (14)$$

$$F_{s_y} = -M_w g \sin y \cos z \dots \dots \dots (15)$$

式(14)(15)を各車輪に適用し得られた値から、車体の重心縦軸回りモーメントは次式で表すことができる．

$$\begin{aligned} Mog = & (-F_{s_{f1x}} + F_{s_{f2x}})Wf/2 + (F_{s_{f1y}} + F_{s_{f2y}})Lf \\ & + (-F_{s_{b1x}} + F_{s_{b2x}})Wb/2 + (F_{s_{b1y}} + F_{s_{b2y}})Lb \\ & \dots \dots \dots (16) \end{aligned}$$

3．車いす走行実験

実験には、汎用性が高いと考えられる手動車いす（キャスト輪 7 インチエアークキャスト、駆動輪 2.4 インチ（株）松永製作所製 DM-80）を用いた．車いすの駆動輪にかかる荷重および駆動トルクを測定するため、トルク・駆動輪軸荷重計（（株）共和電業製 PR-S100NM37）を取り付けた．また、駆動輪とキャスト輪のキャスト軸の回転角を測定するため、各軸にロータリ・エンコーダを取り付けた．この車いすから測定された値を先に求めた運動方程式に与え、計算モデルと実車の移動速度をもとに運動方程式の妥当性を検証した．

3.1 車いす走行

3.1.1 直線走行実験

実験は平坦な路面をまっすぐ移動するように操作することにより行い、床材としてはカーペットを使用した．また、車いすの走行抵抗は、重心位置により変動し駆動輪にかかる荷重比が大きいほど、車いす全体にかかる走行抵抗は小さくなるとされており、本研究でもキャスト輪と駆動輪の走行抵抗係数を個別に求め、運動方程式に与えることとした[2]．図3は車いすの駆動輪を1回操作

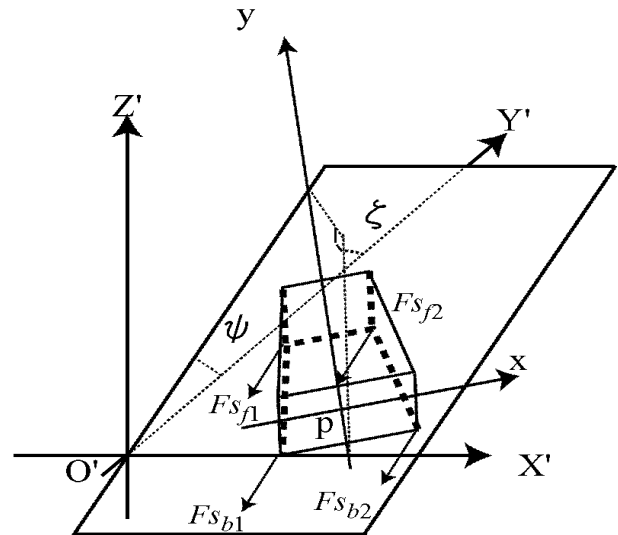


図2 車いすに働く重力の影響
 Fig.2 Influence of gravity on wheelchair

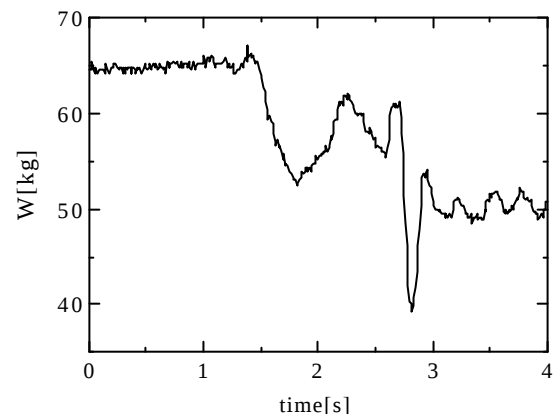


図3 車いすの駆動輪にかかる荷重変動
 Fig.3 Load change on rear wheels of wheel chair

したときの駆動輪にかかる荷重変動の例であり、約 25kg の荷重変動が起こっている．走行抵抗係数は、一定重量のおもりを載せた車いすの惰性走行時における速度変化から求めた．重りをおく位置を変えることにより重心位置を変化させ、上記の実験を行うことによりキャスト輪と駆動輪それぞれの走行抵抗係数を決定することができる．

3.1.2 結果と考察

駆動トルクを運動方程式に与え計算した車いすの速度変化と駆動輪の回転量から求めた速度変化を図4、5に示す．図4は1回のハンドリム操作による速度変化であり、図5は3回の操作によるものである．1回の操作では計算結果と実測値がよく一致している．3回操作でも実測値と計算値に大きな違いは認められないが、1回操作に比べ計算結果と測定結果のずれが大きくなっている．この理由は定かではないが、操作者の重心が激しく前後に変化することによる不規則的な走行抵抗の変化や、

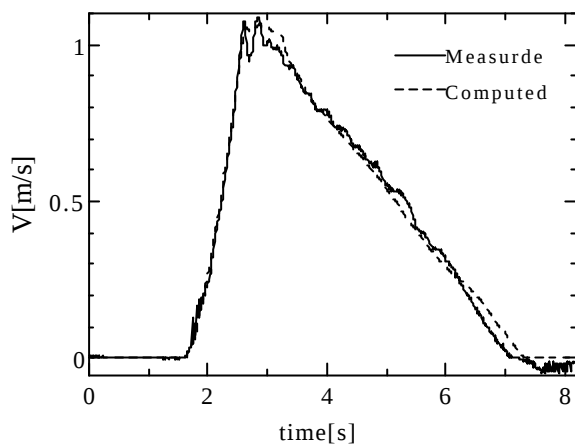


図4 1回駆動による車いすの速度変化

Fig.4 Velocity of wheelchair with once handling

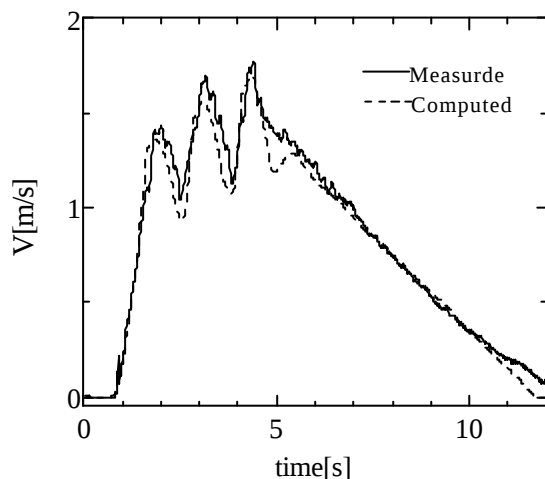


図5 3回駆動による車いすの速度変化

Fig5 Velocity of wheelchair with three times handling
車体の変形による影響、路面と車輪の滑りによる測定誤差の影響などが考えられる。

4. VRシミュレータの開発

4.1 路面形状に基づく車いすの姿勢変化

車いすに生ずる回転のうち、ハンドリム操作に伴い能動的に変化するの、車いすの垂直軸まわりの回転であり、その他の回転は斜面、段差などの路面変化に伴い受動的に変化する。すなわち、車いすの座標系を図6のように定義した場合、Z軸周りの回転がハンドリム操作により変化し、X、Y軸周りの回転が路面形状により変化することになる。したがって、車いすの姿勢を計算するためには、ワールド座標系における車いす座標系の回転量を計算する必要がある、この座標系は4つのタイヤと路面の接点座標から決定されると考えられる。この場合、車いすのZ軸方向のベクトルは4つの接点座標によ

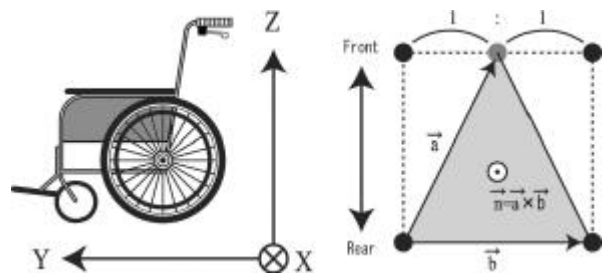


図6 車いすの座標系

Fig.6 Coordinate system of wheelchair

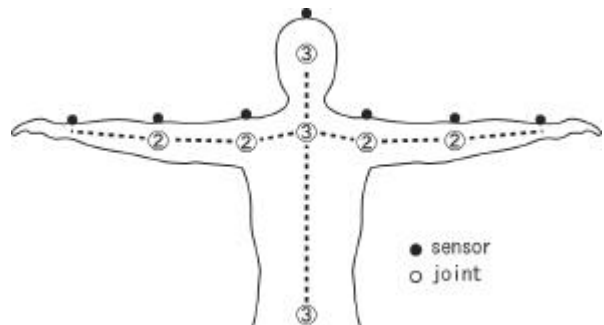


図7 関節とセンサの配置

Fig.7 Position of joints and sensors

り作られる面の法線ベクトルと一致し、外積計算から導出できる。実際は、4つの座標値から法線ベクトルを計算することはできないため、シミュレータ内では、キャスト輪座標の平均値と2つの駆動輪座標の3点から外積を計算している。(図6)この法線ベクトルに車いすのZ軸周りの回転を表す行列の逆行列をかけて得られたベクトルから、X軸およびY軸周りの回転角を求めれば車体の回転を定義できる。

4.2 人体モデルの仮想空間への導入

実際に車いすで空間を移動するとき、操作者が余裕を持って操作するための空間が残されていることが重要である。車いすの操作に必要な空間は操作者の体格や障害度により異なると考えられる。本システムでは、車いすモデルの周囲にその形状を代表するように線分を定義し、この線分と空間内のオブジェクトとの交差を検出することにより、車いすの形状を反映した衝突検出を行っており、空間移動の可否を決定している。しかし、車いすの形状や大きさを元にした衝突検出のみのシミュレーションで操作者自身が手を伸ばし触れることのできる空間を確認し、住宅の利便性を検討することは難しいと考えられる。そこで、空間認知度の向上のため操作者自身の運動を仮想空間内で再現することを考えた。車いす利用者は下肢が不自由であるため、上半身(腰、肩、肘、首および頭)の擬似的な動きを仮想空間内で表現することとした。操作者の動きをセンシングするために、6自由度モーショントラッキングセンサ(IS-600Mark2、InterSense社)を使用した。この装置は、センサから発信される超音波による距離測定により3次元座標の計測が可能であり、ジャイロセンサと組み合わせることにより

6自由度の位置、回転を計測することができる．このセンサから得た値を元に各関節の回転角を計算し人体モデルの運動を定義した．

人体モデルの関節は、腰、肩、肘および首とした．センサの取り付けおよび各関節の位置を図7に示す．図中の数字は各関節に定義した自由度である．各関節の回転は、センサから得られる3次元座標を元に計算することができる．すなわち、腰関節は常に一定の位置で動かないものとし、腰の座標から見た両肩の相対座標から腰の回転を計算した．同様に、肩関節の回転は肩と肘の関係から、肘関節は肘と手首の位置関係から計算した．首関節は両肩を結ぶ線分の中点座標にあるものとし、その回転は頭頂部に取り付けたセンサ座標との相対関係から計算した．頭部の回転は頭頂部のセンサから得られた値をそのまま用いた．このような計算を行うことにより、操作者の動きを仮想空間内で表現できる．また、座高や腕の長さなど、操作者固有の体格を仮想空間に反映するため、各関節の位置座標は対応するセンサの位置から求めることとした．

4.3 車いすインタフェースの開発

体験者に、現実に近い感覚を与えるためには、手動車いすの操作感や操作性を表現することが重要である．特に、車いすは独立した左右駆動輪を操作することにより移動、旋回するという特異な運動をするため、操作性を表現するためには実際の車いすをインタフェースとすることが有効である．そこで、前述の計測用車いすを用い仮想空間内を移動することを考えた．車いすの運動は、計測用車いすの駆動輪に取り付けたロータリエンコーダの回転量を元に計算した．車いすの移動量および旋回量の計算は、式(17)(18)から計算した [3] ．

$$q_i = \frac{dr_i - dl_i}{Wb} \dots \dots \dots (17)$$

$$D_i = \frac{dr_i + dl_i}{2} \dots \dots \dots (18)$$

左駆動輪の移動量	dl_i
右駆動輪の移動量	dr_i
車いす旋回量	θ_i
車いす移動距離	D_i
車いすの駆動輪トレッド	Wb

添え字 i はサンプリング番号である．

4.4 シミュレーションシステム概要

シミュレーションシステムの概要を図8に示す．開発したシステムは大きく分けて車いす入力部と画像提示部から構成されている．車いす入力部は、駆動輪車輪を地面から離して固定された車いすと制御用計算機（PC）により構成されており、画像提示部は視覚演算用計算機（Zx10 VE、SGI社）と6自由度モーショントラッキングセンサ、頭部

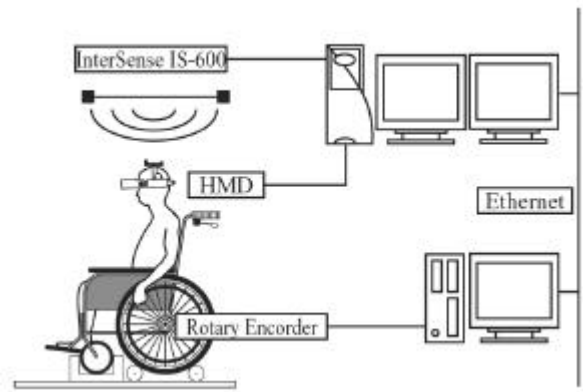


図8 システム概要

Fig.8 Simulation system of wheelchair



図9 システム概観

Fig.9 Overview of simulation system

搭載型ディスプレイ（HMD）（ProView XL50、KAISER ELECTRO-OPTICS社）から構成されている．

車いす入力部では車いすの駆動輪回転量をもとに車体の移動、旋回量を計算し、そのデータを制御用計算機からEthernetを介し、視覚演算用計算機へ送信する．視覚演算用計算機では、受信したデータ及び6自由度モーショントラッキングセンサのデータを受け取り、計算機内の車いす及び人体モデルの位置と姿勢を計算し、その画像をHMDに出力している．HMDに出力する画像には両眼の視差が与えてあり、立体視することができる．また、本シミュレーションでは仮想空間内の住宅オブジェクトと車いすオブジェクトの衝突判定を行っており、住宅内における移動の可否を視覚的に体験できる．図9はシミュレーションの様子である．

5. まとめ

車いすの運動をシミュレータ内で再現するため、車いすの運動方程式を導出した．また、求めた運動方程式の妥当性を検証するため、操作者が加えた駆動トルクをもとにした車体速度のシミュレーションを行い、実際の車いすの速度変化と比較した．その結果、計算結果と実測値はよく一

致していたが、連続して駆動操作を行った場合、誤差が大きくなる傾向が認められた。今回行った実験は直線運動のみであり、車体の旋回についても考察する必要がある。また、路面の材質により走行抵抗は異なるものと考えられ、今後検討する必要がある。

シミュレータ内に人体モデルを導入することにより、空間の認知度は向上したものと考えられるが、今回開発したシミュレータは人体モデルの運動を定義したのみであり、更に空間の認知度を高めるためには、人体モデルと他の物体の衝突を検出し体験者に提示することが重要である。

シミュレータのインタフェースとして、実際の車いすを使用することにより、他のデバイスをインタフェースとして使用する場合に比べ、実際の車いすに近い操作性が得られたが、さらなる操作感の向上のため駆動輪を操作する際の反力提示を検討したい。

謝辞 本研究の推進にあたってご指導、ご助言を頂いた岐阜大学 武藤高義教授、山田宏尚助教授に深く感謝します。

文 献

- [1]藤本英雄, 陳連怡, 館野真, 浅野真博, “ VR を用いた力覚呈示車椅子訓練システムにおける斜面走行時の旋回の検討 ”, 日本バーチャルリアリティ学会第 4 大会論文集, 1999.9
- [2]米田郁夫, 橋詰努, 藤起拓也他, “ 車いす重心位置が走行特性に及ぼす影響 ”, 第 12 回リハ工学カンファレンス講演論文集, 1997
- [3]立川英治, 田中泰斗, 安藤敏弘, “ バリアフリー住宅設計支援システムの開発 ”, 平成 12 年度生産情報技術研究所研究報告