

平常時歩行動作からの足元の環境変化に伴う 動作特徴変化のモデリング

岡見和樹[†] 岩本尚也[†] 國友翔次[†]
須田洋文[†] 森島繁生[†]

CG アニメーションにおいてリアルな人間の動作を表現することは重要である。しかし環境変化に応じた複数の動作を生成するには未だ大きな手間がかかる。そこで本研究では、足元の環境変化に応じた人の歩行動作変化に着目し、その動作変化をより簡易的に表現する手法を提案する。まずモーションキャプチャを用いて通常歩行動作と環境変化後の動作を取得し、それら2種類の動作を主成分空間内で比較することで得られた差分ベクトルを、実空間に逆射影し平常時歩行動作に付加することで、環境変化に伴う動作変化特徴の表現を可能とした。

Modeling Walking Motion Transformation Related to Ground Condition Based on Usual Walking

Kazuki Okami[†] Naoya Iwamoto[†] Shoji Kunitomo[†]
Hirofumi Suda[†] and Shigeo Morishima[†]

Representing realistic human motion is an important theme for Computer Graphics. However, it is bothersome to generate motion which is adapted to environment. Therefore, this paper proposes the way to represent motion transformation easily between an usual walking motion and a walking motion on a different situation. First of all, we captured those two kinds of walking data by motion capture systems. One is a usual walking data such as walking on a flat ground and the other is an unusual one such as walking up a slope. And then, we compared those motions in principal component space and got a difference vector. Finally, we add it to a usual walking motion. As a result, we successfully produce a motion which represents the characteristics of changes related to different ground condition.

1. はじめに

近年、映画・ゲームなどに代表される映像コンテンツにおいてCGアニメーションが利用される機会は非常に増えており、人間をはじめとして、動物、ロボットなど多数のキャラクターが映像表現に用いられている。その中で、人間の動作をよりリアルなものとするには、CGアニメーションを用いた映像コンテンツの質を向上させるための、非常に重要な要素の一つであるといえる。しかし、現在の映像コンテンツには多数のキャラクターが存在していることと併せて考えると、足元の環境状態が異なる場合ごとの動作データを取得・作成することは非常に手間がかかることであるといえる。

人間の動作の表現手法としては、物理法則にのっとった人体モデルを利用して動作を生成する手法と、目的となる動作をモーションキャプチャなどを用いて実際に取得する手法の二つが主な手法となっているが、前者は物理的に破綻した動作を生成することはないが、人間らしい動作を表現することが困難であること、また前述した問題を解消するためにどのような変化を加えるべきかの判断が難しいことなどが問題として挙げられる。後者については被験者の労力が大きいことなどが問題となる。これらの問題を解決する手法として、モーションキャプチャを用いていくつかのサンプル動作を取得し、それらを補間して新たな動作を生成する手法[1]や、重みづけして合成し新たな動作を生成する手法[2]などが提案されているが、ユーザーがパラメータを調整する必要があり、目的となる動作の特徴を表現したものを合成することは困難である。

本研究では、足元の環境が変化した場合の歩行動作の変化を、それぞれの場合における平均歩行動作に対して主成分分析を用いて解析することで、動作の種類ごとに現れる顕著な特徴を抽出して合成することを目的とする。なお、今回坂道の角度が変化した場合の動作変化を一つの例として解析を行い、新たな動作を合成する手法を提案する。

2. 関連研究

複数の歩行動作を統計的に解析する研究として、男女間の歩行動作の違いを表現する手法[3]や、歩行動作の速度を始めとしていくつかの種類にパラメータを設定し、そのパラメータの変化に対応した動作を合成する手法[4]などが挙げられる。これらの手法においては、キーフレームごとの動作の情報集約のために主成分分析が用い

[†] 早稲田大学
Waseda University

られている。また、男女間の平均歩行動作において、腰関節の並進速度、全身の関節の角度、角速度の差異に着目して、男女間のスタイル変換フィルタを作成する研究[5]も存在する。しかし、これらの研究においては、個人性について言及がなされておらず、動作変化の特徴を選択的に抽出できていないなどの点で、個人の動作を変化させるに当たっては不十分であるといえる。

3. 研究概要

本研究は、足元の環境変化が起きた場合の歩行動作を主成分分析を用いて比較することで、歩行動作に対して環境変化が及ぼす影響を示す成分を抽出することを目的とする。まず、モーションキャプチャを用いて歩行動作を取得し、1つ1つの動作それぞれについて、1周期分のサンプル動作を作成する。そのサンプル動作はそれぞれ、フレーム間の意味合いが異なるため、時間的同期をとり、それぞれのフレームにおける動作の意味を一致させる。その後、主成分空間内で歩行動作を比較し、それぞれの主成分得点の推移と足元環境変化のパラメータとの相関が高いものを選択することで、動作変化に対して足元の環境変化が及ぼす影響を抽出し、その成分を用いて実際に動作合成を行う。なお、上述した相関関係を調べるときは、個人差によるばらつきを排除するために、平均得点の推移を用いるものとする。

4. 歩行動作比較のための前処理

4.1 サンプル歩行動作の作成

サンプル歩行動作の取得は光学式モーションキャプチャシステムを用いて行う。測定機器として Vicon 社の MX-40 (図 1)、光学式マーカ (図 2) を用いた。被験者は 20 代男性 6 名で行い、トレッドミル上での歩行の様子を約 20 秒間撮影した。撮影した歩行動作の種類は、平常時の歩行動作、坂道における歩行動作 (5°, 10°, 15°, 20°) となっている。なお、トレッドミルの速度はそれぞれの被験者が最も自然に歩行できると判断した速度に設定した。

以上の手順で取得した歩行動作データを、各関節間の長さが一定である同一キャラクターにリターゲットする。このキャラクターは 21 個の関節を持っており、Z 軸 X 軸 Y 軸方向の関節オイラー角に加え、人間の腰部分に当たるルート関節が 3 次元位置情報を持つので、合計 66 関節データを持つ。このキャラクターのイメージ図と関節構造を図 3 に示す。また、被験者間に体型の差異がある場合、同一の種類の手データでも個人によって意味合いが異なるものになってしまうが、すべての歩行動作データを同一のキャラクターにリターゲットすることで、それらの影響を考慮する必要がなくな

る。なお、最終的に利用するサンプル歩行動作データは、右足が接地した瞬間から、次に右足が接地するまでの 1 周期分とする。



図 1 MX-40 (Vicon 社)



図 2 光学式マーカ

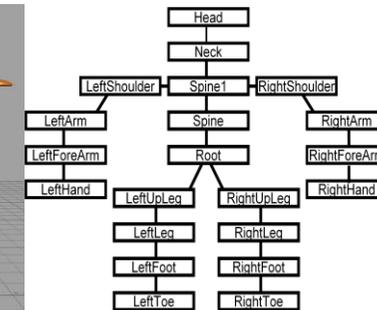
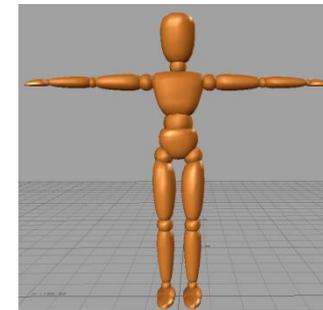


図 3 リターゲットしたキャラクターの関節構造

4.2 動作の時間的同期

3.1 節で作成した 1 周期分のサンプル歩行動作は、被験者ごとに全体の時間長や、フレームごとの動作の意味合いが異なるため、これらを一致させる必要がある。そこで、動的時間伸縮法 (Dynamic Time Warping : DTW) を用いて全ての動作におけるフレームごとの意味合いを 1 つの基準動作と一致させる。この手法は、歩行動作解析で用いられている手法である。以下に詳細を示す。

DTW とは本来、一次元波形の時間的同期を行うものであるが、データ間の非類似度などをスカラー値で表現することでモーションデータに適用することが可能である。そのために、まず 2 つのモーション間における姿勢距離を算出する。姿勢距離は、関節角度の差異を用いる場合と、関節位置の差異を用いる場合の 2 つに大別できる。ここでは関節角度に注目したため、姿勢距離は式 (1) のように定義される。

$$d(m, n) = \sum_i w_i \|M_i(m) - M'_i(n)\|^2 \quad (1)$$

基準となる動作の m フレーム目における i 番目の関節角度を $M_i(m)$ 、基準動作に同期させる動作の n フレーム目における i 番目の関節角度を $M'_i(n)$ とした。なお、 w_i は i 番目の関節の重みを表している。人間の歩行動作は周期的であり、平常時の歩行動作に関しては、腕の動きと足の動きは一定の関係を保ったまま連動していると考えられる。よって、足の運動の関係にのみ着目すれば十分であると判断し、ここでは、図3に示す関節のうちルートより下の関節部分、つまり腰より下の関節に注目するように w_i の値を決定する。次に、取得した姿勢距離を用いて m 行 n 列目の値が $d(m, n)$ となるような姿勢距離行列を作成する。この姿勢距離行列に対して、動的計画法を用いてコストが最小となる経路を探索する。対象動作のフレームごとの関節データにコスト最小経路をもとにした適切な重みづけを行い、時間伸縮することで基準動作と対象動作のタイミングを一致させることが可能となる。これを取得した全てのサンプル歩行動作に対して行うことで、全ての歩行動作を基準歩行動作のタイミングと一致させ全動作の時間長を一定にする。腰の関節のZ軸方向の角度に注目して、DTWを行った結果の一例を図4、図5に示す。なお、ここでは全時間長が39フレームの動作を基準として時間伸縮を行った。

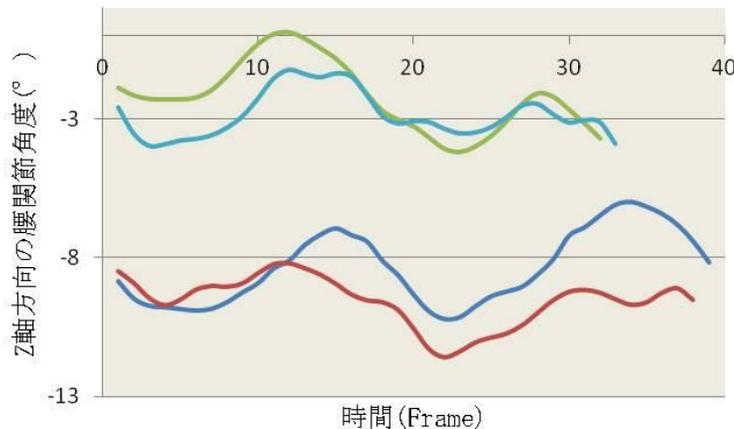


図4 腰関節Z軸オイラー角の時間変化

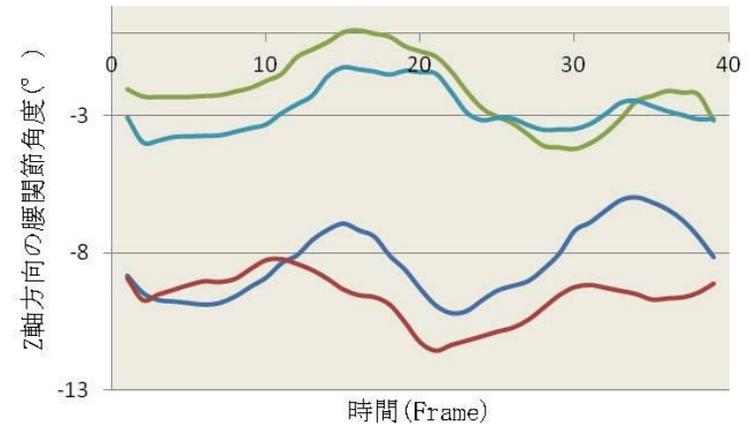


図5 時間伸縮を行った際の腰関節Z軸オイラー角の時間変化

5. 主成分分析を用いた動作の比較

4節までで用意した、時間同期のとれた1周期分のサンプル歩行動作を用いて、動作の種類ごとの差異に注目した解析を行う。主成分分析を用いることで、異なる動作を比較した際の分散の小さい要素、つまり影響の小さい成分を排除することができ、なおかつ次元の削減を行える。

まず、全てのサンプル動作を主成分分析した場合の第一、第二主成分得点の分布の様子を図6に示す。なお、主成分分析に用いたデータの次元は66(関節データ数)×39(基準フレーム数)=2574となっており、データの種類は1被験者あたり平常歩行動作と坂道歩行動作(5°, 10°, 15°, 20°)であり、6人分のデータを用いたため合計30となっている。各主成分と累積寄与率の関係については図7に示す。今回は第8主成分までを解析に用いた。図6より、主成分得点の分布がクラスタ化していることが分かるが、これらはそれぞれ被験者の違いを表すものである。最も分散の大きい第一・第二主成分空間上で、個人差によるクラスタが作成されており、動作主が異なる場合と比較すると動作の種類が異なることによる影響は非常に小さいといえる。そのため、同一空間に対象の平常時歩行動作をプロットし、坂道角度と相関の高い成分の変化を反映させることで、個人性を十分に保ったまま動作の種類を変化させることが可能であるといえる。

次に、動作の種類の違いを表す要素を抽出することを目的としているので、坂道角

度の変化と相関が大きい成分を探す。このとき、変化の過程における個人間の分散はランダムとなるため、これをモデル化することは困難である。ゆえに、ここでは被験者のそれぞれの得点を平均したものの推移と、坂道角度との相関を求めるものとする。それぞれの主成分における坂道角度との相関係数との関係を図8に示す。相関係数の絶対値が0.7以上である場合、2変数間に深い相関があると考えられているため、ここではその条件を満たす第一・第四・第五・第六・第七主成分に着目し、線形近似でフィッティングを行う。図9に相関係数が高い第一主成分得点と坂道角度の関係を、図10に相関係数が低い第八主成分得点と坂道角度の関係を、それぞれ平均値の変化と被験者ごとの変化をプロットしたものを示す。これらの図より、相関係数が高い成分は角度の変化とともに同様の変化を示し、相関係数が低い成分は角度によらずランダムに変化するといえる。また、同様のことが平均値のみでなく、被験者ごとの変化においてもいえる。以上より、平常歩行動作と目的となる角度の坂道歩行動作との注目した主成分得点の変化量から導出した差分ベクトルを適用することで、個人の動作を個人の歩行の様子を保ったまま目的の動作へと変化させることができるといえる。

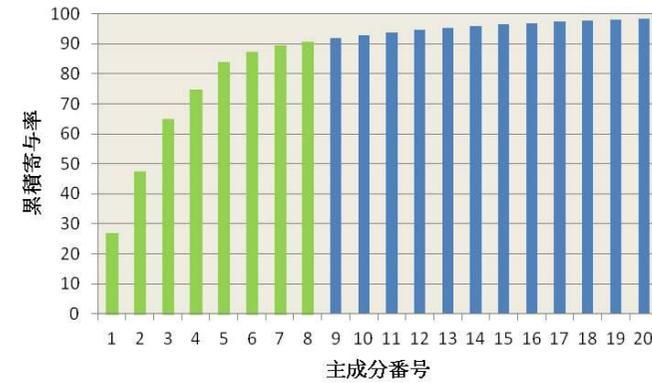


図7 主成分番号と累積寄与率の関係

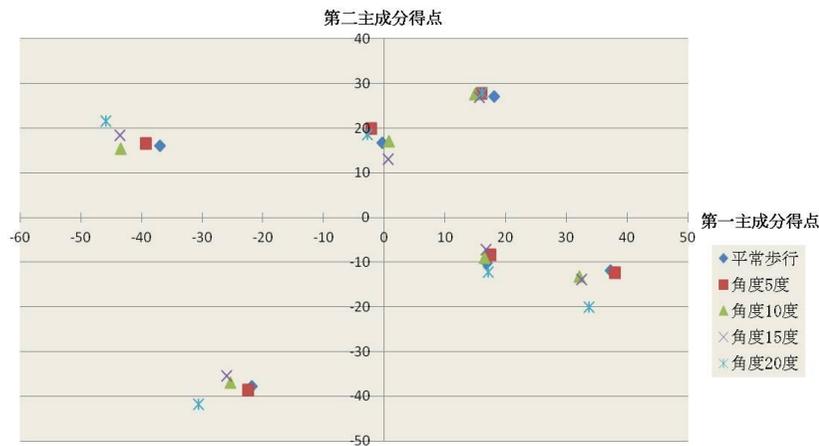


図6 歩行した坂道の角度と第一主成分得点の関係

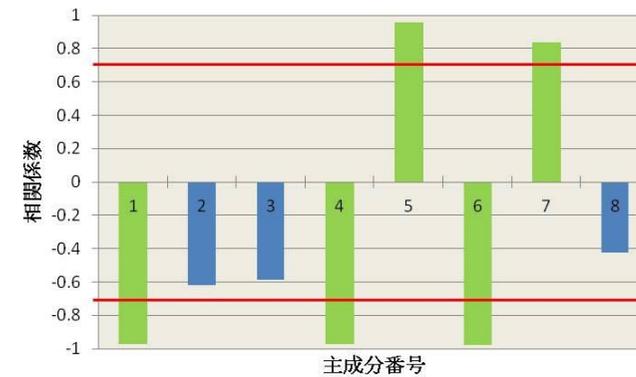


図8 それぞれの主成分における相関係数

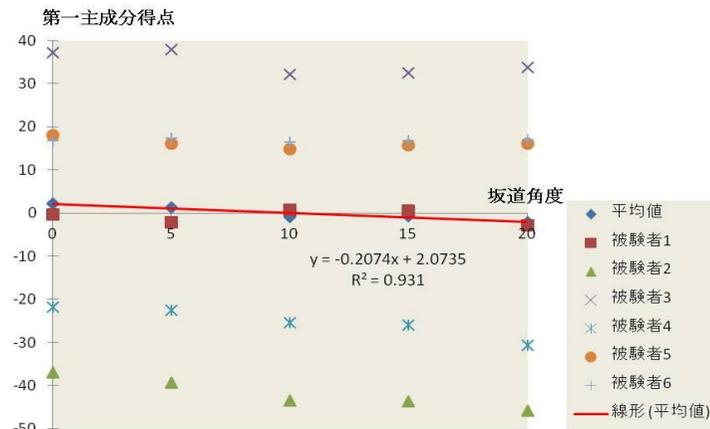


図9 第一主成分得点と坂道角度の関係

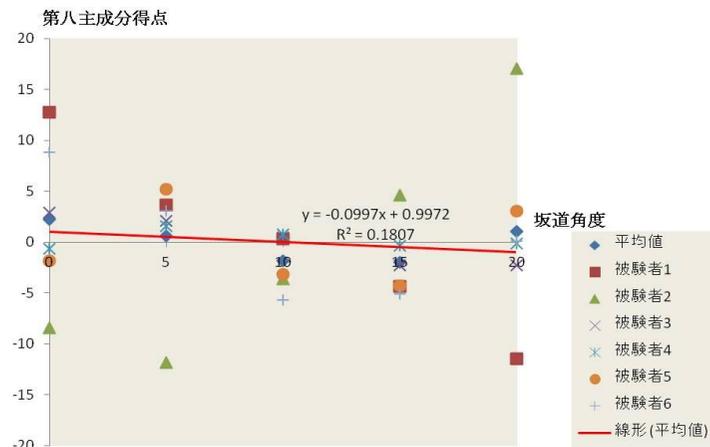


図10 第八主成分得点と坂道角度の関係

6. 平常時歩行動作を基にした異なる種類の動作合成

6.1 実際に取得した異なる種類の動作の比較

まず、実際に取得した異なる種類の動作間の差異がどのような部分に表現されているかを、実際に取得したデータ同士で比較することで確認する。図11に実際に取得した平常時歩行動作と坂道歩行動作のある同一フレーム同士の動作の差異を示す。黄色のスケルトンモデルは平常時における歩行動作の様子を示しており、水色のスケルトンモデルは左から坂道角度が5°、10°、15°、20°の場合の歩行動作の様子を示している。これらを比較すると、平常時の歩行動作と比べて、足の運びが上方に向くこと以外にも、坂道の角度が急になるほどひざの曲がりが高く、猫背になっていくであろうことが予測できる。

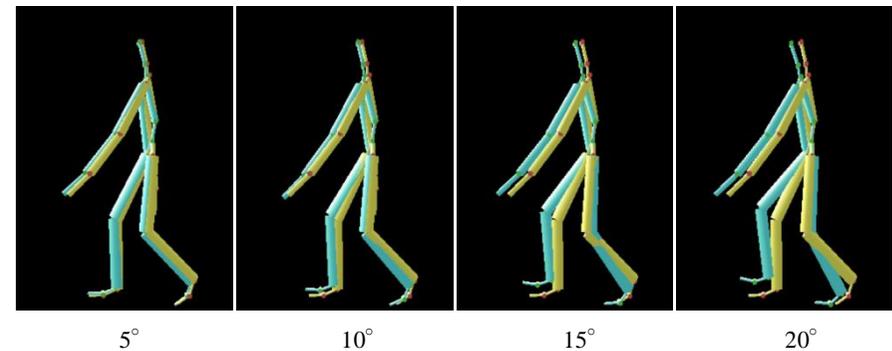


図11 平常時歩行動作(黄色)と坂道歩行動作(水色)の比較

6.2 動作合成

5節で取得した、坂道の角度変化と相関が高い主成分得点の差を実空間に逆射影した差分ベクトルをサンプル動作内の平常時歩行動作に付与した場合の動作変化を図12に示す。また、サンプル動作に含まれていない平常時歩行動作に付与した場合の動作変化を図13に示す。これらは図11と同様に、黄色のスケルトンモデルは平常時における歩行動作の様子を示しており、水色のスケルトンモデルは左から坂道角度が5°、10°、15°、20°、25°、30°の場合の歩行動作の様子を示している。なお、4節で行った主成分分析による動作解析のサンプル動作の中に坂道角度が25°、30°の場合の歩行動作は含まれていない。これは、図9に示すような相関係数の絶対値が大きい主成分得点の差を線形関数のフィッティング結果から類推して差分ベクトルを作成し、平常時歩行動作に付与したものとなっている。

これらを比較すると、坂道の角度が変化した場合の動作を推定した水色のスケルトンモデルにおいて、推定する角度が大きくなるのに従ってひざの曲がりが高く、猫背になる傾向が見て取れ、図 11 において示した平常時の歩行動作と坂道歩行動作の間の差異を表す要素が表現されていることが分かる。以上のことより、相関の大きい主成分得点の推移をフィッティングすることで各パラメータに対応した動作を推定できることが分かる。また、サンプル動作が存在しない範囲の動作、ここでは解析に用いていない 25° 以上の傾斜を持つ坂道の歩行動作についても、上述した平常時の歩行動作と坂道歩行動作の間の差異を表す要素を反映した歩行動作を推定できることが示された。

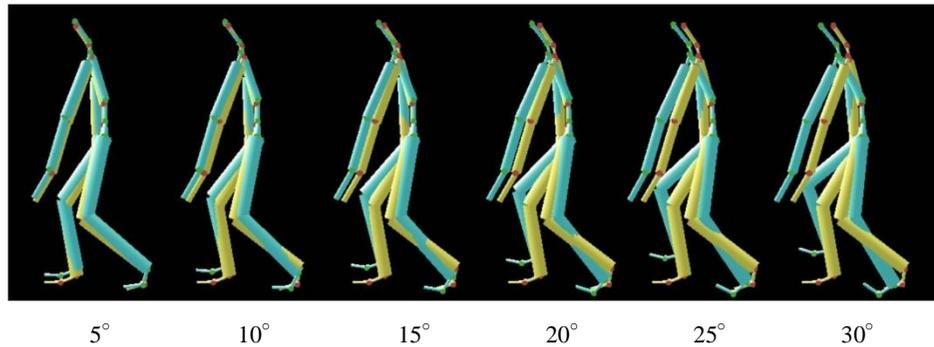


図 12 サンプル動作内の人物の平常時歩行動作(黄色)と合成された坂道歩行動作(水色)

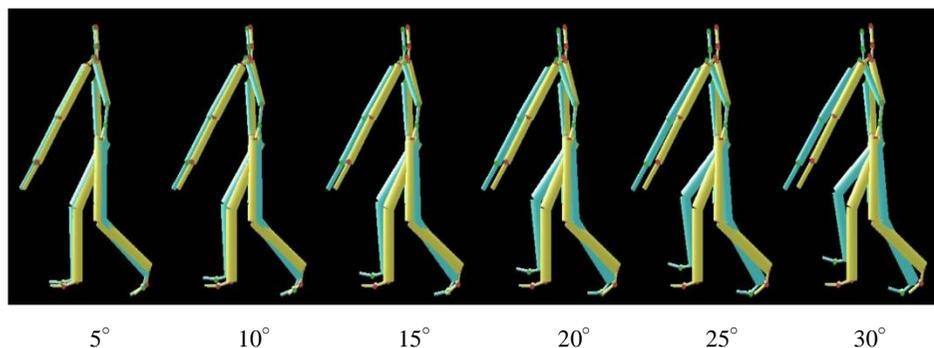


図 13 サンプル動作外の人物の平常時歩行動作(黄色)と合成された坂道歩行動作(水色)

6.3 動作の種類に合わせた時間伸縮

これまでに用いてきた動作は、4.2 節で 1 つの基準動作に合わせて時間的同期を取ったものであるため、それぞれ本来の歩行速度とは異なった動作となっている。そこで、漸次的時間変換[7]を用いて元の動作のタイミングに逆伸縮する。漸次的時間変換とは、DTW を行う際に漸次的時間変換関数を計算しておき、DTW によって伸縮された動作を元の時間長とタイミングに逆変換するものである。なお、漸次的時間変換関数とは、時間変換された動作における時刻 t から $t+1$ までの 1 フレームが元の動作の何フレーム分に相当するかを表す関数である。この処理を行うことで、合成された動作を元々本人が持っていた平常時歩行動作のタイミングに復元することができ、動作の周期性についても個人性を復元できたといえる。

しかし、平常時の歩行動作と足元の状況が変化した場合の動作では 1 周期あたりの時間が増えると考えられる。上述した漸次的時間変換では、個人の平常時における歩行動作のタイミングを復元するため、坂道歩行動作とは 1 周期あたりの時間長が異なっていると考えられる。よって、動作ごとの 1 周期にかかる時間の差異に応じて動作伸縮を行う必要がある。図 14 に坂道角度と 1 周期にかかる時間の対応関係を示す。なお、プロットした対応関係の様子より、線形関数でフィッティングした。その結果に合わせて、それぞれの動作に対応した全体フレーム長となるように時間伸縮を行うことで、個人がある角度の坂道を歩行した場合の 1 周期にかかる時間を表現できるといえる。

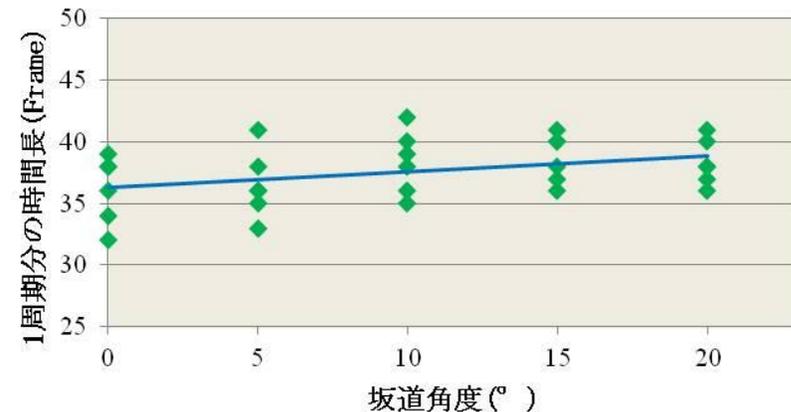


図 14 歩行した坂道の角度と 1 周期分の時間長の関係

7. 考察

動作の種類の違いと相関の高い主成分に注目し、その主成分得点の動作間における差を用いて差分ベクトルを作成して平常時歩行動作に付加することで、個人性を保ったまま動作の種類を変化させることができた。これは図 12, 図 13 に示すように、サンプル動作に含まれていない人物に対しても有効である。また、今回は坂道の角度に注目して動作を変化させたが、角度と相関が高い主成分得点を線形関数で近似することで、サンプル動作に含まれていない坂道角度における個人の歩行動作の様子を推定することが可能であることが示された。この結果から、他の種類の足元環境変化に伴う歩行動作の変化に対しても、動作変化に伴う顕著な特徴変化を抽出でき、個人性を考慮しつつ動作変化の様子を推定できると考えられる。

8. 今後の課題

本研究では、モーションキャプチャを用いて取得したデータをもとにして、平常時における歩行動作と異なる種類の動作を比較し顕著な差異を抽出したが、1 節で述べたように、ぬかるんだ地面における歩行の様子などを推定する場合はモーションキャプチャが利用できない場合も考えられる。そのような問題を解決するためにはビデオ画像から全身の関節データを取得するか、さらに解析を進め、パラメータを調整することで異なる環境における歩行動作と一致した動作を作成し、比較する必要があると考えられる。

また、動作と主成分得点の対応関係から差分ベクトルを推定し、サンプル動作に含まれない動作を合成したが、このパラメータを大きく取り過ぎた場合、動作が破綻することがあるため、拘束条件などを追加してこれを防ぐ必要がある。さらに、主成分得点の比較をする際に、平均的な傾向をつかむために平均得点の推移と坂道角度との相関が高いものに注目したが、個人ごとによる傾向の違いや、相関が低い主成分が何を意味するかということに注目して解析を行い、より本人と類似した動作を作成する手法を考える必要がある。

最後に、それぞれの歩行動作において主成分分析を行ったが、被験者の数と動作の種類数が共に少数であったため、より多くのデータを用いて解析を行い一般的に有効な手法であるか確認するとともに、動作に対する定量的・主観的な評価を行う必要があると考えられる。

9. まとめ

本研究では、異なる種類の動作を主成分空間内で比較し、相関の高い主成分におけ

る差異から動作の種類を変化させる差分ベクトルの抽出を行い、さらにその差分を平常時歩行動作に付与することで異なる種類の動作を合成した。これは、サンプル動作に含まれる人物の動作に対してだけでなく、サンプル動作に含まれない人物の動作に対しても有効であることが示された。また、相関係数の大きさに基づいて主成分を選択し、線形関数で近似を行なったため、サンプル動作に含まれない角度における個人の動作の様子を推定することができた。今後の課題としては、動作の破綻を防ぐ拘束条件を追加することや、より個人性に着目した動作合成手法を考案する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Armin Bruderlin, Lance Williams, "Motion Signal Processing", Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 97-104(1995).
- 2) T.Mukai, S.Kuriyama, "Geostatistical motion interpolation" In Proceedings of ACM SIGGRAPH2005, pp. 1062-1070(2005).
- 3) Nikolaus F.Troje, "Decomposing biological motion: A framework for analysis and synthesis of human gait patterns" Journal of Vision, 2:371-387, Full Text DOI 10.1167/2.5.2(2002).
- 4) Raquel Urtsan, Pascal Glardon, Ronan Boulic, Daniel Thalmann and Pascal Fua, "Style-Based Motion Synthesis", Volume 23, number 4, pp. 799-812(2004).
- 5) 佐藤志保理,山口明彦,竹村憲太郎,高松淳,小笠原司, "任意の動作を女性らしく変化させるスタイル変換フィルタ", ロボティクスメカトロニクス講演会 2011(ROBOMECH2011), 1A1-O11, May 26-28(2011).
- 6) L. Kovar, M. Gleicher, "Flexible Automatic Motion Blending with Registration Curves", Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, pp. 214-224(2003).
- 7) 向井智彦, 栗山繁 "時間的特徴解析に基づく運動タイミングの編集", Visual Computing/グラフィクスとCAD合同シンポジウム2007, pp.33-38(2007).