人間とすれ違い行動を行う移動ロボットの研究

依田 光正* 塩田 泰仁*

A Study on the Mobile Robot which Passes a Man

Mitsumasa Yoda* and Yasuhito Shiota*

The purpose of this study was to investigate avoidance motion of man and its applicability to a mobile robot. The avoidance motion includes characteristics of passing of humans. These characteristics were obtained from the results of the following experiments. Firstly, many human passing motions were recorded by VTR to analyze human avoidance motions under natural settings on the road. The analysis of the VTR recordings revealed that there were three types of human avoidance motion in passing. The most frequent type observed was as follows: The subject returned to the original locus he had before starting avoidance motion, after the subject had finished passing. Then, a human's passing experiment was conducted in a laboratory using the motion type for constructing an algorithm there of. The results showed that human avoidance motion in passing has two main characteristics; (1) the locus agrees well with the catenary, (2) the walking speed is constant in passing. A basic human avoidance algorithm was constructed using these results. Finally, a mobile robot having a distance measuring system with ultrasonic sensors was developed. The system detects relative distance and relative velocity of man, and the robot realizes passing motion using the avoidance motion algorithm.

Key Words: Human Passing, Avoidance Motion, Mobile Robot

1. はじめに

人間が存在する環境で動作するロボット [1]~[6] には、人間との接近を考慮した回避行動が必要である。ロボットの衝突回避に関しては、コンフィギュレーション空間法 [7] [8] やポテンシャル場 [9] [10] などを用いた研究が行われてきている。これらの研究では、最短経路を求めたり、エネルギーや時間を考慮した動力学的解析の報告が主であった [11]。しかし、人間を含めた環境にロボットを適用させるための回避行動には、人間に与える影響を考慮した新しい視点が必要である。そこで、我々は人間の生活環境内で動作するロボットには、人間と同様な動作特性を備えることが有効なアプローチの一つであると考え、人間の回避行動特性を実験によって抽出し、ロボットの回避行動アルゴリズムに導入する手法を試みている。

ところで、人間にはパーソナルスペースという生活環境に起因する特定の空間がその個人の周囲に存在していると報告されている [12] [13]。動物行動学の分野では、捕食者から自己を保護したり繁殖のためにテリトリーの行動が指摘されてきた。テリトリーは、比較的固定されたものであり、中心が巣などで

あって、侵入に対して戦う特徴を有している。このテリトリーの行動を、人間に関して病院などで調査したところ、同様な空間の存在が認められ、これをパーソナルスペースと呼んだ [14]。このパーソナルスペースは、テリトリーと異なり、身体を中心として存在し、侵入に対しては本スペースを維持しつつ回避するという特徴を有している [15]。

動作しているロボットがこのパーソナルスペースに配慮して回避動作を行うことができれば、人間に対して安全かつ確かな回避行動を実現する有効な一つの方法となる。そこで、このパーソナルスペースの考えに基づいて人間の基本的な回避行動を分析する。

パーソナルスペースを避ける典型的な行動として、人間同士のすれ違い行動に本研究では着目した。すれ違い行動に関する動物行動分野における従来の報告では、人間はすれ違う際に内と外のどちらを向くのかということが主なテーマであった [16]~[18]。また、人間の回避行動としてのすれ違い行動が、建築計画への応用の視点から報告 [19] [20] されている。これらの報告では、物体を含めたいくつかの条件下で実施した実験から得られた行動軌跡を、すれ違い行動にかかわる距離を主眼として分析している。しかし、これらの実験結果では、軌跡の生成といった動的な視点からの分析が欠けており、移動ロボットへの導入という視点からは不十分である。

原稿受付 1997 年 9 月 29 日

*職業能力開発大学校

*Polytechnic University

Fig. 1 Scale of experimental area on the road

そこで、本研究では、人間同士のすれ違い行動における行動軌跡を計測し、分析結果から得られた動作特性に基づいて人間とすれ違う移動ロボットの実現を目的とした。

2. 人間同士のすれ違い行動実験

2.1 路上におけるすれ違い行動実験

人間のすれ違い行動の一般的な特性を知るために、日中に適度な人数の歩行者が通る路上ですれ違い行動実験を行った[21][22]。なお、歩行者である回避する者を被験者 (Subject)、回避される者を実験者 (Experimenter) としている。すれ違い行動データ取得のために、被験者および実験者に対する条件を以下に示す。

- 一般的なすれ違い行動の特性を取得するために、不特定多数の被験者で実験を行う。
- 被験者が道路上で通常にすれ違いをするように、実験であるということをまったく知らせない。
- 被験者に対する実験者の条件を統一するために、実験者は24歳日本人男性1名の同一者で行い、安全を確認した上で被験者に向かってまっすぐ歩行する。

以上の設定で120回行ったすれ違いを、行動軌跡を求めるためにVTRで録画した。本実験では、頭頂点を測定指標として、VTRの画像から0.1[s]間隔で頭頂部の座標位置を計測した。頭頂点を抽出するにあたり、被験者には実験を実施していることを知らせていないため、あらかじめマーキングをして頭頂点を抽出することは不可能である。そこで、計測者が頭頂点と確認した画像上の座標位置をプロットして抽出した。

抽出された画像上の頭頂点位置データは、Fig. 1に示した実験場所ならびにFig. 2に示したカメラ位置に従って路面に投影した位置データに変換した。

本実験データにおける実験者の歩行軌跡はほぼ直線であったが、道路と平行でなく多少傾斜した軌跡も多く存在していた。そこで、実験者データを被験者データと共にx軸上に並進変換し、原点を中心としてデータ全体を回転変換した。座標変換された被験者および実験者のデータは、実験の設定上、形式が統一されていないため、以下の4点に基づいた形式でFig. 3に示すように整理した。なお、x成分は実験者を基準とした被験者との相対距離を表している。

- 被験者は左から右に歩行する。

Fig. 2 Camera position of the passing experiment on road

Fig. 3 Data format of the passing experiment on road

- 実験者は右から左に歩行する。
- 被験者データは、第3および第4象限に存在する。
- 実験者と被験者はy軸上ですれ違う。

全実験データ120件において、実験場所内で実験者と被験者のみが撮影されている57件のデータは、三つの行動タイプに分類された。それぞれを、行動タイプ1, 2, 3としてFig. 4, Fig. 5およびFig. 6に示す。なお、行動タイプの特徴を明確にするために、y軸のスケールを6倍に拡大している。それぞれの行動タイプにおける被験者の行動特徴を以下に述べる。

行動タイプ1は、被験者が実験者まで接近してから相手を避けて、被験者の初期軌道に復帰しているすれ違い行動である。

行動タイプ2は、被験者が実験場所に進入する前から実験者に対して十分な間隔をとっているすれ違い行動である。

行動タイプ3は、行動タイプ2と同様に実験場所に進入するまでは十分な間隔をとっているが、すれ違う位置($x=0$)に合わせて接近し、ほぼ行動タイプ1と同様な間隔ですれ違う行動である。

これらの行動タイプが、全分析データに占める割合をTable 1に示した。

本研究では、これら三つの行動タイプから、出現頻度が最も高く、パーソナルスペースを踏まえた上での回避行動特性の抽出に適した行動タイプ1に着目し、以降の実験において分析の対象とした。

ここで、我々が着目した行動タイプ1のすれ違い行動概略をFig. 7に示す。Point 1において、被験者は、衝突の危険を認識し、方向変換する。Point 2において、実験者の位置をチェッ

Fig. 4 Motion type 1 of the passing experiment on road

Fig. 5 Motion type 2 of the passing experiment on road

Fig. 6 Motion type 3 of the passing experiment on road

Table 1 The percentage of motion type of the passing experiment on road

Motion type	Percentage
1	46%
2	21%
3	33%

クしながらすれ違う。Point 3において、初期の直線軌道に戻り始め、Point 4において復帰する。

2.2 実験室内におけるすれ違い行動実験

路上におけるすれ違い行動実験によって得られた行動タイプ1の行動軌跡を、実験室内におけるすれ違い行動実験を行うことによって抽出する。本実験では、基本的な人間の回避行動特性を明らかにする目的から、以下の条件の実験者に対して被験者が直進歩行によって接近してすれ違い行動を行う実験を実施

Fig. 7 The outline of motion type 1

C: Center of road C': Center of camera image [m]

Fig. 8 Camera position of the passing experiment in laboratory

した[23].

- (a) 静止している実験者とすれ違う条件
- (b) 歩行している実験者とすれ違う条件

世代や性別を統一するため、被験者は日本人成人男性 20 名 (21~33 歳, 身長 160~180 [cm]) とした。実験者は 24 歳日本人男性 (身長 [165 cm]) の同一者で行った。被験者および実験者に対する実験実施手順をまとめて以下に示す。

1. 被験者は、静止もしくは歩行する実験者に向かって、x 軸上を直進歩行する。
2. 被験者自身の判断ですれ違いを行う。
3. 被験者は、実験者を避けた後に x 軸上に戻る。

本実験は VTR で記録され、録画されたビデオ画像から頭頂点のみを認識するために、被験者の頭頂部に直径 38 [mm] の白色球型マーカーを装着した。これによって、画像処理システムを用いて録画画像の最大輝度を抽出することで頭頂点を認識することができた。本画像処理システムは、VTR 画像をパーソナルコンピュータに汎用画像処理ボードを用いて取り込み処理するもので、計測性能 ± 0.03 [m] の位置計測が可能である。

抽出された画像上の頭頂点位置データは、Fig. 8 に示したカメラ位置に従って床面に投影した位置データに変換した。約 150 [m²] の実験室内で行った本実験のカメラの位置を Fig. 8 に示す。なお、実験場所は路上におけるすれ違い行動実験と同様の広さを確保している。

被験者は、実験者に対して右側および左側から各 2 回すれ違いを行い、73 件の有効データを得た。座標変換して床面に投影された静止時の条件における 0.2 [sec] ごとの位置データ例を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 に示したデータから、被験者の歩行軌跡を抽出するために、データを最小二乗法によって近似した。データの特性を考慮して、以下に示す条件で近似を行った。

Fig. 9 Transformed position data of the passing experiment in laboratory

Fig. 10 Catenary gives a close approximation to the data of the passing experiment in laboratory

- 極値は一つとする
- 滑らかな連続曲線とする
- 変曲点を設けない

その結果、代表的ないくつかの関数を検討したところ得られたデータは懸垂線に最適 ($r^2 = 0.96$) に近似できた。

実験結果のデータの一例を Fig. 10 に示す。なお、すれ違ったあとは x 軸上に戻るという前実験結果を踏まえた実験条件に従って、被験者が実験者と交差するまでのデータを分析に用いている。

一般的に懸垂線 [24] は式 (1) で表される。

$$y = k \cosh \frac{x}{k} \quad (1)$$

人間は、すれ違い行動において速度に比例して y 軸方向の制御を行っているとは仮定すれば、式 (2) の微分方程式が成り立つ。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dx} \right) = k' \sqrt{\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2} \quad (2)$$

$k' : \text{Constant}$

式 (2) の左辺は傾きの時間変化を表し、右辺は速度を表す。すなわち、傾きの時間変化と速度は比例関係にある。ここで、Fig. 10 に基づいて算出された両パラメータの関係を Fig. 11 に示す。また、比較対象として他の被験者データも付加した。

Fig. 11 Relationship between the velocity and the slope per time

Fig. 12 Relationship between the velocity and the time

この結果、Fig. 11 は傾きの変化と速度が比例関係を示しておらず、むしろ、傾きの変化に関係なく速度はほぼ一定であることが明らかになった。次に、時間と速度の関係を Fig. 12 に示す。なお、被験者および実験者の歩行時における平均速度は 1.73 [m/s] ($S.D.=0.18$) であった。この歩行速度は、日常生活における男性の歩行速度 (1.4 [m/s]) [24] よりもやや速いが、これは実験室内では周囲に障害物がなためであると考えられる。

Fig. 12 に示すように、被験者はほぼ一定の歩行速度で回避していた。以上を踏まえると、人間のすれ違い行動時の軌道は式 (2) および式 (3) を満足するように表現される。

$$\sqrt{\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2} = \text{Constant} \quad (3)$$

よって、この軌跡は Fig. 13 に示すように速度が一定かつ傾きの変化率が一定である懸垂線を描く。また、歩行している実験者とすれ違う条件においても同様な分析結果が認められた。

全被験者のデータを、式 (4) に示す懸垂線に近似して係数を算出した。

$$y = k \cosh \left(\frac{x-l}{k} \right) + m \quad (4)$$

本実験において、すれ違った後の行動は y 軸を基準に、左右対称として考えることによって、式 (4) の係数 l は 0 としている。以下に、各実験条件で得られた懸垂線を示し、それらによって算出されたすれ違い行動における回避軌跡を Fig. 14 に示す。なお、被験者がすれ違いをはじめときの x 軸との距離を x_D 、被験者と実験者がすれ違ったときの y 軸間距離を y_D としている。

(a) 静止している実験者とすれ違う条件

係数の平均として $k = 3.91$ (S.D. = 2.11), $m = -4.48$ (S.D. = 2.14) である懸垂線で被験者の歩行軌跡が描かれる。式 (4) にこれらの係数値を代入した式 (5) を示す。

$$y = 3.91 \cosh \left(\frac{x}{3.91} \right) - 4.48 \quad (5)$$

(b) 歩行している実験者とすれ違う条件

係数の平均として $k = 3.51$ (S.D. = 2.31), $m = -4.15$ (S.D. = 2.34) である懸垂線で被験者の歩行軌跡が描かれる。式 (4) にこれらの係数値を代入した式 (6) を示す。

$$y = 3.51 \cosh \left(\frac{x}{3.51} \right) - 4.15 \quad (6)$$

本実験において、人間が行ったすれ違い行動には以下の動作特性が確認された。

- 常にほぼ等速で移動
- 懸垂線に最適に近似可能な回避軌跡を生成

Fig. 13 Locus of human passing

Fig. 14 Schematic presentation of passing under the two conditions

これは、等速であることから、懸垂線上の運動の特別な場合であるといえる。

被験者はすれ違いにおいても極端に歩幅は変えず方向変換することが観察されたために速度がほぼ一定になり、懸垂線を生成することから足の出す方向を一步ごとに变化させることによって方向制御を行って軌跡を生成していると考えられる。

3. 人間とすれ違い行動を行う移動ロボット

3.1 移動ロボットのシステム構成

人間のすれ違い動作特性を踏まえて、人間とすれ違い行動を行う移動ロボットを製作した。移動ロボットのサイズは、人間の動作や行動から求めた基本的な空間単位を用いて、一人対一人のコミュニケーションや多数の人間が存在する病院待合室といった空間における人間の行動を明らかにしようとした研究報告[25]を参考に決定した。この報告では、人間に付帯する空間を $(18 \times 18 \times 18) \times 4 [\text{inch}^3]$ であるとしている[26]。本研究では、この考え方に基いて、距離計測の際に人間の検出が容易な腹部までの高さである約 $(18 \times 18 \times 18) \times 2 [\text{inch}^3] = (450 \times 450 \times 450) \times 2 [\text{mm}^3]$ を移動ロボットのサイズに採用した。本形状を含めた移動ロボットの仕様を Table 2 に示す。

Fig. 15 に、本移動ロボットのブロックダイアグラムを示す。移動ロボットは、搬送ロボットに対し一般的に用いられている2輪速度差方式を採用し、以下に示す二つのプログラムを有している。

● 基本動作プログラム

前進、停止、後退、および走行速度制御などの基本動作を実行する。

● すれ違い動作プログラム

人間のすれ違い行動特性に基づいたすれ違い動作を実行する。移動ロボットは、距離計測システムによって得られる相対距離情報と相対速度情報に基づいて、以上のプログラムを選択して実行する。

距離計測システムは、超音波センサを用いてすれ違う人間との相対距離を計測し、移動速度を算出する。本システムで相対した人間との距離を測定したところ 8[m] までの距離計測が可能であった。

また、本移動ロボットの静止時と 1[m/s] 移動時における距離計測値と実験値の関係はともに線形であることが確認された。なお、本システムとしての計測性能は $\pm 0.025 [\text{m}]$ である。

移動ロボットが、直線上を進行して懸垂線上へ滑らかに方向変換するために人間の歩行の特性を参考にした。人間が歩行をする際、片足を地面についてから上げるまで約 0.5[s] を要す

Table 2 Specification of the mobile robot

Length	420[mm]
Width	460[mm]
Height	940[mm]
Weight	8.5[kg]
Wheel diameter	$\phi 100[\text{mm}]$
Motor	Stepping motor $\times 2$
Max speed	1.5[m/s]

Fig. 15 Block diagram of the mobile robot

る [27]. 片足が接地している間に方向は決定されるので、方向変換には約 0.5 [s] を要することになる。そこで、0.5 [s] 以下で移動ロボットの方向変換を行うことが適切と考え、0.5 [s] 内で設定することができる円弧を移動ロボットの方向変換軌跡として採用した。なお、後述するが、本移動ロボットは人間とのすれ違い行動実験において 1 [m/s] で等速移動し、人間とのすれ違い行動実験を行う。ここでは、軌跡算出対象例として、静止者に対するすれ違いよりも若干方向変換角度が大きい歩行者に対するすれ違いを取り上げた。

算出によって、人間がすれ違い行動を開始する -2.1 [m] より 0.4 [m] 手前の -2.5 [m] ですれ違いを開始し、 -1.8 [m] で人間のすれ違い軌跡に沿って移動する設定とした。さらに、各座標値を算出した結果、移動ロボットは $-x$ 方向から直進し、 $(x,y)=(-2.5,0)$ において中心座標 $(x,y)=(-2.5,-1.51)$ から半径 1.51 [m] の円を 28.1 [deg] 回転した点 $(x,y)=(-1.80,-0.16)$ へ到達することによって、滑らかに人間の歩行時におけるすれ違い行動軌跡に移行できることが判明した。Fig. 16 に移動ロボットのすれ違い開始点における軌跡の概略を示す。なお、静止している条件においても、 -2.5 [m] からすれ違い行動を開始すればよいことが算出された。

3.2 移動ロボットのすれ違い行動アルゴリズム

本アルゴリズムでは、実験室内でのすれ違い行動実験の条件を踏まえて、直進する移動ロボットの前面に存在する人間を検知し、その相対速度から静止しているか歩行しているかを判断した後に、相対距離を検出してそれぞれのすれ違い行動を開始する。

後述する人間と移動ロボットのすれ違い行動実験を踏まえて、移動ロボットならびに人間の移動速度を 1 [m/s] と設定した。本

Fig. 16 The locus of mobile robot at the turning point to catenary (walking condition)

速度は、実験における人間への安全を考慮して、実験室内でのすれ違い行動実験で得られた平均歩行速度 1.73 [m/s] の約 60%、日常生活における男性の歩行速度 1.4 [m/s] の約 70% である。これは、青年のゆるやかな歩行速度でもある [24]。よって、人間と本移動ロボットが接近する際の相対速度 v は 2.0 [m/s] となるために、静止と歩行の状態を判断する基準として相対速度のほぼ中間値である 1.6 [m/s] を採用した。

相対速度の検出によって静止していると判断された場合には、移動ロボットのすれ違い動作開始距離である相対距離 $L \leq 2.5$ [m] を距離データから判断しなくてはならない。

歩行していると判断された場合に、移動ロボットがすれ違い動作を開始する相対距離 L を検討した。Fig. 16 に示したように、移動ロボットが方向変換のため、 $[x, y]=[-2.5, 0]$ から半径 $r = 1.51$ [m] の円上を $\theta_s = 28.1$ [deg] 移動する移動距離 L_s を算出したところ 0.7 [m] であった。さらに、 $[x, y]=[-1.8, -0.16]$ からすれ違う x 軸までの移動距離 L_{cw} は、式 (6) を用いて式 (7) から求められ、算出によって $L_{cw}=1.9$ [m] となった。

$$L_{cw} = \int_x^0 \sqrt{1 + (y')^2} dx = 3.51 \sinh \left(\frac{x}{3.51} \right) \quad (7)$$

よって、移動ロボットがすれ違いで移動する距離は $L_s + L_{cw} = 2.6$ [m] である。人間も移動ロボットも 1 [m/s] で移動する設定条件から要する時間は 2.6 [s] であり、この間に人間は 2.6 [m] 移動している。 x 軸上ですれ違うためには、人間の移動距離 2.6 [m] に移動ロボットの x 軸上での動作開始距離 2.5 [m] を加えた相対距離 $L \leq 5.1$ [m] を判断する必要がある。

以上を踏まえて構築した移動ロボットのすれ違い行動アルゴリズムを Fig. 17 に示す。本行動アルゴリズムの内容を以下に述べる。

- 移動ロボットは基本動作プログラムによって 1 [m/s] で直進する。
- 人間を検知した場合、相対速度 v を測定する。
- 相対速度 $v \geq 1.6$ [m/s] の場合、すれ違い対象が歩行していると判断し、人間が歩行している場合のすれ違い行動プログラムを実行する。
- 相対速度 $v < 1.6$ [m/s] の場合、すれ違い対象が静止していると判断し、人間が静止している場合のすれ違い行動プロ

Fig. 17 Algorithm of mobile robot motion for passing a man under the standing and walking condition.

ラムを実行する。

4. 人間と移動ロボットのすれ違い行動実験

4.1 実験方法

実験室内でのすれ違い行動実験と同一の実験領域において、移動ロボットは、前面に存在する人間が静止しているか歩行しているかを相対速度によって判断し、適切なすれ違い行動を行う。なお、本実験の軌跡の計測には、三次元位置計測システム (Vicon V140) を使用した。

人間が静止していると判断した場合のすれ違い行動の概要を示す。移動ロボットは、 x 軸上をマイナスの方向から原点に静止している人間に向かって $1 [m/s]$ で直進する。さらに、人間との相対距離が $2.5 [m]$ 以下になると、すれ違い動作を開始し、 $x = 0$ のときに最大すれ違い距離 $y = -0.57 [m]$ に達して人間とすれ違う。

人間が歩行している場合のすれ違い行動の概要を示す。人間は x 軸上のプラスの方向からマイナス方向へゆるやかに直進歩行 (約 $1 [m/s]$) する。移動ロボットは、 x 軸上のマイナスの方向からプラスの方向へ直進する。さらに、人間との相対距離が $5.1 [m]$ 以下になると、すれ違い行動を開始し、 $x = 0$ のときに最大すれ違い距離 $y = -0.64 [m]$ に達して人間とすれ違う。人間は、この間、直進歩行を継続する。

4.2 実験結果

人間が静止していると判断した場合の実験結果を、 $0.2 [s]$ ごとに位置をプロットして Fig. 18 に示す。移動ロボットが、等速で直進して、原点で静止している人間との相対距離 $2.5 [m]$

Fig. 18 Positions of a moving mobile robot and a standing man ($0.2 [s/\text{dot}]$)

Fig. 19 Positions of a moving mobile robot and a walking man ($0.2 [s/\text{dot}]$)

付近からすれ違い動作を開始していることが確認された。人間が歩行していると判断した場合の実験結果を、0.2[s]ごとにプロットした位置と共に時間の流れに従ってFig. 19に示す。移動ロボットと人間は互いに等速で直進し、移動ロボットは人間との相対距離5.1[m]付近からすれ違い動作を開始していることが確認された。また、どちらの場合においても、移動ロボットは原点よりy軸方向に最大距離をとってすれ違っていることも確認された。

以上から、製作した移動ロボットは、人間の静止と歩行の状態を判断し、人間の行動特性によってすれ違い行動を実現することが可能である。

5. おわりに

移動ロボットの回避行動の一手法として、人間のすれ違い行動に着目して本研究を行った。まず、屋外および実験室内のすれ違い行動実験によって、静止および歩行の条件における人間同士のすれ違い行動特性を抽出した。その結果、人間はほぼ等速で歩行しながらすれ違いを行い、その軌跡は懸垂曲線に最適に近似されることを確認して、人間が静止および歩行している条件における平均的なすれ違い行動特性をまとめた。次に、抽出した人間の行動特性によるすれ違い行動を実現する移動ロボットを製作した。製作したロボットは、人間行動の研究を参考にしたサイズであり、2輪速度差方式を採用して簡易な機構構成で人間のすれ違い行動特性を実現した。超音波センサを用いた距離計測システムは、移動ロボットが人間とすれ違い行動を行うために必要な距離測定を可能とした。最後に、製作した移動ロボットによる人間とのすれ違い行動実験を行い、抽出した人間のすれ違い行動特性で、移動ロボットが人間とすれ違い行動を行えることを確認した。

移動ロボットが回避行動をとるべき実環境下では、さまざまな方向からの人間の接近に対する回避行動が必要となる。この点についても、本行動特性を基本としてその回避行動を検討する応用が考えられる。さらに今後は、複数の人間と移動ロボットとのすれ違い行動の検討ならびにすれ違う人間の移動ロボットに対する印象要素を含めたすれ違い行動パターンについて検討する方針である。

参考文献

- [1] 斎藤之男：“医療・福祉ロボット”，日本ロボット学会誌，vol.8，no.1，pp.108-110，1990。
- [2] 菅野重樹，加藤一郎：“パーソナルロボット”，日本ロボット学会誌，vol.8，no.1，pp.121-122，1990。
- [3] 手嶋教之：“福祉ロボットのニーズ”，バイオメカニズム学会誌，vol.17，no.2，pp.69-74，1993。
- [4] 橋野賢：“生活介護ロボット”，日本ロボット学会誌，vol.14，no.5，pp.614-618，1996。
- [5] 藤崎正昭，内山隆：“高齢者・障害者用食事搬送自動ロボットシステム”，日本ロボット学会誌，vol.14，no.5，pp.619-623，1996。
- [6] E. Guglielmelli, P. Dario, C. Laschi, R. Fontanelli, M. Susani, P. Verbeeck and J.-C. Gabus: “Humans and technologies at home: from friendly appliances to robotic interfaces,” in Proc. 5th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.71-79, 1996。
- [7] 原功，長田正：“Configuration空間における障害物記述に関する考察”，日本ロボット学会誌，vol.11，no.2，pp.255-262，1993。
- [8] 島地重幸，赤堀拓也，向山宙：“擬距離ポテンシャル場を利用したConfiguration空間における障害物回避経路の探索”，精密工学会誌，vol.61，no.4，pp.506-510，1995。
- [9] J. Guldner and V.I. Utkin: “Sliding Mode Control for Gradient Tracking and Robot Navigation Using Artificial Potential Fields,” IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, vol.11，no.2，pp.245-247，April 1995。
- [10] 北村喜文，田中貴秋，岸野文郎，谷内田正彦：“octreeとポテンシャル場を用いた三次元環境での経路探索”，日本ロボット学会誌，vol.14，no.8，pp.1186-1193，1996。
- [11] 李承宰，山川宏：“剛体マニピュレータの障害物回避のための最小エネルギー軌道設計に関する研究”，日本機械学会論文集（C編），vol.63，no.610，pp.2030-2036，1997。
- [12] ロバート・ソマー：人間の空間。鹿島出版会，pp.3-123，1991。
- [13] ジョン・J・フルーイン：歩行者の空間。鹿島出版会，pp.27-43，1974。
- [14] Sommer, R: “Studies in personal space,” Sociometry, no.22，pp.247-260，1959。
- [15] 正田亘：人間工学，恒星社厚生閣，pp.233-258，1981。
- [16] T. Collett and P. Marsh: “Patterns of public behaviour: collision avoidance on a pedestrian crossing,” Semiotica, 12(4)，pp.281-299，1974。
- [17] 小川悦幸，幸島和子，幸島司郎：“ヒトのすれ違い行動”，日本動物行動学会第13回大会発表要旨集，p.47，1994。
- [18] 米本政昭，幸島司郎：“小学生のすれちがい行動に見られる性差”，日本動物行動学会第11回大会発表要旨集，p.31，1992。
- [19] 建部謙治，中島一：“静止した障害物に対する単独歩行者の回避行動”，歩行者の回避行動に関する研究（I），日本建築学会計画系論文報告集，no.418，Dec，pp.51-57，1990。
- [20] 建部謙治，辻本誠，志田弘二：“回避行動開始点の判定と前方回避距離”，歩行者の回避行動に関する研究（II），日本建築学会計画系論文集，no.465，Nov，pp.95-104，1994。
- [21] 依田光正，塩田泰仁：“人間の回避行動の分析とロボットによる再現”，第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.1041-1042，1995。
- [22] M. Yoda and Y. Shiota: “Basic Study on Avoidance Motions for Human Behaviors,” in Proc. 4th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.318-322，1995。
- [23] M. Yoda and Y. Shiota: “Analysis of human avoidance motion for application to robot,” in Proc. of 5th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.65-70，1996。
- [24] 土屋和夫：臨床歩行分析入門。医歯薬出版株式会社，p.22，1989。
- [25] アルバート・E・シェフレン：ヒューマン・テリトリー。産業図書，pp.1-7，1989。
- [26] アルバート・E・シェフレン：ヒューマン・テリトリー。産業図書，p.190，1989。
- [27] 土屋和夫：臨床歩行分析入門。医歯薬出版株式会社，p.21，1989。

依田光正 (Mitsumasa Yoda)

1961年11月23日生。1986年東京電機大学大学院修士課程（機械工学専攻）修了。同年職業能力開発大学校勤務。1993年同校福祉工学科専任講師。専門は、人間行動の分析、人間と行動するロボット、福祉機器およびリハビリテーション機器。

（日本ロボット学会正会員）

塩田泰仁 (Yasuhito Shiota)

1948年1月11日生。1971年東京大学工学部精密機械工学科卒業。1976年同大学院博士課程修了。工学博士。同年職業能力開発大学校勤務。1988年同校福祉工学科教授。専門は、人間行動とロボット、福祉機器。

（日本ロボット学会正会員）