

## 手のハプティックインタフェースによる 周辺障害物認識システムを用いた歩行器

橋本 洋志\*・松永 俊雄\*・佐々木 智典\*  
石井 千春\*\*・新妻 実保子\*\*\*・橋本 秀紀\*\*\*

### A Walker with Hand Haptic Environmental Sensing for Surrounding Obstacles

Hiroshi HASHIMOTO\*, Toshio MATSUNAGA\*, Tomonori SASAKI\*,  
Chiharu ISHII\*\*, Mihoko NIITSUMA\*\*\* and Hideki HASHIMOTO\*\*\*

This paper presents a user-friendly hand haptic interface to recognize surrounding obstacles around the user such as elderly or visually impaired for one's safe walk. The system is implemented on a joystick with force feedback mounted on a walker. The user is able to recognize the surrounding information by perceiving repulsive force with hand, generated in a feedback while manipulating the joystick. To build up the system, a virtual potential field corresponding to the distance and direction to the obstacle is employed. Through the experimental results, it is found that the practice time of the user who learns basic operation of the system is sufficiently short. Furthermore, the user feels the sense of security while recognizing the surrounding information through the hand haptic interface.

**Key Words:** haptic interface, obstacle detection, virtual potential, walker, surrounding recognition

#### 1. はじめに

高齢者や障害者が生き生きとした生活を送ることのできる方策の1つとして、1人の力で屋外を安心して歩き回れることがあげられる。これは、日常生活における移動手段の確保という意味だけでなく、生体としての良好な体調と生理的な活力を維持するために不可欠なことである<sup>1), 2)</sup>。

福祉工学などでは、そのような要求を満足するものとして、視力が低下した高齢者や視覚障害者であるユーザが、視覚以外の手段で環境を認識して障害物のある環境でも安心して自らの力で歩行できることを可能とする技術への要求は高い。

従来の移動支援技術（自律電動車、ロボティクス歩行器など）<sup>3)~9)</sup>は障害物検知情報に基づきユーザの歩行・環境判断・経路決定能力をすべてカバーすることに焦点が当てられており、これらはユーザが有する意思や判断力を積極的に用いていない。すなわち、ユーザの意思がないところでは、活

力の向上を期待できる余地は少ない<sup>2)</sup>。また、歩行進路の支援する研究として文献10)がある。しかし、これは外部からのナビゲーション情報をユーザの腕に伝達するのであって、ユーザが自らは経路を判断するという自律した行動を支援するものではない。

このため、われわれの立場は、何らかの形で環境認識をユーザに提供することに主眼を置き、体力維持は活力向上にもつながる<sup>2)</sup>という観点から移動手段はユーザが有する脚力をそのまま活かしつつ、障害物情報に対する歩行状態の変化や経路決定の判断はユーザに委ねるものとする。この立場に立つと、問題となるのは、目の不自由なユーザに取り巻く障害物情報をいかに伝達すれば安全・安心な歩行を可能にできるかにある。このためには、人間の視覚以外の感覚機能を用いて、空間的に分散配置されている障害物情報を空間的に認識するという空間認識を行なわせることが重要と考える。

障害物検知の研究は、従来、自律電動車の分野などでなされてきた。この検知情報について、上記の要求から見て2つの問題点が指摘できる。1番目は、センサで得た周囲環境情報をどのような形でユーザに伝達するかである。たとえば、目の不自由なユーザへ障害物検知情報の伝達方法として音声を用いているものがある。これについて、緊急事態に音声で“危ない”と伝達しても、生体機能が低下したユーザは何か危ないか（段差があるのか、障害物が迫っているのか、信号が赤なのかなど）、これを咄嗟に認知できないため<sup>2)</sup>、パニック

\* 東京工科大学 八王子市片倉町

\*\* 工学院大学 八王子市犬目町 139-1

\*\*\* 東京大学生産技術研究所 東京都目黒区駒場 4-6-1

\* Tokyo University of Technology, Katakura, Hachioji

\*\* Kogakuin University, Inume, Hachioji

\*\*\* Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Komaba, Meguro-ku, Tokyo

(Received June 27, 2006)

(Revised September 4, 2006)

状態を引き起こし危険な目に遭うことがある。また、屋外では騒音などで聞き取りにくいことがある。したがって、屋外でもユーザがもっと直感的に障害物を認識できることが望ましい。2番目として、誰でもが安心かつ簡単に扱えることが望ましいという必須条件の下、自律移動機能のない障害物検知情報から周辺環境認識できるまでの習得の容易さについてほとんど議論されていない。

われわれは、これら2つの問題点に対処してユーザが安全のみならず安心して歩行できることを支援するため、周辺障害物の位置情報に関する認識を手のハプティックインタフェースを用いて行なえる歩行器システム HESW (Hand Haptic Environmental Sensing Walker) を開発した。その機能は、まず広域障害物検知センサにより障害物までの測定した距離と角度に基づき従来提唱されている仮想ポテンシャル法<sup>11), 12)</sup>を用いて障害物に対応するポテンシャル場を生成する。同時に、ユーザはフォースフィードバック機能の付いたジョイスティックを前後左右に操作する。この角度情報により障害物情報を表わす仮想ポテンシャル場の中で仮想移動点を移動させ、移動した地点でのポテンシャル場の強さに比例した力をジョイスティックに反力としてフィードバックさせることにより障害物の位置と角度に関して認識できる。この位置と角度の認識に基づきユーザはメンタルマップを脳内でイメージングして、このマップに基づき障害物の位置を認識しつつ歩行経路をあらかじめ決定でき<sup>13)~15)</sup>、このことが安全・安心歩行につながる。

本システムの特徴はつぎのとおりである。従来、ハプティックインタフェースは人間の動作と離散点での触覚を融合して物体認識を行なうものであった<sup>16)</sup>。本研究では、この離散点を面に拡大した面認識が行なえることにある多数集積することによって検知される箇所を線状に分布させ、その結果を基に面認識が行なえるシステムとした。すなわち、動作としてユーザが操作するジョイスティックの傾斜角とジョイスティックを通しての手への反力を人間が有する環境認識力を活用して融合し、周辺の障害物情報の認識を面状に行なうことができ、先の1番目の問題に対処できる。つぎに、障害物情報としての必須要素はユーザからの相対角度と距離であり、この伝達は音声よりも手の知覚のほうが一般人が直感的に理解しやすく、かつ、周辺の障害物情報の認識を十分に短い時間で行なえるという即時性を有している。さらに、滑らかなポテンシャル場を構成することにより過度のポテンシャル変動を抑え、この結果、ジョイスティックから手への反力の急激な変化を抑えることができ、ジョイスティックの動きの滑らかさが安心感をもたらす。このため、先に述べた2番目の問題に対処できる。

以上より、手の力覚を用いて、空間的に分散配置されている障害物情報の空間認識を一般人が利用しやすい形で行なえる。本論文の構成はつぎのとおりである。2章では、線検知の問題点について考察する。3章では HESW のシステム構成、4章では周辺障害物に対する仮想ポテンシャル場の生成

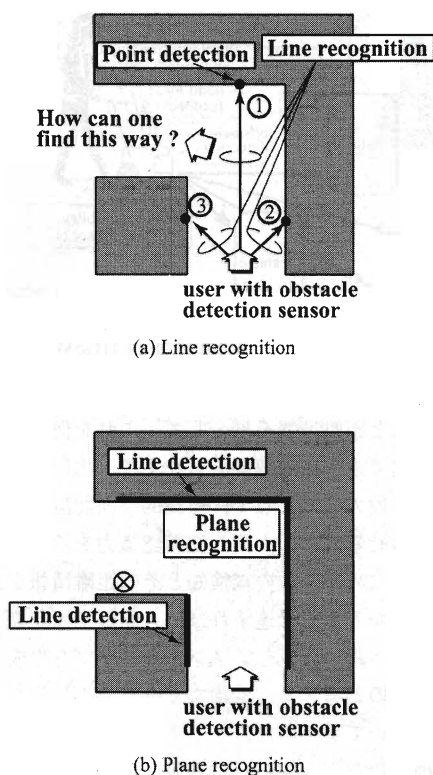


Fig. 1 Plane recognition for mental map

と手へのフォースフィードバックシステム、5章では被験者による周辺障害物認識実験および歩行実験について説明する。

## 2. メンタルマップ形成のための面認識

目の不自由なユーザに、センサを用いた障害物情報伝達における問題点について考察する。多くの一般的な障害物検知では、指向性のある障害物検知センサ（超音波センサ、赤外線センサなど）を用いている。その使用方法は、センサの向いている角度を検知した障害物までの角度とすることが一般的で、障害物までの距離を計測できる。すなわち、点で検知しているが距離情報を有するため、障害物情報としては線認識として利用できる。

Fig. 1(a) は、網掛け部分が障害物を表わしている通路環境を図示しており、文献 11) などに見られるようにセンサを複数個配置することによる障害物検知の例を示す。たとえば各センサの方向が  $30^\circ$  間隔であったとすると、この図に示す例では、1番から3番までの線認識のみでは出口を見出せないから、方位角間隔を何らかの方法でもっと狭め、線認識の数を増やさなければならない。しかしながら、目の不自由なユーザに環境情報を認識させるために、それらを音声や知覚として伝達することは、膨大な数値の羅列が意識の混乱を引き起こすだけで現実的でない。

そのため、線認識を集積して面情報を構築することは、障害物情報のみならず地図形成分野においてたとえば文献 17) などに見受けられるように、数多くなされている。Fig. 1(b) は、面情報を図示したもので、障害物情報を太線のように線

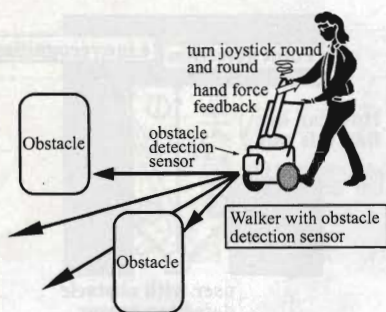


Fig. 2 System concept of HESW

検知し、これと距離情報を融合して、これを何らかの手段でユーザに伝達できれば面認識を行なえて、出口は見出せる。

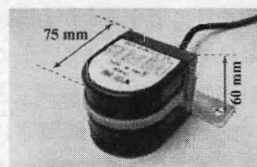
この伝達手段の候補として、連続的な面認識をユーザに無理なく行なわせるには、人間の空間認識力を活用することを考える。このため、複数の線検知とその距離情報を人間の手の知覚に何らかの形で伝達すれば、人間の空間認識力がその知覚を認識レベルで合成してメンタルマップを生成し面認識を行なえるものとする。本論文では、この知覚をジョイスティックを用いて手への反力として実現させ、しかも空間に分布する障害物を面認識の形で表現することにより障害物認識支援情報をユーザに提供することに HESW の特徴がある。ただし、本提案手法は、面認識であって完全な空間認識に役立つ情報を提供するものではないため、Fig. 1(b) に示す ⊗ を認識できない。このことについては、5 章環境認識実験で触れる。

### 3. システム構成

HESW のシステム構成の概要を Fig. 2 に示す。障害物検知センサとフォースフィードバック付きジョイスティックがハプティックインタフェースとして歩行器に搭載されている。ユーザは、歩行器のグリップを押して前進する。このとき、ジョイスティックをくるくると前方および左右方向に動かすことによって取り巻く障害物の位置情報に関する面認識を前進しながら行なうことができる。

搭載した障害物センサの外形と仕様を Fig. 3 に示す。図中の仕様を示すように、180° の半円の範囲を 1 秒間に約 5 回走査することができる。ユーザの歩行速度はおよそ 4 km/h (1.1 m/s) であること、また、1.8° 刻みでの走査であるため、歩行速度、センサレンジおよび通路幅 (約 1 m~4 m 程度) を考慮すると、Fig. 1 に示す面検知をセンサレベルで近似的に達成できる。

ジョイスティック機構は、ジョイスティックを Fig. 4 (b) に示す傾斜角度  $\theta_x^j, \theta_y^j$  で回転させるための二つのモータと  $\theta_x^j, \theta_y^j$  を  $-30^\circ \sim +30^\circ$  範囲を 65536 段階で計測できるエンコーダがある。また、自ら復元するばねなどの機構はないため、復元はジョイスティックの  $\theta_x^j, \theta_y^j$  をフィードバック量とし、比例ゲインフィードバック回路を構成して復元をソフトウェア制御で行なっている。これによりジョイスティックの

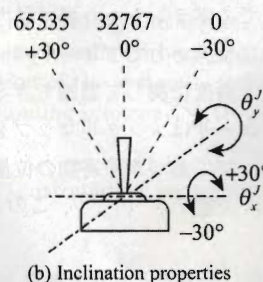


Effective detecting distance	3 m
Distance accuracy	1 mm
Angular range	180 deg
Angular resolution	1.8 deg
Output response time	180 ms for 180 deg

Fig. 3 Obstacle detection sensor and its specification (Hokuyo Co., Ltd., PBS-03JN)



(a) Photo



(b) Inclination properties

Fig. 4 Joystick with force feedback (Microsoft Co.)

反力を調整する。

### 4. ハプティックインタフェースのフィードバックシステム

#### 4.1 障害物情報からのポテンシャル場

センサは Fig. 5 に示すように、センサ位置を原点とする  $xy$  平面上の半径  $R$  の半円を探索領域とする。

センサが計測する障害物表面の  $n$  点を距離  $\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ 、角度  $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$  で表す。もし、領域内で障害物が無いときは、 $l_i = R$  とおく。これより計測点は次式で表わせる。

$$p_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_i \cos \theta_i \\ l_i \sin \theta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

この点におけるポテンシャル関数を次式で与える<sup>11)</sup>。

$$U_i(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta \left( \frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & (|\rho_i| \leq \rho_0) \\ 0 & (|\rho_i| > \rho_0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (3)$$

ここに、 $\eta$  は正の定数、 $\rho_0$  はポテンシャル関数の値域を定めるパラメータで、両方とも障害物検知感度を調整するための

設計パラメータである。また、 $U_i(x, y)$  の上限値を  $U_{max}$  で与えるものとする。

障害物を次式に示すように  $U_i(x, y)$  の総和で表現する。

$$U(x, y) = \sum_{i=1}^n U_i(x, y) \quad (4)$$

これは、障害物を表現するある種のポテンシャル場である。このポテンシャル場から手へフォースフィードバックを行なう方法をつぎに説明する。

#### 4.2 フォースフィードバック

ユーザがジョイスティックを動かすのに対応して Fig. 5 の  $xy$  平面上を動く仮想移動点  $p_a$  を導入する。この点の座標をつぎで定義する。

$$p_a = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ax}\theta_x^J \\ k_{ay}\theta_y^J \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$k_{ax} = \frac{R}{\theta_{maxx}^J}, \quad k_{ay} = \frac{R}{\theta_{maxy}^J} \quad (6)$$

ここに、 $\theta_{maxx}^J, \theta_{maxy}^J$  はジョイスティックの最大傾斜角度で、 $k_{ax}, k_{ay}$  は傾斜角度を  $xy$  平面座標に変換するための変換係数である。  $R$  は Fig. 5 に示す検出可能領域を半円で表わしたときの半径である。

ジョイスティックを操作して  $p_a$  を仮想的に移動させ、この点があるポテンシャル場の中に入ったとする。その地点におけるポテンシャル場の強さに比例したフィードバック力  $f_F$  をつぎで計算する。

$$|f_F| = k_F U(p_a) \quad (7)$$

$$\theta_F = \arctan\left(\frac{\theta_y^J}{\theta_x^J}\right) \quad (8)$$

ここに、 $k_F$  は手への力覚の強さを調整するパラメータである。これより、 $f_F$  は次式で表現できる。

$$f_F = \begin{bmatrix} f_{Fx} \\ f_{Fy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |f_F| \cos(\theta_F) \\ |f_F| \sin(\theta_F) \end{bmatrix} \quad (9)$$

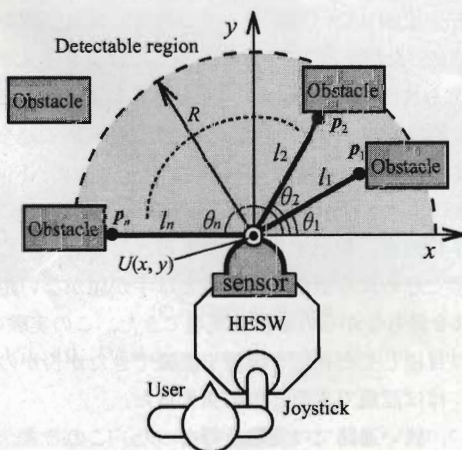


Fig. 5 Schematic representation of positions of detectable obstacles

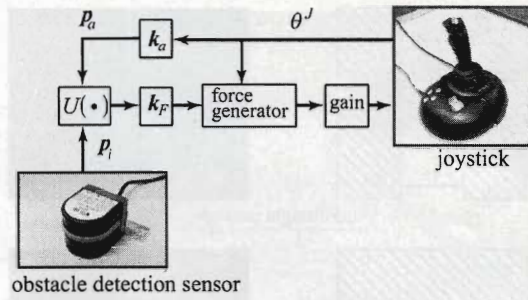


Fig. 6 Hand haptic feedback system

これまでの説明をブロック線図で表現したのが Fig. 6 である。ただし、 $\theta^J = (\theta_x^J, \theta_y^J)^T$ ,  $k_a = (k_{ax}, k_{ay})^T$  とおいた。この図を用いて説明すると、ジョイスティックの操作による傾斜角  $\theta^J$  に比例して  $p_a$  を動かし、これがポテンシャル場に入ると、その強さに比例したフィードバック力が発生する。この力はジョイスティックにフィードバックされ、手の知覚でそれを知ることができる。すなわち、手の平でこの力の強さおよび自ら操作した  $\theta^J$  を知覚できるので、周辺にある障害物までの距離と方向を認識することができる。さらに、ジョイスティックをくるくると操作すれば、周辺障害物を手の平で知覚でき、人間の環境認識力により、通路も含めた周辺環境を認識できる。さらに、(2),(4) 式より連続なポテンシャル場の滑らかさを調整でき、(7) 式よりフィードバック力の大きさを調整できる。このため、手に対する力の大きさおよび滑らかさを調整して安心できる使用感を提供できる。

#### 5. 環境認識実験

提案するハプティックインタフェースのパラメータは、障害物に手が届きそうになる 0.5 m の距離からポテンシャル閾数が値が生じるようにしたため  $\rho_0 = 0.5$  とおいた。これに基づき、試行錯誤的に  $\eta = 0.2$  とおいた。さらに、(7) 式の  $k_F$  の調整について、実験を通して、ジョイスティックを 30 度に近い値に傾斜させたときに 3m の距離で離れている障害物を回転軸から 15cm に定めた把持位置で 400g の力が生じることを基準にした上で、被験者の使用感に適するように調整しとところ  $k_F = 10000$  となった。これらの値を用いて、通路の認識実験および歩行実験を行なった。

##### 5.1 通路モデルの認識実験

典型的な通路の形状を段ボール箱でモデル化し、そのモデルの中に Fig. 6 で示した提案するインタフェースを設置する。5 人の被験者 (20~25 歳, 理工学系男女学生) は事前に通路形状は Fig. 7 に示す, “直線路”, “袋小路”, “T 字路”, “十字路” の 4 種類があることが教えられている。

Fig. 7 の右側の図は左図に対応するポテンシャル場である。これは、Fig. 5 と対応しており、図中、白い点は仮想移動点  $p_a$ , 円は検出可能領域で  $R = 1.0$  とおいた。また、モニタリング用としてポテンシャル場のゼロレベルを表わす矩形平面と縦横方向の基準を表わす  $xy$  軸を描画している。被験者