

特異値分解を用いた動作における個人間の類似と差異の抽出

三嶋 賢一[†]

金田さやか[†]

中西 弘明^{†a)}

榎木 哲夫[†]

堀口由貴男[†]

Extraction of Similarities and Differences in Human Behavior
Using Singular Value Decomposition

Kenichi MISHIMA[†], Sayaka KANATA[†], Hiroaki NAKANISHI^{†a)}, Tetsuo SAWARAGI[†],
and Yukio HORIGUCHI[†]

あらまし 個人の動作は個人間で普遍的に共通する類似成分と、性別、個性などにより変化する差異成分が積み込まれることによって形成されていると考えられる。本論文では、動作から個人間の類似と差異を特異値分解により抽出する方法を提案し、その検証結果を述べる。提案手法を歩行動作、持ち上げ動作に適用し、個人間の類似と差異を抽出できることを示す。また、抽出された差異に基づき被験者を分類できることから、個人の動作が類似と差異により構造化されていることを示す。更に、抽出された運動特徴を可視化することにより、個人間の類似と差異がどのような運動特徴をもつのか考察した結果を述べる。

キーワード 動作解析、モーションキャプチャ、個人間の類似と差異、特異値分解

1. ま え が き

近年、様々なセンサが安価に利用できるようになり、我々の日常生活においても膨大なデータが収集可能となってきた。このようなデータを用いて、人間の様々な行動に対して動的・適応的に支援を行うシステムが研究されている。人間の日常行動において、外部からの観測可能なデータにより効果的に行動支援を行うためには、人間の動作認識を行うことが必要である。Johansson は観察者に人間の主要関節を光点で表した動画を見せたときの認識について研究し、静止状態ではそれらの光点はランダムな点群にしか見えないが、運動を開始すると短い時間でそれらが人間の動作を表すことを認識可能であると報告している [1]。Cutting らはそのような点群の動画より、観察者は動作者が何をしているのかだけでなく、動作者の性別や動作者が知人かどうかまで認識できると報告している [2], [3]。また、砂の入った箱を台に運び動きを点群の動画とし

て示すと、観察者はその箱の重さをかなりの精度で見極めることができるという報告もある [4]。身体的主要部位のみの動きを示した光点群から動作を識別できるということは、動作には個人に依存しない型が広く存在していることを示している。一方、動作者の性別、個性が推定可能であるということは光点群の動き自体に個人などによる差異が含まれており、それを観察者は適切に利用して認識していることを示唆している。すなわち、個人の動作は個人間で普遍的に共通する類似成分と、性別、個性などにより変化する差異成分が積み込まれることによって形成されていると考えられる。

歩行動作から機械的に性別や年齢、個人を識別することを目的とする様々な特徴量の抽出法が提案されている [5], [6]。また、万波らは歩行動作の動画像から低周波領域のスペクトル画像を作成し、性別や年齢により変化する歩容特徴を抽出する方法を提案している [7]。これらの研究では、個人や性別の識別を目的として、歩幅や周期、あるいは低周波領域における特徴等の運動特徴に基づいた解析を行っている。しかし、これらの方法では、各部位間及び異なる時刻間の運動の関連を明らかにできない。そのため、抽出した運動特徴が全身動作にどのように影響するかは明らかでな

[†] 京都大学大学院工学研究科，京都市

Department of Mechanical Engineering and Science, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

a) E-mail: nakanishi@me.kyoto-u.ac.jp

い．このことが原因となり，抽出した特徴をもつ動作を再構成することも不可能である．一方，Troje は歩行動作を表す光点の位置データを低周波領域でのフーリエ級数によりモデル化し，主成分分析によりデータの特徴を低次元化し，性別や感情による動作の変化を抽出・再構成する研究を行っている [8], [9]．これらの研究では，歩行動作のモデルにおいて身体部位の位置データと歩行周期をパラメータとしている．このため，主成分分析により得られる主成分に物理的意味がなく，理解することができない．また，低周波領域の特徴により動作を近似するモデルであるため，動作に明示的な周期が存在する必要がある．

本研究では，個人間の類似と差異を表す運動成分を抽出することを目的とし，複数の被験者の全身動作データに関して運動特徴を特異値分解によって抽出する手法を提案する．提案手法の特徴は以下の 2 点である．

(1) 全身動作における時間及び部位間の運動の相関を抽出可能

(2) 抽出した特徴をもとに運動を再構成することが可能

更に，先行研究 [5] ~ [9] では，解析に用いる運動特徴は動作に依存して決まるため，動作に関する事前知識が必要であったのに対し，提案手法は動作についての事前知識を必要とせず，あらゆる動作に対して適用可能である．本論文では全身動作である歩行動作と持ち上げ動作の身体各部の姿勢角データを用いて，提案手法が周期動作，非周期動作ともに適用可能であることを示す．また，抽出された差異に基づき被験者を分類できることから，個人の動作が類似と差異により構造化されていることを示す．更に，抽出された類似と差異がどのような運動特徴を表すかを考察する方法を示し，歩行動作，持ち上げ動作のそれぞれの分析結果について述べる．

本論文は次のように構成されている．2. では特異値分解による個人間の類似と差異の抽出手法について説明する．3. では動作データの収集法について説明する．4. では周期動作の例として歩行動作と，非周期動作の例として持ち上げ動作に適用した結果を示す．5. では本論文の結びと今後の展望を述べる．

2. 全身運動における個人間の類似と差異の抽出手法

2.1 姿勢角の表現法

動作は下肢部や上腕部など体の要所の姿勢角の時間変化を用いて表現できる．姿勢角の表現法としてよく用いられるのものに，オイラー角を用いる方法と quaternion を用いる方法がある [10]．オイラー角と quaternion のいずれの表現法も，ある参照座標系を基準として姿勢を表す．本論文では，身体部位の姿勢角の参照座標系を図 1 のように定める．まず直立位状態のときの重心を原点とする．鉛直方向を z 軸とし，頭の方を正とする．原点を通る前額面，矢状面，水平面を考え，水平面と矢状面及び前額面との交線をそれぞれ x 軸， y 軸とし，正面方向，左方向を正とする．オイラー角では姿勢角を参照座標系からある座標系へ各座標軸回りに順次回転させる変換によって表す．本論文では，参照座標系からある座標系へのオイラー角を以下のように定める．

(1) 参照座標系の z 軸回りに ψ 回転させる．

(2) (1) の後の座標系の y 軸回りに θ 回転させる．

(3) (2) の後の座標系の x 軸回りに ϕ 回転させる．

回転角 ϕ, θ, ψ をそれぞれロール角，ピッチ角，ヨー角と呼ぶ．オイラー角による表現では三つの独立変数を用いて姿勢角を表すため，姿勢を直接的に理解しやすいという利点がある．しかし，ピッチ角 θ が $\pm 1/2\pi$ のときロール角 ϕ ，ヨー角 ψ が一意に定まらない特異姿勢が存在することが問題である．一方，quaternion

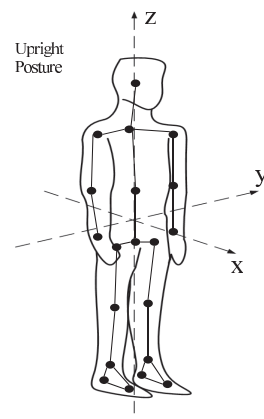


図 1 参照座標系とスケルトンモデル

Fig. 1 Definition of reference frame and human skeleton model.

による姿勢角の表現法では、参照座標系からある座標系への変換を四つの変数によってあるベクトルの回りの回転として表現する。quaternion は、ベクトル部 q_v とスカラー部 q_s からなり、回転軸の単位ベクトルを r 、その軸回りの回転を ξ とすると、quaternion の各成分は以下のように表される。

$$q = \begin{pmatrix} q_v \\ q_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \sin \frac{\xi}{2} \\ \cos \frac{\xi}{2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

quaternion q による表現では最小次元表現ではないため、次の拘束条件が存在する。

$$\|q\| = 1 \quad (2)$$

この表現法では特異姿勢が存在しないという長所がある。その一方で、拘束条件 (2) が存在するために、各成分が何を意味するかを直接的に理解することが困難であるという欠点がある。このため、quaternion を用いて表された動作を直接的に理解しやすくするための可視化法が必要である。

2.2 個人間の運動特徴抽出手法

個人 α の動作を表現するために、その体の要所に取り付け付けたセンサにより観測した姿勢角の時系列データ $x_p^\alpha \in R^N$ ($p = 1, 2, \dots, S$) からなる行列 X^α を用いる方法がある。

$$X^\alpha = (x_1^\alpha, x_2^\alpha, \dots, x_S^\alpha) \quad (3)$$

ここで、 N は観測時系列の長さ、 S は (計測する身体部位数) $\times$ (姿勢角表現における要素数) を表す。姿勢角表現における要素数は、オイラー角による姿勢角表現では 3、quaternion による姿勢角表現では 4 である。行列 X^α に特異値分解を用いることで運動表現を低次元化することができる [11]。しかし、この表現は他者との動作の比較を行うことには適していない。個人間の運動特徴を抽出するには、一個人の全身運動を一つのデータ列として表現する必要がある。そこで、行列 X^α の各列ベクトル、つまり x_p^α を縦に並べ、式 (4) に示すような一つの列ベクトル a^α により個人 α の全身運動を表現する。

$$a^\alpha = \left(\{x_1^\alpha\}^T \{x_2^\alpha\}^T \dots \{x_S^\alpha\}^T \right)^T \quad (4)$$

ある動作における個人間の類似と差異を抽出するために、 M 人の被験者の動作データから a^α ($\alpha =$

$1, 2, \dots, M$) を作成し、それらを横に並べた行列 $D (S \cdot N \times M)$ を作成する。

$$D = \begin{pmatrix} a^1 & a^2 & \dots & a^M \end{pmatrix} \quad (5)$$

この際、被験者ごとに一動作の開始から終了までの時間が異なるので、最も一動作の時間が長いデータを基準とし、二次補間などによりすべてのデータの時系列方向の長さをそろえる。一般に、動作データのサンプリング数に比べて被験者の数のの方が少ないので、 $\text{rank} D \leq M$ である。もし被験者に完全に同じ動作を行ったものが含まれている場合は $\text{rank} D < M$ となるが、実際には完全には同じ動作をしないために $\text{rank} D = M$ である。

各個人の動作 a^α には個人間で共通に現れる類似成分 a^* が含まれ、それぞれの動作データから類似成分 a^* を引いたものが個人間の差異を表す。 a^* を抽出するということは、行列 D をランクが 1 である行列 ($\lambda_1 a^* \lambda_2 a^* \dots \lambda_M a^*$) により近似することを意味する。一方、個人間の差異は a^* とは独立な成分により構成されと考えられる。そこで類似成分 a^* と個人間の差異を構成する成分を求めるために D の特異値分解を行う。 D の特異値分解を次式で表す。

$$D = U \Sigma V^T \quad (6)$$

Σ は対角行列であり、その対角要素である特異値を σ_i ($i = 1, 2, \dots, M$) とする。ここで $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \sigma_M \geq 0$ とする。また、 U の各列ベクトルは左特異ベクトル $u_i \in R^{S \cdot N}$ 、 V の各列ベクトルは右特異ベクトル $v_i \in R^M$ であり、互いに独立なベクトルである。特異値と左特異ベクトル、右特異ベクトルのそれぞれの第 i 番目の要素を第 i モードと呼ぶ。被験者 α のデータ a^α は次式のように表される。

$$a^\alpha = \sum_i^M \sigma_i v_{\alpha i} u_i \quad (7)$$

ここで $v_{\alpha i}$ は、第 i モードの右特異ベクトル v_i において被験者 α に対応する要素である。式 (7) より、被験者 α の動作データの列ベクトル a^α は各モードの左特異ベクトル u_i に特異値 σ_i をかけた重み付き線形和で求められ、各モードの寄与の大きさが $v_{\alpha i}$ で表されることが分かる。つまり、各被験者の動作は各モードの特徴の線形和で表される構造をもつといえる。特異値 σ_i は各モードで抽出される特徴の被験者に依存しない

寄与の大きさを表す．一方，左特異ベクトル u_i は各モードの運動の特徴を表している．右特異ベクトル v_i は各モードが各被験者に対してどのように寄与するかを示しており，その要素 $v_{\alpha i}$ は第 i モードが被験者 α に与える寄与の大きさを表す．

各モードとして抽出される特徴と個人間の類似と差異との対応関係について述べる．類似成分は個人間で共通する成分であり，データ行列 D に対する寄与は差異成分よりも大きいと考えられる．すなわち，動作に類似成分が存在する場合，特異値が最大である第 1 モードとして抽出される．このとき， $v_{\alpha 1}$ は全被験者においてほぼ等しい値でなければならない．これに対して，差異成分は類似成分とは独立な成分であり，データ行列 D への寄与は小さくなると考えられる．これは，差異成分は 2 次以上のモードとして抽出できることを示す．このとき， $v_{\alpha i} (i \geq 2)$ は被験者ごとに異なるはずである．

2.3 抽出された運動特徴を用いた動作の再構成

式 (7) の総和記号内の項は，動作を構成する各モードの特徴成分である．このことから，それぞれのモードの運動特徴の寄与を変化させることにより，その特徴を再現した動作を再構成することができる．第 1 モードの運動特徴を再現した再構成動作 a_{1st} は以下の式で求められる．

$$a_{1st} = \sigma_1 v_{1st} u_1 \quad (8)$$

ここで v_{1st} は右特異ベクトル v_1 の各被験者に対応する要素の平均値とする．また，第 i モードがどのように動作に寄与するか解析するために，第 i モードの寄与を正，あるいは負それぞれに強調した再構成動作 $a_{i,p}$ ， $a_{i,n}$ を以下のように作成する．

$$a_{i,p} = \sigma_1 v_{1st} u_1 + \sigma_i v_{i,p} u_i \quad (9)$$

$$a_{i,n} = \sigma_1 v_{1st} u_1 + \sigma_i v_{i,n} u_i \quad (10)$$

$$v_{i,p} > 0, v_{i,n} < 0 \quad (11)$$

姿勢角をオイラー角によって表示している場合は式 (8)，(9)，(10) により再構成動作を得ることができる．しかし，quaternion を用いている場合は，式 (8)，(9)，(10) で得られる a_{1st} ， $a_{i,p}$ ， $a_{i,n}$ において各時刻のそれぞれの部位の姿勢を表す quaternion が式 (2) の拘束条件を満足しなければならないことに注意する必要がある．このため，再構成動作を得るには各時刻のそれぞれの部位において quaternion の正規化が必要であ

る．身体部位 p における時刻 t のときの quaternion を $q_p(t)$ とすると，正規化された quaternion $\bar{q}_p(t)$ は以下の式により求められる．

$$\bar{q}_p(t) = \frac{q_p(t)}{\|q_p(t)\|} \quad (12)$$

2.4 運動特徴の可視化

抽出された運動特徴を分析するためには，それらを可視化する必要がある．本研究では

(1) 姿勢角変化チャート

(2) 人間のスケルトンモデルを用いた可視化

を用いる．姿勢角変化チャートは，各モードの運動の特徴を表す u_i を各部位ごとに分割し，それぞれの姿勢角の時間変化を濃淡の変化によって図示したものである．身体位置との対応を考慮して，図の中央には頭，腰などの体幹部分，左右には腕，脚部の姿勢変化を横に並べる．詳細な表示方法については 4. で述べる．姿勢角変化チャートは姿勢角の時間変化における部位間の同期や連鎖などの関係を可視化できることが特徴である．しかし，既に述べたように quaternion 表示ではどのような動作であるかを直接理解することは困難である．そこで，各部位の姿勢を人間のスケルトンモデルに従って再現することによりその運動を可視化する．本論文で示す結果では，図 1 に示すような身体の主要部位を示すノードと骨格に相当するリンクをスケルトンモデルに用いた．

3. 動作データの収集法

提案手法の検証のために用いる全身運動の動作データの収集を行った．本研究では，加速度，角速度，地磁気を統合することにより姿勢角を計測する慣性計測装置である Xsens 社製の MTx を用いて，被験者の全身の運動を計測した．センサは小型の直方体形状のものであり，被験者の身体各部位に取り付けることができる．図 2 に示すように，センサを頭，両肩，両上腕，両前腕，腰，両大腿部，両下退部，両足甲の計 14 箇所に取り付けた．実際にセンサを取り付けた様子を図 3 に示す．センサを身体各部位に取り付ける際，被験者ごとにセンサの取付け角度が異なる．このため，取付け角度の差による影響を除去するには，観測データを補正する必要がある．本研究では，被験者ごとに，図 1 のような直立姿勢における各センサの観測値より身体各部位におけるセンサの取付け角度を求め，その値に基づいて観測データの補正を行った．

本論文では対象とする動作を歩行動作と持ち上げ動作とし、屋外の平坦なアスファルト上で行った。歩行動作は、20 (m) の直線区間における自然歩行とし、定常状態から 1 周期を取り出して歩行データとした。持ち上げ動作は、指定の地点で 2 (kg) の重りの入った段ボール箱を持ち、座った状態から自然な速さで立ち上がって腰の高さに持ち上げるまでの動作とした。被験者は運動靴を着用し、各動作を 3 試行ずつ行った。いずれの動作に対しても被験者数 M を $M = 15$ とした。歩行動作は 20 代男性 11 名、20 代女性 2 名、30 代女性 1 名、40 代女性 1 名より、持ち上げ動作については 20 代男性 13 名、30 代女性 1 名、40 代女性 1 名より収集した。歩行動作のサンプリングレートは 100 (Hz) とし、観測時系列の長さ N の最大値は $N = 115$ であった。持ち上げ動作についてサンプリングレートは 50 (Hz) とし、観測時系列の長さ N の最大値は $N = 102$ であった。実験に際しては、事前説明を行い、収集したデータの研究目的での使用、論文での公開についての同意書を得た。

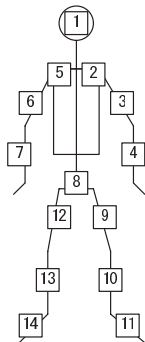


図 2 センサの取付け位置
Fig. 2 Position of sensors in experiments.



図 3 実際に被験者にセンサを取り付けた様子
Fig. 3 Sensor setting on a subject's body.

4. 提案手法の検証結果

4.1 適用のための準備

歩行動作では姿勢角をオイラー角により表す。このとき (計測する身体部位数) $\times$ (姿勢角表現における要素数) を表す S は、 $S = 14 \times 3 = 42$ となる。各被験者のデータに対して、各身体部位の時系列データを平均 0、分散 1 となるように正規化した。その後、式 (4) により全身運動の動作データの列ベクトル a^α を作成し、式 (5) により得られる D から運動特徴を抽出した。

持ち上げ動作では姿勢角の表現としてオイラー角を用いると特異姿勢が問題となることがあるため、quaternion を用いて表現した。このとき、 $S = 14 \times 4 = 56$ となる。データの正規化を行うと、各時刻の各部位の姿勢を表す quaternion のノルムが 1 となる拘束条件が満たされないため、正規化を行わずに解析を行った。

4.2 類似と差異の抽出の検証

歩行動作における各モードの特異値 σ_i を図 4 に示す。この図より第 1 モードの特異値は第 2 モード以降の特異値よりも卓越しており、第 2 モード以降では大きく変化しないことが分かる。また、歩行動作における各被験者への各モードの寄与 $v_{\alpha i}$ を表 1 に示す。この表では縦を各被験者、横を各モードとしてそれぞれに対応する値を示し、各セルにはそれぞれ対応する $v_{\alpha i}$ の大きさに応じて濃淡を付けた。ここでは値が正で絶対値が大きくなるほど黒く、反対に負で絶対値が大きくなるほど白く表示した。表 1 より第 1 モードの影響の大きさが全被験者でほぼ同じであったことが分かる。その一方で、第 2 モード以降の影響の大きさは被験者ごとに大きく異なっていたことが分かる。これらの結果から、第 1 モードは個人間で共通の要素である類似成分を表し、第 2 モード以降は個人間で異なる差異

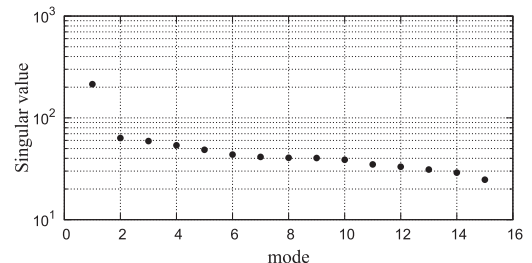


図 4 各モードの特異値の値 (歩行)
Fig. 4 Singular value of each mode (walking).

表 1 右特異ベクトル v_i の各被験者ごとの値（歩行）：第 1 モードの寄与はすべての被験者でほぼ同じであるのに対して，第 2 モードの寄与は各被験者ごとに異なる

Table 1 Value of right singular vector v_i for each subject (walking): while contributive values of 1st mode were almost same, ones of higher modes were different for different subjects.

		i th mode														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
subject	1	0.26	-0.16	0.24	-0.44	0.21	-0.30	0.30	-0.07	0.23	-0.05	0.16	-0.10	0.31	-0.04	0.49
	2	0.26	-0.19	0.09	0.11	-0.61	-0.04	-0.12	-0.10	-0.22	-0.34	-0.19	-0.47	-0.07	-0.08	0.22
	3	0.25	0.26	-0.21	-0.34	0.06	0.44	0.37	0.20	-0.32	0.11	-0.04	-0.09	-0.35	-0.27	0.14
	4	0.28	0.04	0.00	-0.32	-0.22	-0.30	0.27	-0.21	-0.11	-0.26	-0.08	0.37	0.01	-0.03	-0.59
	5	0.24	0.42	-0.36	0.28	0.13	-0.05	-0.01	-0.09	0.24	-0.42	-0.30	0.28	0.02	0.08	0.35
	6	0.24	-0.45	-0.19	0.21	0.18	-0.22	0.15	0.44	-0.39	0.02	-0.04	0.14	-0.05	0.42	0.07
	7	0.28	0.06	-0.07	-0.24	-0.21	0.37	-0.29	-0.12	0.06	-0.02	0.47	0.12	0.00	0.58	0.05
	8	0.27	0.05	0.09	0.27	-0.08	0.09	0.40	-0.31	0.24	0.51	-0.30	-0.21	0.00	0.33	-0.12
	9	0.26	0.21	0.27	-0.20	0.20	-0.35	-0.53	-0.08	-0.17	0.30	-0.26	0.04	-0.37	0.04	0.08
	10	0.25	-0.40	0.29	0.29	0.25	0.25	0.03	-0.25	0.18	-0.20	0.19	0.23	-0.46	-0.25	-0.01
	11	0.26	0.17	-0.34	0.30	0.14	-0.29	-0.04	-0.28	-0.23	0.15	0.54	-0.25	0.11	-0.25	-0.09
	12	0.24	-0.37	-0.41	-0.24	0.29	0.21	-0.32	-0.05	0.21	-0.02	-0.30	-0.25	0.23	-0.13	-0.27
	13	0.24	0.27	0.51	0.18	0.29	0.28	-0.04	0.17	-0.28	-0.23	-0.04	-0.13	0.43	0.04	-0.21
	14	0.27	0.16	0.06	0.07	-0.14	-0.17	-0.03	0.62	0.53	-0.02	0.18	-0.20	-0.19	-0.08	-0.24
	15	0.28	-0.10	0.03	0.13	-0.35	0.12	-0.16	0.15	-0.01	0.40	-0.04	0.49	0.38	-0.38	0.16

成分を表すことが分かる．

更に，抽出された類似成分と差異成分が，同一個人では試行によらず共通に現れることを示すために，個人差と試行差を含む動作データに対して特異値分解による特徴抽出を行った．具体的には，15 人の被験者において 3 試行ずつの動作データを並べた行列に対して，特異値分解を行った．その結果，各被験者の第 2 モードから第 15 モードまでは，各モードの寄与は試行によらずほぼ同じであり，得られた運動特徴は単一試行データに基づいて抽出したものとほぼ同じであった．以上より，提案手法により抽出した個人間の類似と差異は，同一個人では試行によらず共通に現れる運動特徴であることが分かる．

また，持ち上げ動作に対しても同様の解析結果が得られた．提案手法によって抽出した運動特徴に関して，第 1 モードが動作の類似成分を，高次モードが差異成分をそれぞれ表していることが以上の結果から示された．

4.3 類似と差異による動作の構造化

本節では，類似成分と差異成分により各被験者の動作が構造化できることを示す．表 1 に示した歩行動作の各被験者への各モードの寄与 $v_{\alpha i}$ に基づき，類似と差異による動作の構造化を木構造により表した結果を図 5 に示す．ここでは各モードにおいて， $v_{\alpha i}$ の値が

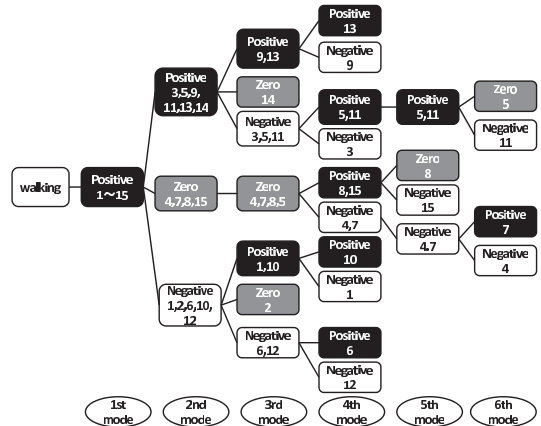


図 5 類似と差異による動作の構造化

Fig. 5 Tree structure of motion constructed by extracted similarities and differences (walking).

正で絶対値が大きいもの (positive)，負で絶対値が大きいもの (negative)，絶対値が小さいもの (zero) の 3 クラスに分類した．四角中に示した数字はそのクラスに含まれる被験者の番号である．図 5 は，第 1 モードから高次モードに推移する過程で各被験者の動作が分岐し，最終的に全被験者が各個人に固有な動作となる構造化を示している．歩行動作の場合は第 6 モードまでで，全被験者の個別の動作が表現できる構造化となることが分かる．また，持ち上げ動作においても同様に類似と差異による動作の構造化を示すことが可能であった．

4.4 類似と差異の表す運動特徴

[歩行動作]

図 6 に歩行動作における第 1 モードの姿勢角変化チャートを示す．図では，左から順に，左足甲，左下腿部，左大腿部，左前腕，左上腕，左肩，頭部，腰，右肩，右上腕，右前腕，右大腿部，右下腿部，右足甲の順に姿勢変化の様子を並べた．縦軸方向は歩行動作の一周期に対する割合を表した．運動特徴 u_i は図に付したグレースケールとの対応によって表されている．

図 6 (b) に着目すると，腕・脚部に周期運動が確認できる．その周期は歩行運動と同じであり，位相は左右で半周期ずれており，同じ側の腕と脚においても半周期ずれている．このことから第 1 モードの運動特徴は，遊脚になるときに右腕と左脚をほぼ同時に前方へ振り出し，左脚が地面に着いて支持脚となったのち，右脚と左腕を前方に振り出すという運動を表している．よって，第 1 モードは歩行動作における基本的な運動の特徴を表している．

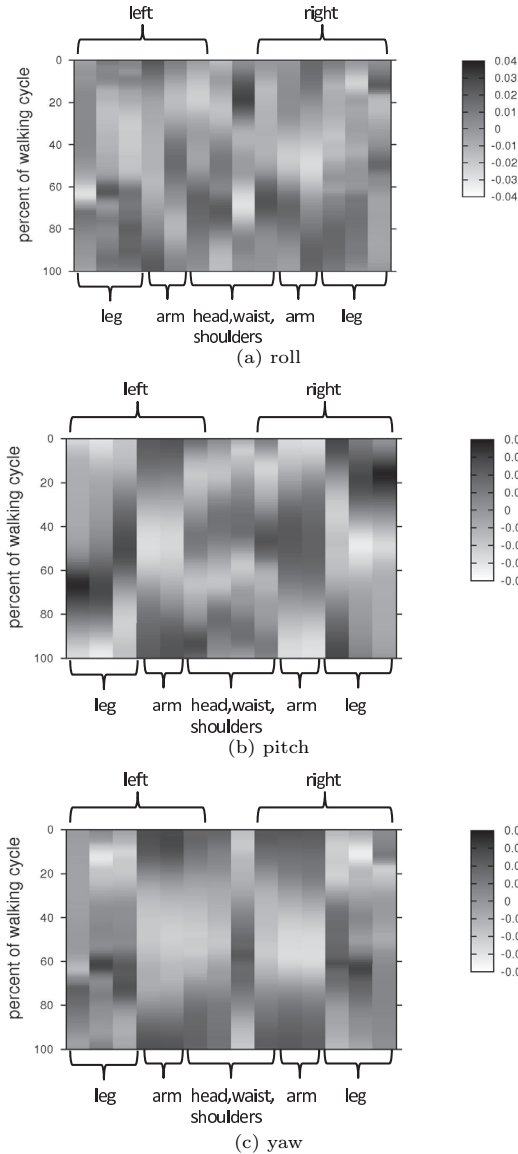


図 6 第 1 モードの運動特徴 (歩行)

Fig. 6 Characteristic motion of 1st mode (walking).

図 7 に第 2 モードの姿勢角変化チャートを示す。図 7 の (a), (c) において、左右の足甲 (図 7 (a), (c) の左右の端) で値の変化が大きくなっており、脚部にそれに伴った特徴が表れていることが分かる。このとき脚部の部位間での動作の連鎖の特徴に着目すると、第 2 モードの寄与が正であるときの運動特徴は支持脚から遊脚が変わるときにその脚部が体の外側を向き、遊脚を前方に出すときにその脚部を体の内側に向けて歩く、すなわち内旋歩行の傾向であることが分かる。

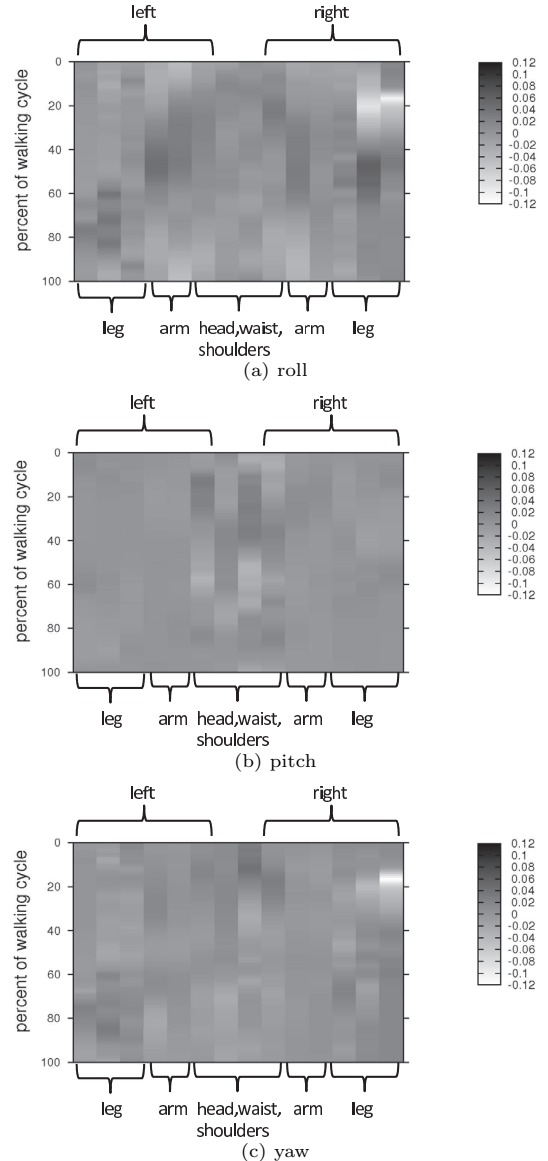


図 7 第 2 モードの運動特徴 (歩行)

Fig. 7 Characteristic motion of 2nd mode (walking).

第 2 モードの寄与が負であるときの運動特徴はその逆、すなわち外旋歩行の傾向である。

[持ち上げ動作]

持ち上げ動作では、運動特徴を 2.4 で説明した人間のスケルトンモデルによる可視化により解析した。

第 1 モードの特徴をスケルトンモデルにより可視化した結果を図 8 に示す。図では、動作中の各時刻での姿勢を左から順に時系列順に並べた。なお、持ってい

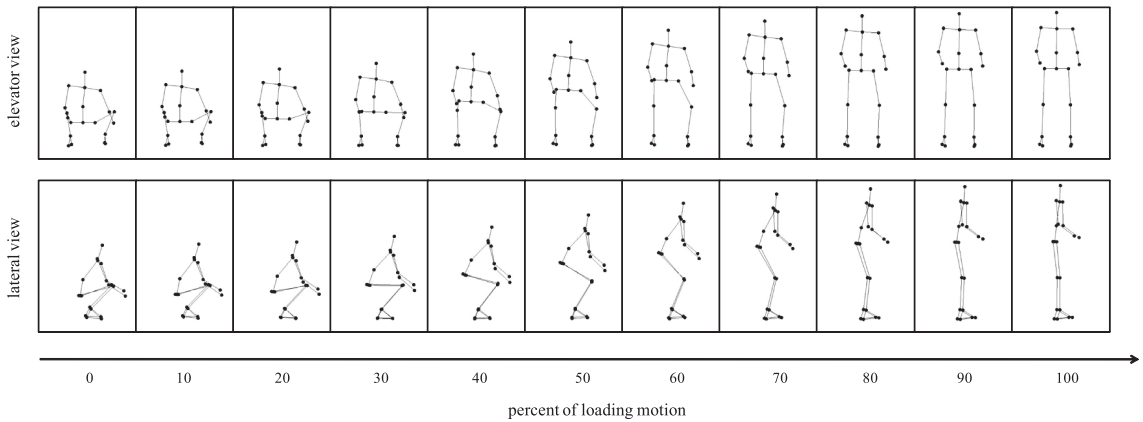


図 8 第 1 モードの運動特徴 (持ち上げ)

Fig. 8 Characteristic motion of 1st mode (loading).

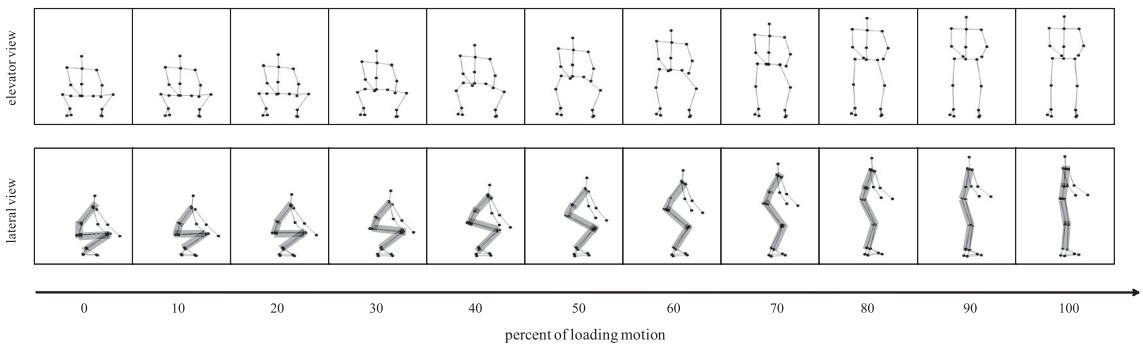


図 9 第 2 モードを正に寄与させたときの運動特徴 (持ち上げ)

Fig. 9 Characteristic motion of 2nd mode positive (loading).

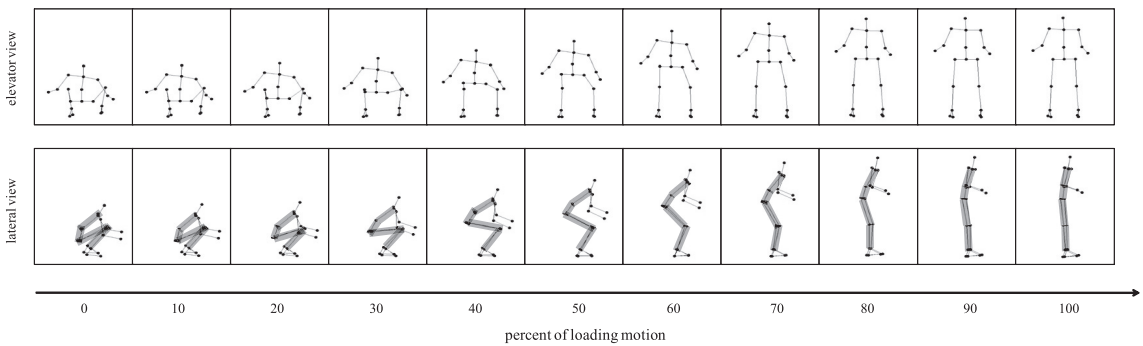


図 10 第 2 モードを負に寄与させたときの運動特徴 (持ち上げ)

Fig. 10 Characteristic motion of 2nd mode negative (loading).

る箱は表示していない．図よりはじめに座った状態から箱を持ち上げながら立ち上がる様子が再現されていることが分かる．このことから第 1 モードは持ち上げ動作の基本的な運動の特徴を表していることが分かる．

第 2 モードを正あるいは負に強調した再構成動作を

スケルトンモデルにより可視化した結果を図 9，図 10 にそれぞれ示す．図 9，図 10 に示した各動作において，最も明確な違いは肘の曲げ方である．側面から見たとき，図 9 では肘をまっすぐに伸ばして持ち上げている様子が現れるのに対し，図 10 では肘をほぼ 90°

に曲げて持ち上げている様子が確認できる。同時に、上半身の姿勢にも違いが見られる。図 9 では上半身を起こして持ち上げている様子が現れるのに対し、図 10 では上半身を低くして持ち上げている様子が確認できる。更に、胴体-大腿部-下腿部により構成されているリンクに着目する。図 9, 図 10 の側面図において、これらのリンクに淡色の太線を重畳した。時刻 0% から 70% までのどの時刻においても、リンク形状は「S 字型」であることが分かる。図 9 では時刻 80% 以降においてもリンク形状を「S 字型」に保っており、時刻 100% でほぼ直線状になっている。これに対して、図 10 では、時刻 80% においてリンク形状が「S 字型」より「くの字型」に遷移する。このとき、下腿部はほぼ直立状態になっており、胴体と大腿部において屈曲が生じている。下腿部はその後も直立状態を保ち、大腿部と胴体は時刻 80% 以後それぞれ直立状態に漸近する。このため、大腿部と胴体により形成されていた屈曲部が開いていき、時刻 100% においてほぼ直線状になる。

姿勢角変化チャートやスケルトンモデルによる運動特徴の可視化により、部位間での姿勢変化の同期や連鎖を明らかにできることを示した。また、実際に歩行動作と持ち上げ動作を撮影した動画より、第 2 モードの寄与が正の被験者と負の被験者において、それぞれの運動特徴が現れていたことを確認した。このことから、提案手法で抽出された類似と差異が実際の動作における特徴と対応していることが確認できた。

5. む す び

本論文では動作の類似成分と差異成分を特異値分解を用いて抽出する手法を提案した。加速度センサ・ジャイロ・磁気センサを統合した姿勢角計測装置により測定した歩行動作・持ち上げ動作に対して提案手法を適用した結果、個人間の類似成分を第 1 モードとして、個人間の差異成分を第 2 モード以降の高次モードとして抽出できることを確認した。抽出した運動特徴は全身動作における時間及び部位間の運動の相関を含んでいる。このため、抽出した運動特徴をもつ動作を再構成することができ、運動特徴が全身運動にどのように反映されるかを解析することが可能である。更に、提案手法は動作ごとに運動特徴を選ぶ必要がなく、あらゆる動作に対して適用可能であることを示した。このため、提案手法は幅広い分野における動作解析に応用が可能である。また、抽出された差異に基づき被験者

を分類できることから、抽出した類似と差異により個人の動作を構造化できることを示した。

各個人の運動が各モードの寄与の大きさによって分類されることから、本手法は機械による個人の識別に利用できると考えられる。また、性別や年齢を幅広く収集したデータセットを用意して提案手法を適用することにより、動作から性別や年齢の判別に利用できる可能性がある。更に、健常者の歩行と疾病者の歩行に適用し、どのような違いがあるのか明らかにすることにより、リハビリテーションや治療に役立てることなどが期待できる。

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金学術創成研究費 (19GS0208) の助成を受けたものである。

文 献

- [1] G. Johansson, "Visual perception of biological motion and a model for its analysis," *Perception and Psychophysics*, vol.14, pp.201-211, 1973.
- [2] J.E. Cutting and L.T. Kozlowski, "Recognizing friends by their walk: Gait perception without familiarity cues," *Bulletin of the Psychonomic Society*, vol.9, pp.353-356, 1977.
- [3] L.T. Kozlowski and J.E. Cutting, "Recognizing the sex of the walker from a dynamic point-light display," *Perception and Psychophysics*, vol.21, no.6, pp.575-580, 1977.
- [4] S. Runeson and G. Frykholm, "Visual perception of lifted weight," *J. Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol.7, no.4, pp.733-740, 1981.
- [5] M.S. Nixon and J.N. Carter, "Automatic recognition by gait," *Proc. IEEE*, vol.94, no.11, pp.2013-2024, 2006.
- [6] J.E. Boyd and J.J. Little, "Biometric gait recognition," *Lect. Notes Comput. Sci.*, vol.3161, pp.19-42, 2005.
- [7] 万波秀年, 横原 靖, 八木康史, "歩容における性別・年齢の分類と特徴解析," *信学論 (D)*, vol.J92-D, no.8, pp.1373-1382, Aug. 2009.
- [8] N.F. Troje, "The little difference: Fourier-based synthesis of gender-specific biological motion," in *Dynamic Perception*, ed. R. Wurtz, and M. Lappe, pp.115-120, Aka Press, Berlin, 2002.
- [9] N.F. Troje, "Retrieving information from human movement patterns," in *Understanding Events: How Humans See, Represent, and Act on Events*, ed. T.F. Shipley, and J.M. Zacks, pp.308-334, Oxford University Press, New York, 2008.
- [10] J.R. Wertz, *Spacecraft Attitude Determination and Control*, Kluwer Academic Pub., 1978.
- [11] 岡田昌史, 中村仁彦, "脳型情報処理を行う力学系の多項式設計法とそのヒューマノイドの全身運動生成への応用,"

日本ロボット学会誌, vol.22, no.8, pp.1050-1060, 2004.
(平成 22 年 4 月 28 日受付, 11 月 2 日再受付)



三嶋 賢一

2009 京都大学工学部物理工学科機械システム学コース卒。同年同大学院工学研究科機械理工学専攻修士課程に入学, 現在に至る。動作認識に関する研究に従事。



金田さやか

2006 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻修士課程了。同年旭化成エレクトロニクス(株)入社。2007 京都大学大学院工学研究科機械理工学博士課程編入。2010 同修了。2009 より日本学術振興会特別研究員。システム制御工学, 宇宙ロボットの位置同定, 自律型ロボットに関する研究などに従事。日本ロボット学会正会員。京都大学博士(工学)。



中西 弘明 (正員)

1994 京都大学大学院工学研究科航空工学専攻修士課程了。同年日本電気(株)入社。1996 京都大学大学院工学研究科助手。2006 同大学講師となり現在に至る。システム制御工学, インテリジェントシステムの学習, レスキューロボットに関する研究に従事。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本機械学会, IEEE 各会員。京都大学博士(工学)。



榎木 哲夫

1983 京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程了。1986 同大学院博士課程指導認定退学。同年京都大学工学部精密工学教室助手。1994 同大学院工学研究科精密工学専攻助教授, 2002 同教授, 2005 年改組により機械理工学専攻教授, 現在に至る。その間, 1991~1992 米国スタンフォード大学客員研究員。現在, 人間-機械共存環境下での協調システムの設計・解析と知的支援等に関する研究に従事。ヒューマンインタフェース学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会, システム制御情報学会, などの会員。京都大学工学博士。



堀口由貴男

1999 京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程了。2003 同大学院博士課程指導認定退学。同年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻助手。2005 改組により機械理工学専攻助手, 2007 同専攻助教となり, 現在に至る。その間, 2001~2003 年日本学術振興会特別研究員。人間機械系における協調のためのインタラクションデザインに関する研究に従事。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本知能情報ファジィ学会, ヒューマンインタフェース学会, IEEE 各会員。京都大学博士(工学)。