

方向変化に伴う体の傾きを考慮した歩容認証

Gait Identification Considering Body Tilt by Walking Direction Changes

榎原 靖† 佐川 立昌† 向川 康博† 越後 富夫‡ 八木 康史†

Yasushi MAKIHARA†, Ryusuke SAGAWA‡, Yasuhiro MUKAIGAWA‡, Tomio ECHIGO†,
Yasushi YAGI†

†大阪大学 ‡大阪電気通信大学

†Osaka Univ., ‡Osaka Electro-Communication Univ.

E-mail: makihara@am.sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract

近年、カメラから離れた場所での個人認証手法として、歩容認証が注目を集めている。しかし、歩行者が曲がり道を歩く場合や、道から建物に入る場合には歩行方向が徐々に変化し、その際の遠心力の影響で体が傾くため、歩容認証が困難となる。そこで、本研究では最初に、歩容シルエットの時空間ボリュームから抽出される周波数領域特徴と方向変換モデルを用いた歩容認証手法を導入する。次に、人物追跡によって得られる歩行軌跡を基に遠心力及び体の傾き角度を推定することで、歩容シルエットを補正する。最後に、方向変化を伴う円軌跡の歩行に対する認証実験を行い、本手法の有効性を確認した。

1 はじめに

近年、監視システムやアクセスコントロールのための個人認証技術の必要性が高まっており、人間の生体情報に基づくバイオメトリクスによる認証技術が注目されている。バイオメトリクスには、指紋、虹彩、顔等を利用したものがあるが、最近、広域監視への応用を考えて、カメラから離れた場所での認証が可能な手法として、歩容認証が注目を集めている。

現在、歩容認証手法として、モデルベースの手法 [1][2][3][4] やアピアランスベースの手法 [5][6][7][8] が多数提案されている。これらの手法における問題の一つとして、歩行方向や観測方向の変化による見えの変化が挙げられる。実際、Yuら [9] は、観測方向の異なる歩行シーケンス同士の照合においては、認証性能が低下することを示している。

方向変化への対応手法として、視体積交差法によって仮想的な方向の歩容画像を合成する手法 [10] や、歩容を矢状面¹内運動と仮定して、透視投影によって方向

を変換する手法 [11] が提案されている。しかし、前者は認証対象の全被験者の複数方向からの同期画像が必要であること、後者は画像面と矢状面とのなす角が大きくなる場合には自身の体による隠蔽で誤差が大きくなることから、実際に用いることは難しい。

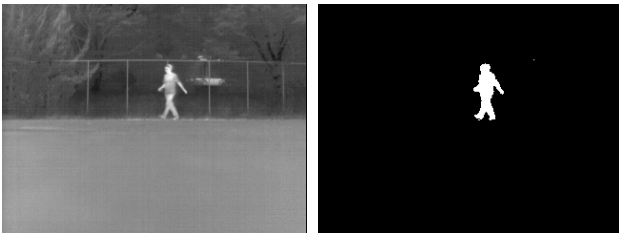
これに対して、Utsumiら [12] が提案した方向変換モデル (View Transformation Model, 以下 VTM と呼ぶ) を周波数領域の特徴に対して拡張することで、一方向ないし少数の方向の特徴を参照方向として、他の方向における歩容特徴に変換する手法 [13] が提案されている。また、その周波数領域における VTM を用いることで、様々な方向の直線歩行に対して個人認証が可能であることも示されている。

しかし、歩行者が曲がり道を歩いて歩行方向が徐々に変化するような場合には、遠心力の影響で体が傾き、観測される歩容シルエットが傾くことで認証性能が低下するという問題がある。一つの補正方法として、シルエットの主軸に基づいて傾き補正をすることが考えられる。但し、歩容は必ずしも左右対称ではなく、腕の振り方や脚の運び方によって主軸の方向が変化するため、安定な補正方法とは言えない。

そこで、本論文では、歩行者にかかる遠心力に基づく歩容シルエットの傾き補正手法を提案する。最初に、歩行者を追跡することによって得られる歩行軌跡を基に、歩行者にかかる遠心力を推定する。次いで、物理的な力の釣り合いに基づいて体の傾き角度を推定することで、歩容シルエット補正を行う。

本論文の構成を以下に示す。まず、2節で周波数領域特徴を用いた歩容認証について簡単に述べる。次に3節で、方向変化時の遠心力による体の傾きの補正について述べる。最後に、4節で方向変化を伴う円軌道に対する歩容認証実験について述べ、5節で結論と今後の課題について述べる。

¹動物を左右対称に分割する垂直平面



(a) 入力画像 (b) 背景差分画像

図 1 赤外線カメラによる背景差分

2 周波数領域特徴を用いた歩容認証

2.1 歩容シルエットボリュームの作成

最初に背景差分を用いて歩容シルエットを抽出する。その際、通常のカラカカメラによる背景差分においては、影や照明変動によって抽出に失敗することがある。そこで、赤外線カメラ (NEC TH1702MX) を用いることで、温度画像による背景差分を行う。本赤外線カメラの画像サイズは 320×240 pixel で、フレームレートは 30fps である。図 1(a) は赤外線カメラによって撮影された入力画像であり、背景と比較して人物領域の温度が高くなっていることが分かる。よって、図 1(b) のような鮮明な歩容シルエットが得られる。また、今回は簡単化のために、画像中に存在する人物は一人であるとして、最大面積を持つ領域を人物領域として追跡するものとする。

次に抽出された歩容シルエットのスケールと位置合わせを行う。フレーム毎に領域の上端・下端・水平方向の中心を取得して、高さが 30pixel になるようにアスペクト比を保ったままスケールする。そして、時間軸方向に平滑化された水平方向の中心が画像中心になるように位置合わせして、画像サイズ 20×30 pixel の歩容シルエットボリューム (以下 GSV と呼ぶ) を作成する。

2.2 周波数領域特徴の抽出

最初に歩行周期 N_{gait} を、GSV の時間方向の正規化自己相関を最大化するフレームシフトとして算出する。その際、シフトの範囲は通常の歩行における個人差を考慮して実験的に [20, 40] とした。

次に、歩行周期に基づく周波数領域特徴を抽出する。最初に全体シーケンス S から歩行周期 N_{gait} フレーム毎にサブシーケンス $\{S_i\} (i = 1, 2, \dots, N_{sub})$ を取り出す。各サブシーケンスに対して、時間軸方向の離散フーリエ変換 (DFT) を計算して、更に歩行周期 N_{gait} で正規化された振幅スペクトルを以下のように計算する。

$$G_i(x, y, k) = \sum_{n=iN_{gait}}^{(i+1)N_{gait}-1} g(x, y, n) e^{-j\omega_0 kn} \quad (1)$$

$$A_i(x, y, k) = \frac{1}{N_{gait}} |G_i(x, y, k)|. \quad (2)$$

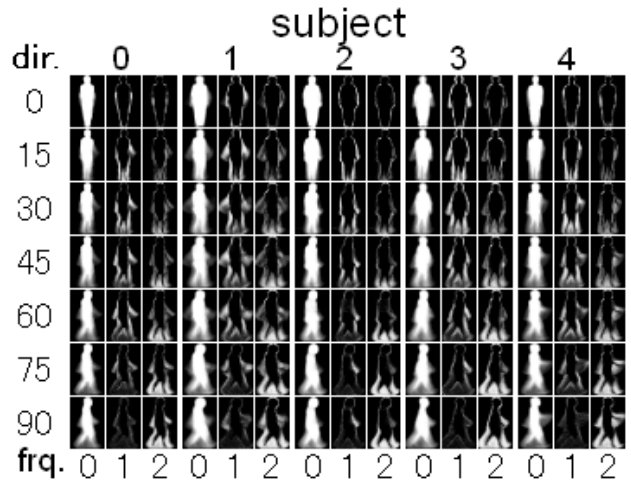


図 2 抽出された歩容特徴 (15 度刻みの方向)

ここで $g(x, y, n)$ は n フレーム目の位置 (x, y) における GSV の値である。 ω_0 は歩行周期 N_{gait} に対応する基本角周波数であり、 $G_i(x, y, k)$ は DFT の k 倍周波数に対応する成分であり、 $A_i(x, y, k)$ は歩行周期 N_{gait} で正規化された $G_i(x, y, k)$ に対する振幅スペクトルである。本論文では、歩容特徴として $A_i(x, y, k) (k = 0, 1, 2)$ を用いるため、その特徴の次元 N_A は $20 \times 30 \times 3 = 1800$ となる。また、以下では振幅スペクトル $A_i(x, y, k)$ の各要素をベクトルとして並べた N_A 次元の特徴ベクトルを a として定義する。

様々な被験者の 15 度刻みの方向に対する歩容特徴の抽出結果を図 2 に示す。方向 θ は図 3 のように光軸と歩行方向のなす角で定義され、本論文中での単位は度とする。歩容特徴は被験者毎に方向間で幅広く変化しており、また各方向に対して被験者間でもある程度の変化が存在している。さらに、方向間での歩容特徴の変化は全ての被験者に対して似た傾向を示しており、このような変化を 2.4 節で述べる VTM によって学習する。

2.3 周波数領域特徴の照合

最初に、入力 (以下プローブと呼ぶ) シーケンスを S_P と定義して、そのサブシーケンスを $\{S_{P_i}\} (i = 1, 2, \dots)$ とする。ここで、方向変化を伴うプローブにおいては、サブシーケンス S_{P_i} 毎に計算される平均方向 $\bar{\theta}_i$ が異なることとなる。そこで、辞書 (以下ギャラリーと呼ぶ) から、その平均方向 $\bar{\theta}_i$ に最も近い方向を持つシーケンス S_{G_i} を選択して、以下の照合基準を計算する。

$$d(S_{P_i}, S_{G_i}) = \min_j |a(S_{P_i}) - a(S_{G_{ij}})| \quad (3)$$

ここで、 $\{S_{G_{ij}}\} (j = 1, 2, \dots)$ は S_{G_i} のサブシーケンス、 $a(S)$ はサブシーケンス S に対する歩容特徴ベクトルである。

次に、サブシーケンスに含まれるばらつきや外れ値を考慮して、プローブの全体シーケンスとの照合基準

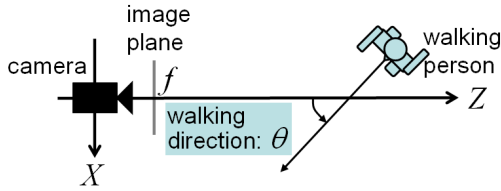


図 3 カメラ座標と歩行方向 θ の定義 (真上図)

を以下のように計算する .

$$D(S_P, S_G) = \text{Median}_i \{d(S_{P_i}, S_{G_i})\} \quad (4)$$

2.4 方向変換モデル

ここでは Utsumi ら [12] の方法を拡張した周波数領域特徴に対する VTM[13] について簡単に述べる .

最初に方向 θ を, K 個の方向に離散化し, m 番目の被験者の k 番目の方向に対する N_A 次元の歩容特徴ベクトルを $\mathbf{a}_{\theta_k}^m$ として定義する . ここで, 学習セットとして M 人の被験者の K 方向の特徴ベクトルが得られたとすると, それらを並べて作成した行列を以下のように特異値分解 (SVD) することができる .

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_{\theta_1}^1 & \cdots & \mathbf{a}_{\theta_1}^M \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{a}_{\theta_K}^1 & \cdots & \mathbf{a}_{\theta_K}^M \end{bmatrix} = USV^T = \begin{bmatrix} P_{\theta_1} \\ \vdots \\ P_{\theta_K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}^1 & \cdots & \mathbf{v}^M \end{bmatrix}. \quad (5)$$

ここで, U, V は各々 $KN_A \times M, M \times M$ の直交行列, S は特異値を並べた $M \times M$ の対角行列, P_{θ_k} は行列 US を構成する $N_A \times M$ の部分行列, \mathbf{v}^m は M 次元の列ベクトルである . これより, m 番目の被験者の方向 θ_i の特徴ベクトル $\mathbf{a}_{\theta_i}^m$ が, 行列 P_{θ_i} とベクトル \mathbf{v}^m の積で表され, 方向 θ_j から θ_i への特徴ベクトルの変換が以下のように得られる .

$$\hat{\mathbf{a}}_{\theta_i}^m = P_{\theta_i} P_{\theta_j}^+ \mathbf{a}_{\theta_j}^m. \quad (6)$$

ここで, $P_{\theta_j}^+$ は P_{θ_j} の擬似逆行列である . また, 複数方向の特徴 (その方向を $\theta_j(1), \dots, \theta_j(k)$ とする) が得られた場合には, 以下のようにして, 方向 θ_i のより正確な特徴に変換することができる .

$$\hat{\mathbf{a}}_{\theta_i}^m = P_{\theta_i} \begin{bmatrix} P_{\theta_j(1)} \\ \vdots \\ P_{\theta_j(k)} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{\theta_j(1)}^m \\ \vdots \\ \mathbf{a}_{\theta_j(k)}^m \end{bmatrix}. \quad (7)$$

3 体の傾きに対する歩容シルエット補正

3.1 歩行軌跡に基づく体の傾き推定

最初に歩行軌跡を得るために, 歩行者の位置推定を行う . 図 3 で定義したカメラ座標 (X, Z) における歩行者

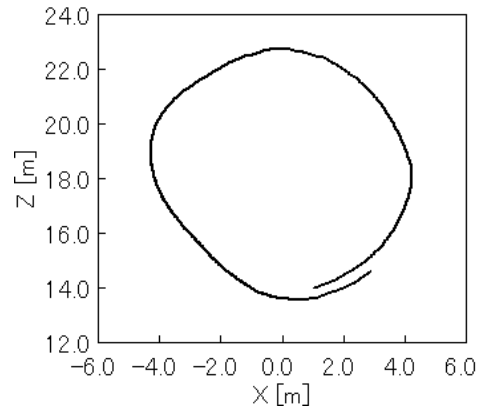


図 4 推定された歩行軌跡の例

の位置は, Hild ら [14] と同様に, 物体の実際の高さと画像上の高さの比に基づいて, 以下のように算出する .

$$X = \frac{H}{h} x, Z = \frac{H}{h} f. \quad (8)$$

ここで, H と h は各々カメラ座標と画像座標における歩行者の高さであり, f はカメラの焦点距離である . 本論文では, カメラ座標における各歩行者の高さ H , 即ち身長は既知であるとして, 焦点距離 f はカメラキャリブレーションによって事前に得られているものとする . 一例として円弧状の歩行に対して推定された軌跡を図 4 に示す .

次に, 推定された歩行軌跡に基づいて, 遠心力の推定を行う . 1 節でも述べたように, 歩行者が徐々にその歩行方向を変化させる場合には, 重力 $F_G (= mg)$ だけではなく, 遠心力 F_C を受ける . ここで, m は歩行者の質量で, g は重力加速度であり, $|g| = 9.8 \text{ [m/s}^2]$ とする . 歩行者にはこれらの合力が見かけ上の重力 F'_G となって作用し, 歩行者はバランスを取るために, 体を F'_G (図 5 の左) と同じ向きに傾けて歩行する . 照合の際には, このような歩行方向変化の有無による影響を受けないように, 歩容シルエットにおける体の傾きを補正する必要がある .

そこで, 次にこの体の傾き角度 ϕ を取得することを考える . 歩行軌跡上のある点について注目して, その点付近の軌跡が円弧で近似できるものとして, 歩行者がその円弧の曲率半径で円運動しているものとする . 遠心力 F_C は以下ようになる .

$$|F_C| = \frac{m|v|^2}{r}, \quad (9)$$

ここで, v は歩行者の速度で, r は半時計回りを正とする符号付の曲率半径である . これらは歩行軌跡より容易に計算される . 図 4 の円軌跡に対して推定された歩行速度と曲率半径を図 6 に示す . このようにして遠心力が求まると, 体の傾き角 ϕ が以下のように得られる .

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{|F_C|}{|F_G|} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{|v|^2}{r|g|} \right). \quad (10)$$

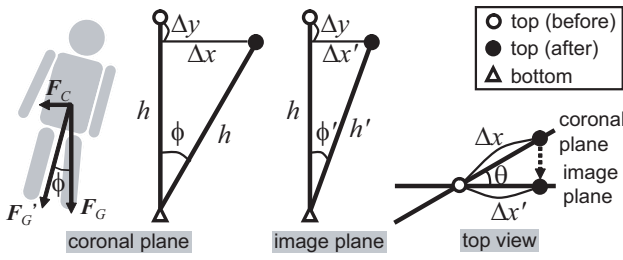


図 5 遠心力による体の傾き

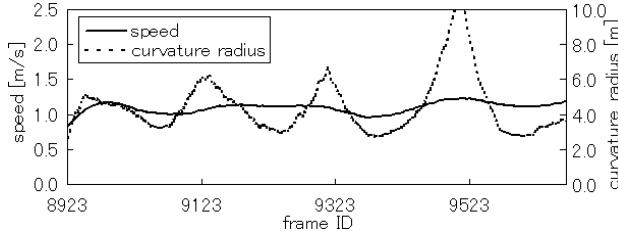


図 6 推定された速さと曲率

図 4 の円軌跡に対して推定された歩行方向 θ と体の傾き角 ϕ を図 7 に示す．歩行方向 θ は図 3 のように定義され，歩行速度 v より容易に求まる．

3.2 体の傾きと歩行方向に基づく画像補正

次に，推定された体の傾き角 ϕ と歩行方向 θ に基づいて，歩容シルエット画像の補正を行う．体の傾き角 ϕ の影響は，歩行方向 θ によって変化する．具体的には，弱中心投影を仮定すると，歩行が正面方向 (0, 180 度) に近い場合には，画像平面上での回転として現れ，側面方向 (90, 270 度) に近い場合には，画像平面状での垂直方向の伸縮として現れる．ここでは，足元の点を固定したときの，傾き前後の頭の頂点位置の変化について考え，その変化をキャンセルするような画像内回転と垂直方向伸縮を求めるものとする．

まず，前頭面²(図 5 の左) における頭の頂点位置の水平・垂直方向への変化 $\Delta x, \Delta y$ は，

$$\Delta x = h \sin \phi \quad (11)$$

$$\Delta y = h(1 - \cos \phi) \quad (12)$$

として得られる．次に，画像平面 (図 5 の中央) 上における水平方向への変化 $\Delta x'$ について考える．真上図 (図 5 の右) に基づいて歩行方向 θ の影響を考えると， $\Delta x'$

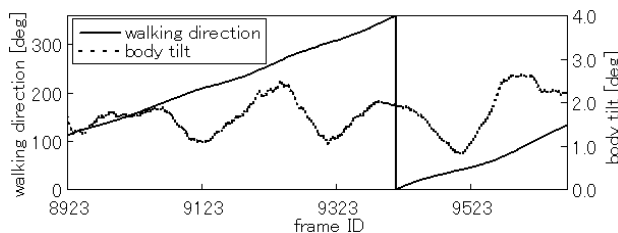


図 7 推定された体の傾きと歩行方向

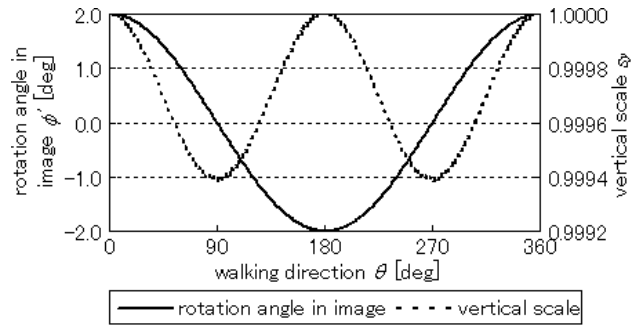


図 8 歩行方向に対する画像回転と垂直方向の伸縮 ($\phi = 2.0$)

は以下のように求まる．

$$\Delta x' = \Delta x \cos \theta = h \sin \phi \cos \theta \quad (13)$$

これより，画像上での回転角 ϕ' は，以下ようになる．

$$\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta x'}{h - \Delta y} \right) = \tan^{-1}(\tan \phi \cos \theta) \quad (14)$$

また，画像上における見かけ上の高さ，即ち傾き後の足元と頭の頂点間の距離 h' は，以下のように得られる．

$$h' = \sqrt{\Delta x'^2 + (h - \Delta y)^2} = h \sqrt{\sin^2 \phi \cos^2 \theta + \cos^2 \phi} \quad (15)$$

よって，垂直方向の伸張 s_y は，以下の通りになる．

$$s_y = \frac{h'}{h} = \sqrt{\sin^2 \phi \cos^2 \theta + \cos^2 \phi} \quad (16)$$

よって，歩容シルエット画像を画像中心に対して $-\phi'$ だけ回転して，垂直方向に $1/s_y$ だけ伸張することで，体が傾く前のシルエット画像が得られる．

ここで，ある体の傾き ϕ (ここでは仮に 2.0 度とする) に対して，画像内回転 ϕ' と垂直方向の伸縮 s_y が歩行方向 θ によってどのように変化するかを図 8 に示す．これより，歩行方向 θ が正面 (0, 180 度) 付近では，主に画像回転の影響を受け，側面 (90, 270 度) 付近では，主に垂直方向の伸張を強く受ける．但し，垂直方向の伸縮の影響は最大でも $\cos \phi (= 0.9994)$ であり，体の傾き角 ϕ が小さい場合は， $\cos \phi \simeq 1$ と見なすことができるため，殆ど影響が無いものと考えられる．一方，回転については最大で体の傾き角と同じ ϕ だけ傾くため，直接的な影響を受けることとなる．

図 4 の円軌跡に対して推定された画像内回転 ϕ' と垂直方向伸縮 s_y を図 9 に示す．図 7 の歩行方向 θ と照らし合わせてみると，歩行方向 θ が正面 (0, 180 度) 付近にあるときは，画像内回転角度 ϕ' が ± 2.0 度近くにまでなっており，側面 (90, 270 度) に近づくにつれて， ϕ' が 0 に近づいている．一方，垂直方向の伸縮 s_y は，正面付近にあるときは 1.0 に近く，側面方向に近づくにつれて縮小傾向になっている．

²動物を前後に分ける垂直平面で，矢状面と直交

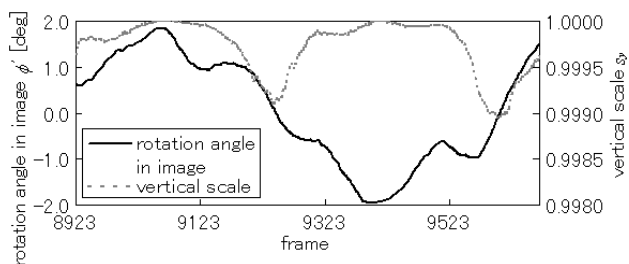


図 9 推定された画像回転と垂直方向の伸縮

図 10 に、図 4 の円軌跡に対する補正前後の歩容シルエット画像列を示す。補正前の画像の正面付近で (4~8 枚目) においては、遠心力によって体が反時計回りに回転しているが、補正によりこの回転がキャンセルされて、ほぼ直立状態になっていることが分かる。

4 実験

4.1 データセット

実験には、20 人の被験者の直線歩行 744 シーケンスと 15 人の被験者の方向変化を伴う曲線歩行の 15 シーケンスを用いた。直線歩行の歩行方向は 15 度刻みの 24 方向で取得した。曲線歩行については、今回は一例として半径 5m 程度の円軌跡を扱い、各被験者は 3 周分の円歩行を行った。VTM の学習セットは 20 人の 24 方向に対する 480 シーケンスを用いた。実際に用いるギャラリーは、0, 90, 180 度を参照として、学習した VTM を用いて 24 方向の特徴に変換したものをを用いた。また、カメラの設置高さやチルト角については一定とした。

プローブセット (テストセット) は、残りの直線歩行シーケンス (45 度刻み) と円軌跡歩行シーケンスからなる。円軌跡に対しては、比較に用いるために、体の傾き補正を行ったものと行わないものの 2 種類の特徴を抽出した。以下では、表記の簡単化のため、直線歩行のプローブと体の傾き補正有り・無し円軌跡歩行のプローブを、各々 "straight", "circular w/ BTC", and "circular w/o BTC" として表す。

4.2 実験結果

実験の評価には受信者操作特性 (ROC) 曲線 [15] における 10% 誤報率に対応する照合率を用いた。最初に、プローブ中の各サブシーケンスに対して個別に照合を行った場合の歩行方向毎の照合率を図 11 に示す。これより体の傾き補正によって照合率が改善されていることが分かる。特に、体の傾きが画像内での回転に直接影響を与える正面付近の歩行に対しては、補正前後で照合率が大きく改善されていることが分かる。また、補正を行った場合の円軌跡歩行は、直線歩行の照合率に比較的近い照合率を達成していることが分かる。

次に、複数周期のサブシーケンスを照合に用いた場合の平均的な照合率を図 12 に示す。これより、いずれ

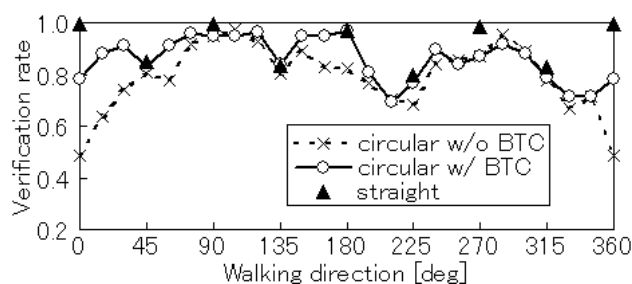


図 11 歩行方向毎の照合率 (誤報率 10%)

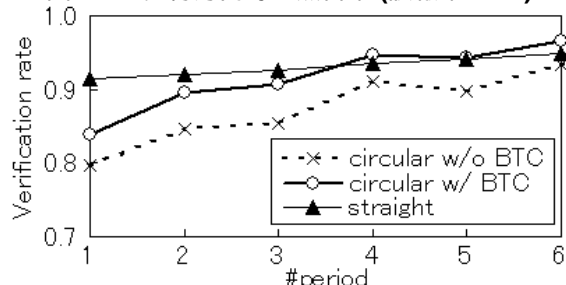


図 12 認識に用いる入力周期数に対する照合率の変化 (誤報率 10%)

のプローブに対しても、照合に用いる周期数が増えるに従って性能が改善されていることが分かる。また、円歩行軌跡に対しては、いずれの歩行周期数においても、傾き補正前後で照合率が改善されている。更に、3 周期以上を照合に用いる場合には、円軌跡歩行と直線歩行との照合率の差が殆どなくなっており、歩行中の方向変化に十分に対応できていることが分かる。

5 おわりに

本論文では、方向変化時の遠心力に伴う体の傾きを含む歩行シーケンスに対して、歩容認証性能を改善するための歩容シルエット画像の傾き補正について述べた。最初に様々な方向に対する直線歩行に対応するために、歩容シルエットの時空間ボリュームから抽出される周波数領域特徴と方向変換モデルを用いた歩容認証手法を導入した。次に、追跡によって得られる歩行軌跡を基に遠心力及び体の傾き角度を推定することで、歩容シルエットを補正する方法を提案した。最後に、直線歩行及び方向変化を伴う円軌跡の歩行に対する認証実験を行い、本手法のシルエットの傾き補正が有効であることを確認し、複数歩行周期で照合を行う場合には、直線歩行の場合とほぼ同様の性能が得られることを確認した。

一方では、従来の指紋認証等と比較すると照合精度が劣るという問題があるが、雑踏下での監視業務において注目すべき人を減らして監視員の負担を軽減するといったスクリーニング技術としては十分に効果があると言える。

また、今回はカメラの設置高さやチルト角を一定としたが、実際の監視シーンにおいてはチルト角が変化

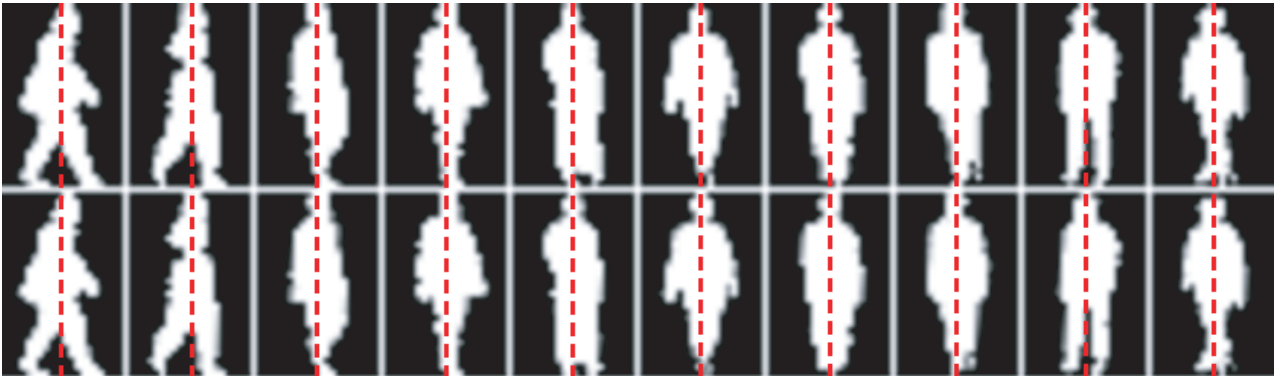


図 10 歩容シルエット画像の補正結果 (上段:補正前, 下段:補正後, 20 フレーム毎)

することが想定される．よって，今回取り上げた方位方向の変化に加えて，チルト角変化による認証性能への影響の解析と対応が今後の課題と言える．

参考文献

- [1] C. Yam, M. Nixon, and J. Carter, "Automated person recognition by walking and running via model-based approaches," *Pattern Recognition*, vol. 37, no. 5, pp. 1057–1072, 2004.
- [2] R. Urtasun and P. Fua, "3d tracking for gait characterization and recognition," *Proc. of the 6th IEEE Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition*, pp. 17–22, 2004.
- [3] R. Tanawongsuwan and A. Bobick, "Modelling the effects of walking speed on appearance-based gait recognition," *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2, pp. 783–790, 2004.
- [4] A. Bobick and A. Johnson, "Gait recognition using static activity-specific parameters," *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 423–430, 2001.
- [5] S. Sarkar, J. Phillips, Z. Liu, I. Vega, P. Grother, and K. Bowyer, "The humanoid gait challenge problem: Data sets, performance, and analysis," *Trans. of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 27, no. 2, pp. 162–177, 2005.
- [6] J. Han and B. Bhanu, "Individual recognition using gait energy image," *Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 28, no. 2, pp. 316–322, 2006.
- [7] T. Kobayashi and N. Otsu, "Action and simultaneous multiple-person identification using cubic higher-order local auto-correlation," *Proc. of the 17th Int. Conf. on Pattern Recognition*, vol. 3, pp. 741–744, Aug. 2004.
- [8] R. Sagawa, Y. Makihara, T. Echigo, and Y. Yagi, "Matching gait image sequences in the frequency domain for tracking people at a distance," *Proc. of the 7th Asian Conf. on Computer Vision*, vol. 2, pp. 141–150, Jan. 2006.
- [9] S. Yu, D. Tan, and T. Tan, "Modelling the effect of view angle variation on appearance-based gait recognition," *Proc. of 7th Asian Conf. on Computer Vision*, vol. 1, pp. 807–816, Jan. 2006.
- [10] G. Shakhnarovich, L. Lee, and T. Darrell, "Integrated face and gait recognition from multiple views," *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 439–446, 2001.
- [11] A. Kale, A. Roy-Chowdhury, and R. Chellappa, "Towards a view invariant gait recognition algorithm," *Proc. of IEEE Conf. on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, pp. 143–150, 2003.
- [12] A. Utsumi and N. Tetsutani, "Adaptation of appearance model for human tracking using geometrical pixel value distributions," *Proc. of the 6th Asian Conf. on Computer Vision*, vol. 2, pp. 794–799, 2004.
- [13] 榎原, 佐川, 向川, 越後, 八木, "周波数領域における方向変換モデルを用いた歩容認証," *情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア*, vol. 48, no. SIG1(CVIM17), pp. 78–87, Feb. 2007.
- [14] M. Hild, "Estimation of 3d motion trajectory and velocity from monocular image sequences in the context of human gait recognition," *Proc. of the 17th Int. Conf. on Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 231–235, Aug. 2004.
- [15] P. Phillips, H. Moon, S. Rizvi, and P. Rauss, "The feret evaluation methodology for face-recognition algorithms," *Trans. of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 10, pp. 1090–1104, 2000.