

カルマンフィルタを用いた足位置予測に基づく 人物追跡自律移動ロボットの研究

中野 広樹[†] 下脇 克友[†]
片山 明伯[†] 渡邊 睦[†]

本論では、追跡される人物の靴の位置を検知することによりロボットが自律的に追跡を行う、人物追跡手法を提案する。本手法は追跡人物決定・再確認モードと人物追跡モードの2つのモードから構成されている。追跡人物決定・再確認モードではエッジ画像を利用した背景差分法により人物の検知を行う。人物追跡モードではエッジ画像と追跡の際における現在位置を予測するカルマンフィルタを利用して画像内で追跡を行い、この人物位置に基づいてロボットの車輪の速度を適宜設定し、実空間内における人物追跡を行う。本方式をプログラム化しし屋内環境の中で評価実験を行い、本提案手法の有効性を示した。

Research of foot pursuit method for the autonomous mobile robot based on prediction by Kalman Filter

HIROKI NAKANO,[†] YOSHITOMO SHIMOWAKI,[†] AKINORI KATAYAMA[†]
and MUTSUMI WATANABE[†]

Automatic human pursuit method by repetitively detecting the position of his shoes is newly proposed for navigating an autonomous mobile robot. The method is consisted of two modes, that is a tracked human detection mode and a human tracking mode. Background subtraction of edge images was used for the tracked human detection. To predict the current position in the human tracking mode, the Kalman Filter was utilized. Experimental results in indoor environment have shown the effectiveness of the proposed method.

1. はじめに

自律移動ロボットの研究発展に伴い、その用途は多彩な方向へ広がってきている。例えば、以下のロボットがあげられる

- 介護の際に生活介護用品を代わりに運搬する介護支援ロボット
- スーパーマーケットの自動買い物かごカート¹⁾
- 犬型ペットロボット・盲導犬ロボット

我々は上記の移動ロボットを実現させるためには、人物追跡の機能が不可欠であると考え、無拘束な状況下で人物を自律的に追跡するロボットビジョンの研究を行っている²⁾。

本稿では、ロボット前部に搭載された1台の視覚センサ(カメラ)からの情報と、一期前の人物位置・速度からカルマンフィルタを利用し予測された人物到達

予測位置の情報より、人物を靴領域の検出によって追跡する方法について述べる。

2. 人物自動追跡に関する従来手法

これまで行われてきた人物の自動追跡に関する研究を、追跡する人物部位と追跡に用いる画像特徴の面からまとめて述べる。

2.1 追跡部位

人物の特徴を利用して追跡を行っている場合、画像視覚系で追跡する部位もいくつかある。

- 肌・服³⁾
- 背中・肩⁴⁾
- 足元(踵)⁵⁾

本システムでは3番目に書いた「足元(踵)」を追跡部位とした。足元を追跡する理由として下の4つが考えられる。

- (1) カメラが下のほうを向いているため、障害物と足を同時に視界に入れることができる。
- (2) 足が地面についていると仮定することにより、

[†] 鹿児島大学 大学院 理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering,
Kagoshima University

画面上の足位置から距離検出可能。

- (3) カメラの視点が低いので、カメラを設置する高さが低くなりロボットの小型化ができる。

2.2 画像特徴

ロボットが追跡に用いる人物部位として以下のものが提案されている。

- オプティカルフロー⁶⁾⁷⁾
- 色相・明度³⁾
- エッジ

(テンプレートマッチングなどを利用)

しかしオプティカルフローをする場合、オプティカルフローを抽出するために画像処理専用ハードウェアや多数の PC による並列処理が必要な大規模なシステムとなる上、フロー自体の精度向上が困難である。またエッジを利用する場合には、追跡物体を輪郭でしか捉えていないため、追跡物体の特定は不可能に近い。しかし、追跡物体の特徴を利用して、追跡物体までの距離を算出することが可能なことがある。また追跡物体の特徴的な色相明度に基づいて追跡を行う場合には、追跡物体の特徴を利用しているため追跡物体の特定は可能である。しかし、似た色相明度の物体に対しては区別することは困難であり、追跡物体までの距離を出すことは不可能である。

ここで本システムでは、エッジを利用した場合の追跡物体までの距離を算出することが可能あることと、色相パターンを利用した場合の追跡物体の特定が可能であることを組み合わせることにより人物の追跡を行う。本提案手法では、人物の靴領域のエッジを抽出し、これを追跡することにより高速かつ安定的な人物追跡を実現することを目指した。

3. 処理の流れ

本提案方式は2つのモードから構成される(図1)。

- 追跡人物決定・再確認モード
 - ロボット停止時においてカメラ画像内に現れた人物を追跡人物として決定し、エッジベースの背景差分により新しく出現した人物の靴領域を抽出する。次にこの抽出したエッジ周辺の色相および明度ヒストグラムを求め記憶する。
- 人物追跡モード
 - 一期前の人物位置から現時点の人物到達位置をカルマンフィルタ⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾を用いて予測することによって靴領域を抽出し、この領域内にある最下エッジ位置を人物の靴候補として求め、予め記憶した色相および明度ヒストグラムと比較することにより最下エッジ点を人物の3次元位置と決定す

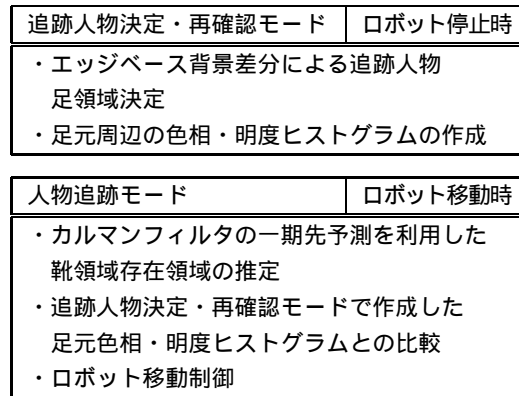


図1 本システムの構成
Fig. 1 Composition of this system

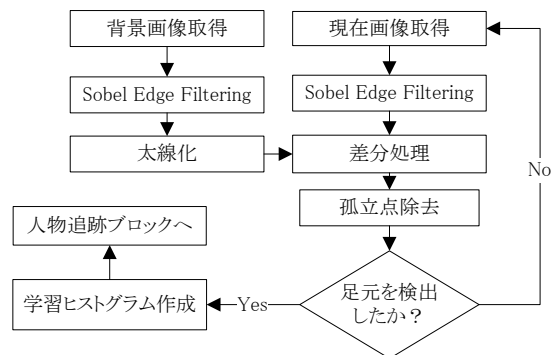


図2 追跡人物決定・再確認モードの流れ
Fig. 2 The flow in pursuit person determination mode

る。追跡中に人物が隠れなどにより見失った場合は、ロボットを停止させ追跡人物決定・再確認モードに戻る。

3.1 追跡人物決定・再確認モード

追跡人物決定・再確認モードの流れを図2に示す。

システム開始時に、人物の存在しない背景画像を取得し、そのエッジ成分の抽出太線化を行い保存する。次に入力画像から抽出したエッジ画像と背景エッジ画像との差分を行う。孤立点除去の処理を行い、人物の足元のエッジを抽出する(図3)。最下端にあるエッジを人物の最下端と決定する。

初回検出時のみ、追跡人物の靴領域付近の色相・明度値をサンプリングし、正規化された色相・明度ヒストグラム(以下学習ヒストグラムと呼ぶ)を作成する。選択する靴領域の大きさは図4に示す。この大きさは実験的に決めた。学習ヒストグラムは初回検出時のみ作成し、追跡が終了するまでは変更しないことにした。これが終わると、人物追跡モードへと移行する。



図 3 人物を抽出した様子 (四角で囲まれた部分)

Fig. 3 Signs that the person was extracted (square and surrounded portion)

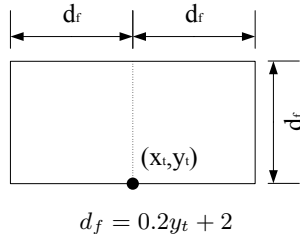


図 4 靴領域として切り出す大きさ

Fig. 4 The size started as a shoes domain

3.2 人物追跡モード

人物追跡モードの処理の流れを図 5 に示す。

入力画像に Sobel エッジ処理・孤立点除去を行う。次に前時点の人物位置を基にして以下に述べるカルマンフィルタによる予測処理を用いて設定した存在予測領域内のエッジを探索し、最も下にあるエッジ点を人物の足元として選択することとした。

次に検出された靴領域の色相・ヒストグラムと固有ヒストグラムとの比較を行う。靴領域の大きさは図 4 に示す。もし異なればロボットは停止し追跡人物決定・再確認モードへと処理が移行する (3.2.1)。

次にロボットの移動と次位置の予測を行うために人物位置を画像座標系からロボット座標系へと変換する (3.2.2)。ここで人物の下端は地面についているという仮定する。そうすると $Y = 0, \dot{Y} = 0$ となる。ロボット座標系における人物の座標は (1) に示す X_t に格納される。

$$X_t = \begin{bmatrix} X_t & Z_t & \dot{X}_t & \dot{Z}_t \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

ここで $X_t, Z_t, \dot{X}_t, \dot{Z}_t$ はそれぞれ、ロボット座標系における時刻 t の人物の位置、人物の移動速度を示す。 Y, \dot{Y} は予め 0 とわかっているため X_t の成分には含まれていない。

X_t よりロボットを人物の存在する方向へ移動する (3.2.3)。また X_t は人物位置予測にも利用するが、ロボット座標系の原点がずれているためカルマンフィルタを利用した線形予測ができない。そこでロボット座標系の原点の位置を合わせるためロボット移動の補正

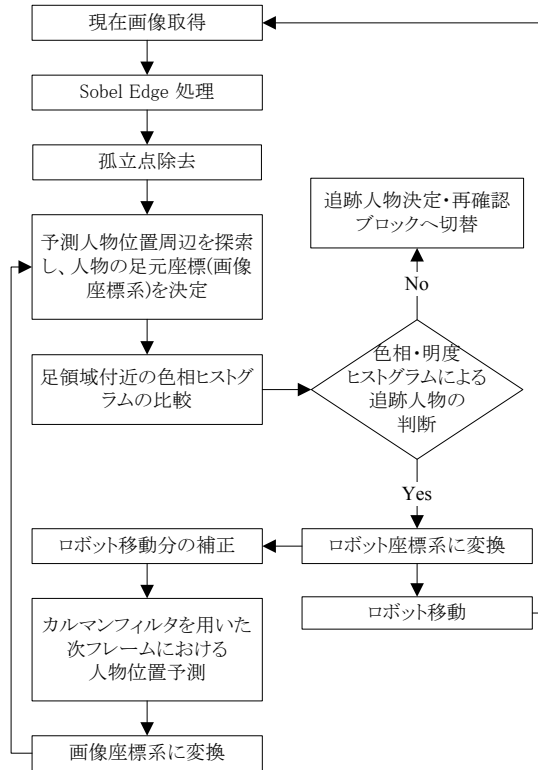


図 5 人物追跡モードの流れ

Fig. 5 The flow in person pursuit mode

を行う (3.2.4)。その後カルマンフィルタを利用した次フレームにおける人物位置予測をする (3.2.5)。人物到達予測位置の結果はすぐに画像座標系に変換される (3.2.6)。

3.2.1 色相・明度ヒストグラムの比較

色相・明度ヒストグラムは先の学習ヒストグラムと比較する。比較材料が 2 つあるため表 1 に従って同じ追跡物体かを判断する。

3.2.2 画像座標系からロボット座標系への変換

ロボット座標系・カメラ座標系・画像座標系の関係を図 6 に示す。

画像座標系からロボット座標系への変換にあたり、カメラ座標系に一旦変換する。画像座標系とカメラ座標系の関係式は (2) によって示される。ここで x, y は

表 1 色相・明度ヒストグラムを利用した判断基準
Table 1 The judgment standard using hue and the brightness histogram

		Hue histogram	
		Same	Difference
brightness	Same		×
	Difference		×

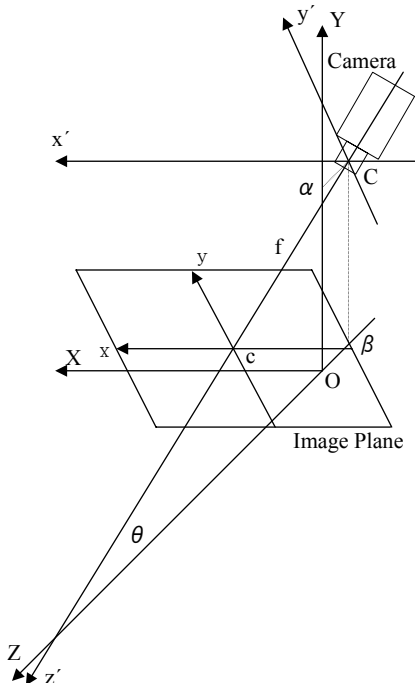


図 6 ロボット座標系・カメラ座標系・画像座標系の関係

Fig. 6 Relation between a robot coordinate system, a camera coordinate system, and a picture coordinate system

画像座標系の座標 x', y', z' はカメラ座標系の座標を表す¹¹⁾

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (2)$$

ロボットに対するカメラの位置・姿勢から、カメラ座標系とロボット座標系には (3) に示す関係式が成り立つ。X, Y, Z はロボット座標系の座標を表す。また α, β はロボット座標の原点からそれぞれ Y 軸・Z 軸方向におけるカメラ設置位置、 θ は地面とカメラ光軸中心のなす角を示す。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

しかし、これでは未知変数が 4 つ以上になるためロボット座標系への変換ができない。そこで人物の下端

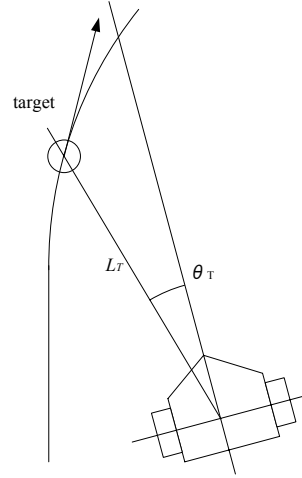


図 7 ロボット位置と人物位置との関係

Fig. 7 Relation between a robot position and a person position

は地面上に存在するという仮定を入れる。そうすると $Y = 0$ となるため変換が可能となる。その変換式は (4) を使って表される。

$$\begin{cases} X = \frac{s}{f}x \\ Z = s \left(\frac{y}{f} \sin \theta + \cos \theta \right) + \beta \\ s = \frac{\alpha}{\frac{y}{f} \cos \theta - \sin \theta} \end{cases} \quad (4)$$

3.2.3 ロボット移動のための速度設定

人物とロボットの間隔が 1m 以上の時には、人物の足元を移動目標地点とし、1m 以内の時には移動目標地点を人物の 60cm 手前と設定することにより、接近した場合にロボットと人間が衝突する危険を回避するとともに、視覚領域から人物の足元が外れるのを防止する制御とした。

次に移動目標地点を与えてロボットの移動速度を決定させるためにフィードバック制御を用いた。人物とロボットとの距離 L_T 、人物とロボット進行方向のなす角 θ_T 、フィードバックゲイン K_V, K_t, K_{tD} から右車輪の速度 V_R 、左車輪の速度 V_L は (5) ~ (8) のように書き表せる¹²⁾¹³⁾：

$$V_R = V + \Delta V \quad (5)$$

$$V_L = V - \Delta V \quad (6)$$

$$V = K_V L_T \quad (7)$$

$$\Delta V = K_t \theta_T + K_{tD} \dot{\theta}_T \quad (8)$$

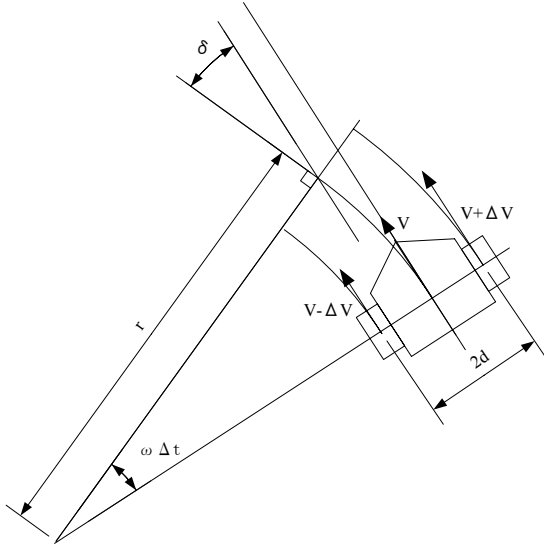


図8 時刻 t と $t+1$ におけるロボット位置の関係
Fig. 8 Relation between Time t and the robot position in Time $t+1$

3.2.4 ロボット移動分の補正

時刻 t と $t+1$ におけるロボット位置の関係を図8に示す。図8に示す通り、ロボットが移動するので時刻 t と $t+1$ の空間内におけるロボット座標系の原点の位置がずれる。人物位置予測にあたり自己位置推定を利用してロボット移動分を補正していく。自己位置推定には車輪の回転から距離等を出す手法を利用する。この手法では実空間との誤差が発生する。誤差の影響を少なくするために、誤差を蓄積させず、1フレームの処理ごとにロボットの移動分を算出している。

ロボットは Δt 間に前方に ΔZ 、横方向に ΔX 進み、ロボットの進行方向の角度は δ ずれるとするときロボット移動の補正式は (9) となる。

$$\begin{bmatrix} X_{t+1} \\ Z_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_t + \Delta X \\ Z_t + \Delta Z \end{bmatrix} \quad (9)$$

ロボット移動速度は3.2.3の式によって表される。この式ではロボットの移動経路は円弧となる。これより $\Delta Z, \Delta X, \delta$ を算出する。ロボットの移動経路が円弧なので Δt 間における円弧の中心における角移動量 $\omega \Delta t$ と δ には (10) の関係式を使って表すことができる：

$$\delta = \omega \Delta t \quad (10)$$

また角移動量と r (移動経路である円弧の中心からロボット中心までの距離) を使うことにより移動量を (11) で表すことができる：

$$\begin{aligned} \Delta Z &= r \sin \omega \Delta t \\ \Delta X &= r (1 - \cos \omega \Delta t) \end{aligned} \quad (11)$$

δ の算出にあたり ω の算出を行う。算出にあたり Δt 間における右車輪・左車輪の移動量とロボット移動経路の円弧の長さは同じであることを利用して両輪に対して (12) の方程式を立てる。ここで d はロボット中心から車輪までの距離を表す。

$$\begin{cases} (r-d)\omega\Delta t = (V-\Delta V)\Delta t \\ (r+d)\omega\Delta t = (V+\Delta V)\Delta t \end{cases} \quad (12)$$

(12) の方程式を解くと

$$\omega = \frac{\Delta V}{d} \quad r = \frac{Vd}{\Delta V} \quad (13)$$

となる。(9)(11)(13) よりロボット移動の補正が可能となる。

$$\begin{aligned} X_{t+1} &= \left(X_t + \frac{Vd}{\Delta V} \right) \cos \frac{\Delta V}{d} \Delta t \\ &\quad - Z_t \sin \frac{\Delta V}{d} \Delta t - \frac{Vd}{\Delta V} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Z_{t+1} &= \left(Z_t + \frac{Vd}{\Delta V} \right) \sin \frac{\Delta V}{d} \Delta t - Z_t \cos \frac{\Delta V}{d} \Delta t \end{aligned} \quad (15)$$

3.2.5 カルマンフィルタ

一期先における人物位置の予測のためにカルマンフィルタを用いる。

まず、人物の移動は (16)(17) で示される線形離散時間確率システムの方程式によって示されるとする：

$$\mathbf{X}_{t+1} = \mathbf{F} \mathbf{X}_t + \mathbf{w}_t \quad (16)$$

$$\mathbf{Z}_t = \mathbf{H} \mathbf{X}_t + \mathbf{v}_t \quad (17)$$

\mathbf{X}_t は (1) に示した状態ベクトル、 \mathbf{Z}_t は観測ベクトル、 \mathbf{w}_t は平均値0共分散 \mathbf{Q}_t の4次元外乱ベクトル、 \mathbf{v}_t は平均値0共分散 \mathbf{R}_t の4次元観測雑音、 \mathbf{H} は 4×4 観測行列、 \mathbf{F} は 4×4 状態遷移行列である。

本システムでは \mathbf{H} は 4×4 単位行列、 \mathbf{F} は次の (18) に示す行列とする。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

上記より本システムにおけるカルマンフィルタは

(1) フィルタ方程式

$$\hat{\mathbf{X}}_t = \bar{\mathbf{X}}_t + \mathbf{K}_t (\mathbf{Z}_t - \mathbf{H} \bar{\mathbf{X}}_t) \quad (19)$$

$$\bar{\mathbf{X}}_{t+1} = \mathbf{F} \hat{\mathbf{X}}_t \quad (20)$$

(2) カルマンゲイン

$$\begin{aligned} K_t &= \bar{P}_t H^T [H \bar{P}_t H^T + R_t]^{-1} \\ &= \hat{P}_t H R_t^{-1} \end{aligned} \quad (21)$$

(3) 推定誤差共分散行列

$$\bar{P}_{t+1} = F \hat{P}_t F^T + Q_t \quad (22)$$

$$\hat{P}_t = \bar{P}_t - K_t H \bar{H}_t \quad (23)$$

(4) 初期条件

$$\hat{X}_0 = X_0 \quad (24)$$

$$\hat{P}_0 = P_0 \quad (25)$$

(19) によって最適な推定値が出された人物位置は (20) によって一期先予測値へと変換される。

3.2.6 ロボット座標系から画像座標系への変換

3.2.2 の (2)(3) よりカメラ座標系で表された人物位置は (26) により画像座標系へと戻される。人物の下端は地面についているという仮定より、 $Y = 0$ となっている。

$$\begin{cases} x = \frac{f}{s} X \\ y = \frac{f}{s} \{ \alpha \cos \theta + (Z + 60) \sin \theta \} \\ s = -(Y - 310) \sin \theta + \beta \cos \theta \end{cases} \quad (26)$$

4. 実験結果

移動ロボットには ActivMedia Robotics 社製の Pioneer3 DX-8 (図 9)、ロボットの移動のためには ActivMedia Robotics 社のロボット制御用プログラム "ARIA 1.3.2" のライブラリを使用した。ロボットに搭載するカメラは 25 万画素相当の NTSC カメラを使用し、ロボット座標原点から見た Y 軸・ Z 軸方向のカメラの設置位置 α, β はそれぞれ $31cm, -6cm$ とした。カメラ光軸は地面に対しての角度 θ は 23.15° とした。

本システムは 640×480 の解像度を持つ Matrox 社製キャプチャボード Meteor2 を挿した CPU:2.6GHz のデスクトップ PC に、C++ 言語を基本にした Microsoft 社製 Visual C++ .NET を用いて上記アルゴリズムを実装した。

ロボットで捉えた画像は一旦無線でビデオデッキに装着したアンテナまで送られる。そこで画像信号の安定化を行った後、3. に述べた処理を行う。画像処理の結果として出てきた移動ロボットへの制御信号は



図 9 今回使用したロボット (ActivMedia Robotics 社製の Pioneer3 DX-8)

Fig.9 The robot which used it this time (Pioneer3 DX-8 made from ActivMedia Robotics)

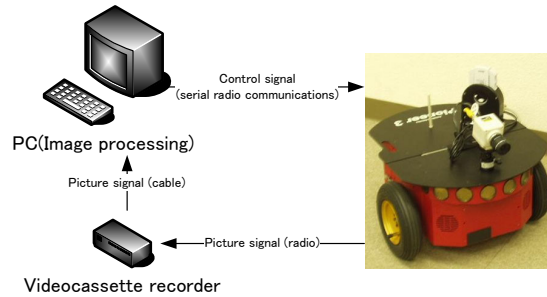


図 10 本システムの接続図

Fig.10 The connection figure of this system

シリアルポートより無線で移動ロボットへ送信される (図 10)。

4.1 追跡実験

室内環境 (床材:カーペット) 下において移動ロボットによる人物の追跡実験を行った。その時の様子を図 11 の 1~8 に時系列的に示す。1 で机の物陰から横向きに出てきた人物を検知し、追跡人物決定・再確認モードから人物追跡モードへと切り替わる。2~4 で幅 80cm の直線コースにおいて追跡を行い、5~7 に示すように右に曲がりながら追跡し、8 でドアの前で停止した人物の直後でロボットを停止させることができた。

図 11 における人物追跡の様子を撮影したビデオの映像よりそれぞれの位置を 1 秒おきに計算により求め、プロットした図を図 12 に示す。人物を見失うことなく追跡できており、人物停止時には 60cm の間隔を持って停止したことが確認できた。

追跡人物決定・再確認ブロック、人物追跡ブロック、両方の画像処理において 8~9FPS(Frame Per Second) で処理を実現でき、屋内における歩行状態の追跡では、リアルタイムで追跡を行うことができた。

追跡の性能評価の実験を行ったところ、追跡人物決定ブロックから人物追跡ブロックに移行し、73% の

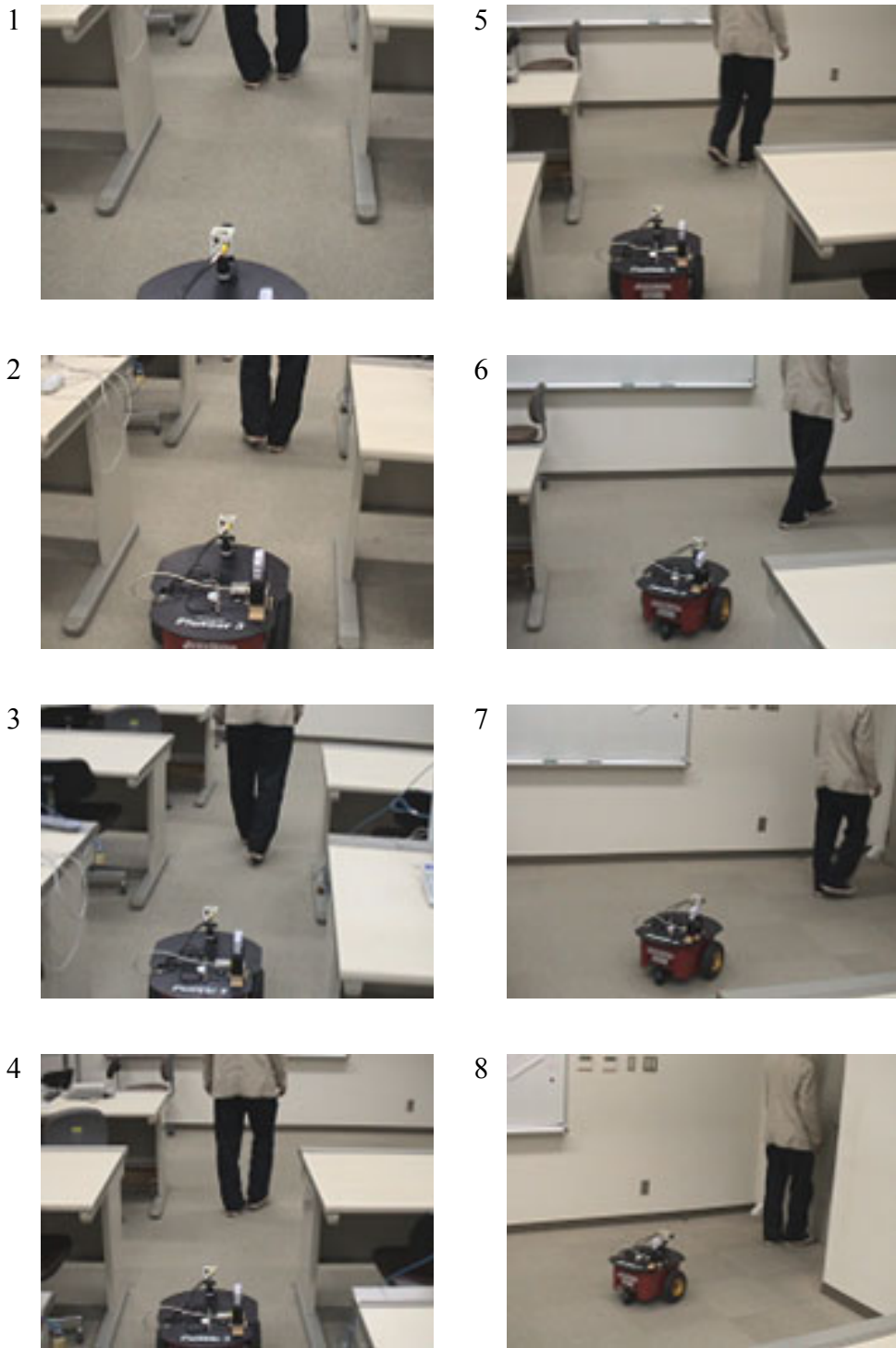


図 11 移動ロボットによる人物追跡の様様
 Fig. 11 The situation of the person pursuit by the move robot

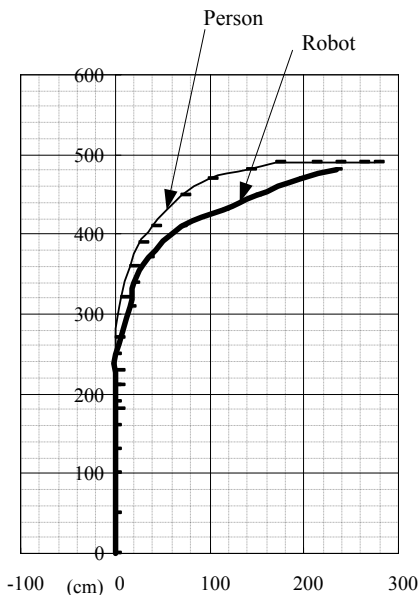


図 12 実験における人物移動ロボットの経路

Fig. 12 The course of a person and a move robot in an experiment

確率で 5 秒以上の追跡が行われた。

5. 考 察

図 12 からわかるように、直線での移動部は人物とロボットの経路がほぼ一致しているが、曲線での移動部は人物とロボットの経路が大きくずれてしまっている。これは、ロボット移動に用いたフィードバックゲインが小さかったのと、ロボットの動作遅延を余り考慮に入れなかったのが原因と考えられる。ロボット動作遅延の解析やより状態に適したフィードバックゲインの採用によりこのずれは少なくできるものと考えられる。

人物追跡ブロック実行中においてカルマンフィルタの予測が大きくなりすぎてしまうことがあった。これは人物の最下点を右足左足考えずに追跡していることにより、人物経路が曲がってしまったと誤認してしまっていることが原因と考えられる。その対策として一期先予測を左右の足毎独立に行うことが考えられる。

6. おわりに

カルマンフィルタによる足領域予測を用いた移動ロボットによる人物追跡の方法について提案し、屋内実験によりその有効性を示した。

今回予測領域をひとつにしたが、今後は左右の足の独立した予測を用いた靴領域検出の部分について開発していく予定である。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会・基盤研究(C)(2)「分散視覚認識エージェントの統合に基づく親和的情報空間の展開」(平成 15～17 年度、課題番号 15500115)の援助による。ここに深謝します。

参 考 文 献

- 1) 本間稔規, 吉川毅, 橋場参生, 鈴木慎一, 澤山一博: "自律移動ロボット搭載用ステレオビジョンシステムの開発", 北海道立工業試験場報告 NO.299, pp.81-87(1997).
- 2) 中野広樹, 下脇克友, 片山明伯, 渡邊睦: "カルマンフィルタを用いた人物位置予測に基づく自律移動ロボットの人物追跡システム", 第 22 回日本ロボット学会学術講演会 CD-ROM, 3F15(2004).
- 3) 中北学, 青木義満, 橋本周司: "自律移動ロボット搭載を念頭に置いた実時間人物追跡システム", 第 55 回パターン計測部会研究会, pp.9-14(2001).
- 4) 平井伸幸, 酒谷広太, 溝口 博: "対人追従ロボットのための後背面の視覚追跡", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集 (2004).
- 5) 岡部公輔, 溝口博, 丸山大樹, 平岡和幸, 重原孝臣, 三島健稔, 吉澤修治: "人とロボットの歩行同期のための視覚による踵追跡・歩行ピッチ抽出", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集, 2P2-3F-B6(1)-(2)(2003).
- 6) 古賀由紀夫, 片山明伯, 渡邊睦, 山本美子, 渡部悠紀, 岩田穆: "移動観測系における移動物体検出提示システムの検討", 情報処理学会研究報告 2003-CVIM-136, pp.91-98(2003).
- 7) 子安大士, 三浦純, 白井良明: "実時間全方位ステレオを用いたロボットナビゲーションのための移動物体認識", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'01(2001).
- 8) 片山徹: "応用カルマンフィルタ", 朝倉書店 (1983).
- 9) J.Badenas, J.M.Sanchiz, F.Pla: "Using Temporal Integration for Tracking Regions in Traffic Monitoring Sequences", IEEE Computer Society 15th International Conference on Pattern Recognition Barcelona 2000 Volume3, pp.1125-1128(2000).
- 10) 早坂光晴, 富永英義, 小宮一三: "逆投影法とカルマンフィルタを用いた複数移動物体位置認識とその追跡", 信学技報, PRMU2001-132, pp.133-138(2001)
- 11) 出口光一郎: "ロボットビジョンの基礎", コロナ社 (2000).
- 12) 宮崎文夫, 升谷保博, 西川敦: "ロボティクス入門", 共立出版 (2000).
- 13) 熊谷正朗: "車輪移動ロボット", <http://www.mech.tohoku-gakuin.ac.jp/rde/contents/course/robotics/wheelrobot.html>