

# ロボットの身体動作表現と生成される印象との ラバン特徴量を介した定量的相関分析

中 田 亨\* 森 武 俊\* 佐 藤 知 正\*

## Quantitative Analysis of Impression of Robot Bodily Expression based on Laban Movement Theory

Toru NAKATA\*, Taketoshi MORI\* and Tomomasa SATO\*

A set of physical feature values is proposed in order to explain impression produced by bodily expression. The concept of designing the value set is based on Laban Movement Analysis which is a famous theory in body movement psychology. Impressions produced by body expression are closely related to these feature values. Each of the feature values is defined mathematically, so that it is easy to implement in a computer. Also the feature values are calculated on general body movements. Therefore, the set can be implemented in body expression systems of robots and computer graphics bodies in order to facilitate quantitative evaluation and forecast of impression produced by their bodies. This paper describes the concept and an example of implementation on a robot. Validity of the set is verified in an experiment.

**Key Words:** Bodily Expression, Quantitative Evaluation of Impression, Laban Movement Analysis, Dancing Robot

### 1. 緒 論

近年、エンタテインメントの分野では、ロボットやコンピュータグラフィックスによって構成したキャラクタの身体(以下“動作体”)の動作を用いて、人間へ表現する試みが盛んになりつつある。

動作体による表現の研究が目標とするところは、身体動作を適切に用いて人間とインタラクティブなコミュニケーションを行なう動作体システムの実現である。即ち、動作体が自己の動作が観客に与える印象を評価し、さらには自律的に自己の動作を生成し、表現すべき印象を場面に応じて適切に観客に与える技術の確立である。

動作体の動作が生成する印象は、動作の特徴を表す実体的な量(以下“物理的特徴量”)のセットによって説明され得ると考える。例えば、動作の速度が全般的に速ければ、観客はまず“機敏な動きである”などと動作の全般的な物理的状态に注目し、それに応じて“動作者は楽しいそうである”などの動作者の内面に関する印象を感じる。よって、観客がまず注目する物理的特徴量のセットを組織することが、動作体表現の印象評価技術の鍵となる。

物理的特徴量のセットに求められる要件は、印象との相関が十分高いこと、一般の動作への適応が容易であるように運動の

力学的・幾何学的特徴を網羅的にカバーすること、動作体の制御システムが動作印象の自己評価の計算できるように数理的であること、表現の科学の知見を十分取り入れてあることである。

本論文の目的は、上記の要件を十分満たす物理的特徴量のセットを提案することである。

関連する研究の主なものを上げる。

(1) 部分的な動作の物理的特徴量と、生成される印象の相関の分析に取り組む研究に、池浦ら [9] と柴田ら [12] と溝口ら [16] がある。これらの研究では、人間の近くで動く産業用ロボットの運動を、その速度分布、加速度、対人接近軌道、などに注目し、それら物理量と人間が感じる主観的印象の相関を研究している。

(2) 動物型全身ロボットにおいて、全身的な動作の物理的特徴量と生成される印象の相関の分析に取り組んでいる研究もなされてきた。井口ら [15] は自動人形を開発し、その性能評価のために、“温もり”・“やさしさ”・“目を引く”の3つの主観評価項目を取り上げている。池浦ら [10] は、人間型動作体の運動自由度の大小が観客の主観的に感じる舞踊の類似度との関係を報告している。Hattori [3] らは、文楽での人形の感情の伴った動作と感情なしの動作との物理的な比較分析を行った。Mizoguchi [5] では、動物型ロボットの対人視線一致、対人間合い距離と、人間が感じる“ロボットが人間に注目しているか?”などの主観的対ロボット印象の相関関係を報告している。

しかしこれらの研究は、動作の物理的特徴量の設定は各問題で個別的になされた。つまり、一般の身体表現に対応し、印象

原稿受付 2000 年 2 月

\* 東京大学大学院工学系研究科

\* Graduate School of Engineering, University of Tokyo

と強い相関を持つ物理特徴量を提案するには至っていない。

本論文の方針として、動作の物理特徴量として舞踊学にて実績があるラバン理論を基に物理的特徴量のセットを組織し、より一般の身体動作について、それが生成する印象を定量的に評価する方法を提案する。さらに、実験によりその有効性を示す。

## 2. 動作体の身体表現とラバン特徴量

### 2.1 研究対象の身体表現

一般に表現は多種の要素が複合しているものである。しかし、本論文は身体表現に関する要素の分析を目的としているため、実験は身体表現を以下の通りに限定したのに対して論じる。

1) 一方的表現: 観客がインタラクション無しに傍観者として動作体を見る場合に限る。身体接触や視線の一致などの、観客の傍観性を侵す表現行為は取り扱わない。

2) 基本情動に関する印象: 観客が感じ取る、動作体の基本情動(喜怒哀楽など)についての印象のみを取り扱う。これは身体動作を用いる製品分野において、実用的ニーズが大きいためである。

3) 身体表現単独: 音声表現などを併用しない。

4) 儀式化された表現の除外: “敬礼”の動作など、文化により意味が特定された身体表現は研究対象から除外する。

5) 無文脈環境下: 表現の場面に、特に文脈を用意しない。つまり動作体が踊る理由・きっかけについては、観客に示さない。また、観客が動作体の身体表現から得られる基本情動の印象のみに注目する。よって、動作体が動作を行う意味や価値について、観客が主観的に下す判定については研究対象としない。

### 2.2 心理状態と身体動作の相関の理論

一般に多自由度である身体動作を、少ない自由度の力学的・幾何的特徴を表す量の組としてまとめるという考えは、Darwin [2] に始まる。Darwin は、身体動作による表現には戦闘形態と服従形態の2つの形態による2極構造があるとした。

戦闘形態の表現とは、相手を威嚇するために、実際の格闘時の身体運動に類似する特徴をとり、相手に見せる表現である。例えば、拳を作って腕を直線的に突き上げる動作表現は、格闘時の身体運動を連想させるため、観客に怒りや決意の印象を与える。

服従形態の表現は、服従の意思を示すための身体運動である。後退など服従時に行う動作を相手に示すことでも可能である。また、戦闘形態の特徴を反転させることでも、服従の表現は可能である。例えば、拳をゆるめ腕を曲線的にゆっくりと下げる動作からは、攻撃性は感じられず、逆に安心感が演出されると考えられる。

### 2.3 ラバン特徴量とその工学的解釈

舞踊学では、前節で登場した“身体動作の力学的・幾何的特徴”をより詳細に分類する枠組みを Movement System と呼ぶ [14]。有名な Movement System は3種ある。その中で Laban System は、網羅性・明快性、そして使用する概念の数理的明確性において、最も優れている。

本論文の第1の目的は、Laban System で用いられる身体動作の力学的・幾何的特徴項目を数理的に定義し数量化することである。この量を以下“ラバン特徴量”と呼ぶ。

Table 1 Dynamical and Geometrical Features of Effort Elements

Effort	Indulging Form	Fighting Form
Weight	Light	Strong
Space	Indirect	Direct
Time	Sustained	Sudden

本節では、ラバン特徴量の一般的な説明を述べ、その工学的解釈を挙げる。より具体的な定式化は、個別の動作体に即して行う必要があるため、次節 2.4 で述べる。定式化の一般性・一意性の議論は 2.5 節で行う。

Laban は、Movement System を構築するため、項目を Darwin のシステムからさらに細分化した。これを Laban System と呼ぶ。Laban System は時代によって変化・発展している。本論文では、最新版である Bartenieff [1] を基にし、Kestenberg [4] を参考にして修正した Laban System を用いる。

そして Laban は、それぞれの項目も、身体動作の特徴は戦闘形態 (Fighting Form) と陶醉形態 (Indulging Form) の2極構造をとるとした。戦闘形態は能動的でめりはりがあり活発な身体運動である。逆に陶醉形態は酒に酔った時のごとくふらふらした力の弱い身体運動を意味する。そして、ラバン特徴量の各項目の両形態における特徴を、以下の通りに述べている。

ラバン特徴量の項目には、大別して“エフォート”(Effort) と“シェイプ”(Shape) とがある。エフォートは動作の力学的特徴、つまり動きの質を意味する。シェイプは身体の全体的な形状についての幾何的特徴を意味する。

エフォートには次の3要素がある (Table 1 参照)。

力加減エフォート (Weight Effort): 原義は、身体動作の力強さである。身体運動が力強ければ (Strong) 戦闘形態であり、逆に弱々しい場合 (Light) は陶醉形態である。力強さを物理量として解釈すれば、身体運動の実行に投入される単位時間あたりのエネルギーが該当する。この際、可動部の質量が登場するが、動作体の見かけで予想される質量 (以下“視覚的質量”) を見積もって用いる。別の解釈実現形は種々あり得る。例えば、動作中の最高速度や運動量などを力強さと見なすこともできる。別解釈の許容条件については、2.5 節で述べる。

空間エフォート (Space Effort): 原義は、身体動作の方向的偏りの度合いである。腕や視線の方向が一方方向に収束すること (Direct) が戦闘形態の特徴である。逆に各部の移動の方向や差し出しの方向が、揃っていないこと (Indirect) が陶醉形態の特徴である。解釈法として、動作体の四肢の差し出し方向と視線の向きの方角一致度を考えればよい。例えば、これらの単位方向ベクトルの内積などで数値化できる。

時間エフォート (Time Effort): 原義は、動作の変化の慌ただしさである。突発的 (Sudden) ことが戦闘形態の特徴であり、逆に継続的 (Sustain) であることが陶醉形態の特徴である。工学的解釈としては、慌ただしさをソフトエウア的負荷 (人間ならば認知的負荷) と解釈して、単位時間あたりの、運動の指令の数をもって、時間エフォートの値とすることもできる。次節でのロボット実機での定義例ではこの方式を採用している。別の解釈法として、運動の時間変化と捉える方法がある。つまり、

Table 2 Two-Dimensional Shape

Plane of Movement	Table Plane	Door Plane	Wheel Plane
Fighting Form	Enclosing	Ascending	Retreating
Indulging Form	Spreading	Descending	Advancing

単位時間あたりの、動作体の各部の速度変化（または加速度変化、運動量変化など）を、数値化して用いる方法である。

次に、身体動作の全身的な形状の特徴であるシェイプについて述べる。シェイプには3項目存在し、Table 2に概略を示す。シェイプの定義の仕方は複数通りあるが、本論文ではKestenbergに倣い、定義が明快な“2次元のシェイプ”を用いる。

2次元のシェイプは、動作体のシルエットを仮想的に水平面・正面・側面に投影した時の、シルエットの広がり・動きとして定義される。正面・側面などの置き方は、動作体の胴体（より詳しくは骨盤）の向きを用いて決める。Table 2に各面とその広がり・概念図を掲げる。

最も単純な工学的解釈の方法として、“シルエットの広がり”をシルエットの凸包の内部面積と解釈し、動きをシルエットの重心移動と解釈する方法が挙げられる。だが次節の具体例の一部では、計算簡単化のため凸包形状自体は明示的に算出せず、動作体の関節角を直接用いて、より簡素にシェイプを定義する方法例を用いている。

ドアの面シェイプ (Door Plane Shape): これは正面上のシルエットの広がりのことである。シルエットの領域（重心で代表してもよい）が上方へ偏ることが戦闘形態の特徴であり、逆の場合は陶醉形態と特徴である。

車輪の面シェイプ (Wheel Plane Shape): これは側面上のシルエットの前後への変動のことである。シルエットの領域（重心で代表してもよい）が後退することが戦闘形態の特徴であり、逆に前進することが陶醉形態の特徴である。

テーブルの面シェイプ (Table Plane Shape): これは、水平面上のシルエットの広がりのことである。特に、手を持つ動作体では、手先と視線の注目先との近接度合いが重要であるので、これらの端点が張る凸包の広がりと考えられる場合が適切であることが多いと考えられる。これらの広がり・狭いことが戦闘形態の特徴であり、逆に広い（手足がバラバラに広がる様な場合）と陶醉形態の特徴である。

なお、これら6つのラバン特徴量の要素は原則として互いに独立である。例えば、人間が重い物体を押す動作は、大きい力を出しているから力加減エフォートは攻撃形態であるが、動作の時間変化は少ないので時間エフォートは陶醉形態と言える。このように、ラバン特徴量の要素において、攻撃形態と陶

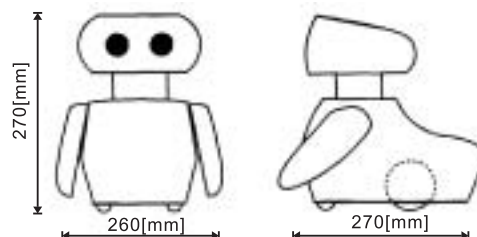


Fig. 1 Experimental Dancing Robot

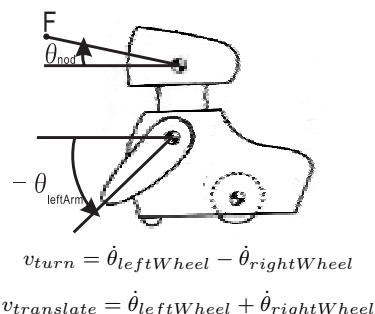


Fig. 2 Definition of Joint Angles and Velocities

酔形態が入り交じることがあり得る。

## 2.4 あるロボットでのラバン特徴量定義例

ラバン特徴量を具体的に、あるロボットの身体機構に対して定義する。

適応させるロボット（以下“舞踊ロボット”）について、Fig.1に概観、Fig.2に可動関節とその関節角の定義、Fig.5に舞踊を行っている時の写真を示す。

舞踊ロボットの可動部は、Fig.2に示した通り、両腕の振り回し回転にそれぞれ1自由度、頭部にうなずき角度の1自由度がある。さらにロボット底面にの2つの車輪によって床上移動が可能である。

次のようにエフォートおよびシェイプを定義する。なお、戦闘形態側において数値が大きくなる様に定義する。

1) 力加減エフォートは、単位時間あたりの各可動部の運動エネルギーの重み付き総和と考える。それは、関節角速度の自乗の級数として、式(1)に定式化できる。

$$WeightEffort = A(a_{la}\dot{\theta}_{leftArm}^2 + a_{ra}\dot{\theta}_{rightArm}^2 + a_{tr}v_{trans}^2 + a_{tn}v_{turn}^2 + a_{nod}v_{nod}^2)(1)$$

重み  $a$  は、各部位の視覚的質量と被注目度を定義者が勘案して、胴体の動作による項には大きく、即ち  $a_{tr} = 4, a_{tn} = 4$  とし、手や首などの軽量部分の動作の項には小さく  $a_{la} = 2, a_{ra} = 2, a_{nod} = 1$  と設定した。全体にかかる係数  $A$  は、他のラバン特徴量との数字の桁の乖離を緩和するという美観的目的のためのものであり、 $A = 0.001$  と設定した。もちろん  $A$  は後述の分析結果に対しては何ら実質的な影響を及ぼさない。

2) 空間エフォートは、両腕の仰角と頭部のうなずき角と方向の角度差の重み付きの総和と考える。これは式(2)のよう

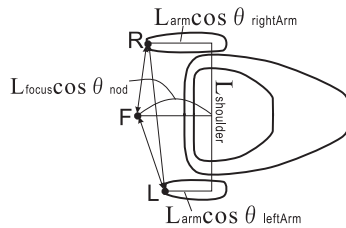


Fig. 3 Conceptual Diagram of Table-Plane

に定義できる．

$$SpaceEffort = b_{tn}|\theta_{turn}| + b_{lr}|\theta_{leftArm} - \theta_{rightArm}| \\ + b_{nl}|\theta_{leftArm} - \theta_{nod}| + b_{rn}|\theta_{rightArm} - \theta_{nod}| \quad (2)$$

重み  $b$  の設定に当たって，動作の左右対称性に強く印象づける両腕の向きの一致度の項  $b_{lr}$  とターンの項  $b_{tn}$  の重み  $-5$  にした．うなずき角度と腕の角度の一致の項  $b_{nl}, b_{rn}$  は注目度が弱いと判断し  $-1$  とした．なお正負の方向の調整のため負の係数とした．

3) 時間エフォートは，単位時間あたりの舞踊ロボットへの関節角度目標値指令の更新回数とする．この舞踊ロボットシステムでは，舞踊の編集の便宜のため舞踊指令は楽譜とのアナログで記述する [6]．即ち，1 指令を“音符”(note) と呼ぶ．また時間軸を量子化して，その単位長さ“拍”(beat) と呼ぶ．これらを用いて上記の時間エフォートを定義すると式 (3) になる．

$$TimeEffort = \frac{\text{Number of Notes in one Beat}}{\text{Time Span of one Beat}} \quad (3)$$

I) ドアの面シェイプは，式 (4) に，両腕と頭の仰角角度の正弦の重み付き総和と定義した．

$$DoorPlane = c_l \sin \theta_{leftArm} + c_r \sin \theta_{rightArm} + c_n \sin \theta_{nod} \quad (4)$$

正弦は各関節角度の上向きの度合いを表すものとして用いた．各項の重みは平等が適当と考え， $c_l = c_r = c_n = 1$  とした．

II) 車輪の面シェイプは，式 (5) に，ロボットの前進後退速度と腕の末端の前後速度の重み付き総和と定義した．

$$WheelPlane = d_t v_{translate} + d_l L_{arm} \frac{d}{dt} \cos \theta_{leftArm} \\ + d_r L_{arm} \frac{d}{dt} \cos \theta_{rightArm} \quad (5)$$

$L_{arm}$  は舞踊ロボットの腕の長さであり 10[cm] を代入する．重みは移動部分の視覚的質量から勘案して，胴部項の重み  $d_t = -6$ ，腕端部項の重み  $d_l = d_r = -1$  とした．

III) テーブルの面シェイプの定義法を Fig.3 を用いて説明する．点 L と R はそれぞれ左右の腕の端点を，水平面上に投影した点である．また，視線の注目先を定義として，ロボットの目の正面 10[cm] ( $=L_{Focus}$  とする) の点を選び，その点の水平面上への投影を F とした．テーブルの面シェイプの計算は，まず点 L, R, F の相互距離を式 (6,7,8) に従って算出する． $L_{shldr}$  は舞踊ロボットの肩幅であり 15.4[cm] を代入する．

$$T_{lr} = \sqrt{L_{shldr}^2 + (L_{Arm} \cos \theta_{lArm} - L_{Arm} \cos \theta_{rArm})^2} \quad (6)$$

$$T_{nl} = \sqrt{\left(\frac{L_{shldr}}{2}\right)^2 + (L_{Arm} \cos \theta_{lArm} - L_{Focus} \cos \theta_{nod})^2} \quad (7)$$

$$T_{nr} = \sqrt{\left(\frac{L_{shldr}}{2}\right)^2 + (L_{Arm} \cos \theta_{rArm} - L_{Focus} \cos \theta_{nod})^2} \quad (8)$$

次にこれら相互距離の総和をとり，正負の方向を合わせるためその逆数をもって，テーブルの面シェイプを式 (9) のように定義した．

$$TablePlane = E / (T_{lr} + T_{nl} + T_{nr}) \quad (9)$$

$E$  は数値の桁の調整用の係数であり，100 とした．

## 2.5 定義の主観性とその対処

上記の定義例にある通り，ラバン特徴量の数式定義において，定義者が主観的な裁量で決める項目が多く，このままでは定義者ごとに定義形態に差が出ることが予想される．その差には以下の 3 つのタイプがあると考えられる．各タイプでの差の許容範囲と対処法を合わせて述べる．

1) 動作体での定義差: 異なる機構の動作体では，異なる可動部の存在などにより，定義が異なる可能性がある．シェイプについては，動作体のシルエットの凸包を介して定義すれば，機構の差異は吸収される．エフォートも，何らかの物理量の重み付き総和として定義する方針をとれば，表面的には数式が異なることがあっても，概念的には同等の内容を意味する量を算出する式が得られる．根本的な問題として，動作体の“腕”や“正面”などの概念定義の定義者による差異の問題がある．しかし，動物類似の体形に作った動作体においては，この差異は小さいと考えられる．

2) 物理量選択での定義差: 例えば“運動エネルギー”を用いる代わりに関連性のある物理量の“運動の最高速度”という方策もある．どちらがより印象生成過程の要素として適切であるかは，印象調査実験を行わないと判断しがたい．だが実際の評価量設計では，まず定義者の経験や常識で物理量を選択することが多いだろう．それらが戦闘形態/陶醉形態の度合いに応じてほぼ単調に増減し，かつ予備の印象調査実験にて印象との相関関係が見いだせれば，定義は成功したものとみなせる．定義者の主観を排除して，用いる物理量を常に固定する方法もあるが，印象との相関が強いものや計算が平易なものを選ぶ方が実用的である．

3) 対観客効果見積もりでの定義差: 観客がよく注目する部位とそうでない部位とでは，印象生成の効果差がある．また，CG 動作体ではもともと質量が無く，寸法も実世界の長さで視覚的效果が同等とは限らない．よって，全身でラバン特徴量の総和をとる際には，対観客効果を見積もって重み付けをすることが求められるだろう．実用上は，まず部位差無しの仮定の下に定義式を作り，部位差を反映するために係数を経験的に調整することになる．係数調整の評価は，2) と同じく，印象実験を行い印象との相関の強さを調べることによる．



1 目のロボットの動きの印象は？ひとつに丸をつけてください：  
 印象：嬉しそう・びっくりしている・悲しそう・怒っている・どれでもない  
 その度合いは？：0 - 1 - 2 - 3  
 0は「どれでもない」、1は「やや」、2は「まあまあ」、3は「とても」

2 目のロボットの動きの印象は？ひとつに丸をつけてください：  
 (以下同様)...

Fig. 4 Questionary Sheet

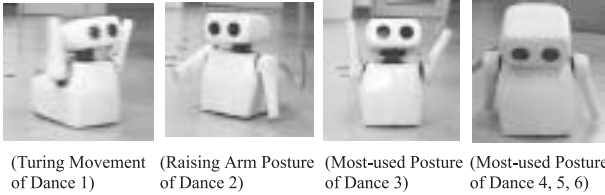


Fig. 5 Typical Postures of Experimental Dances

### 3. ロボット 舞踊の印象測定実験

#### 3.1 実験仮説

検証する仮説は、“動作体の身体運動が観客に対して基本情動の印象を与える過程の構造は、ラバン特徴量を媒介することによって、定量的に分析・記述できる”である。

#### 3.2 装置

実験に用いた動作体は、Fig.1 に示されるロボットである。このロボットの自由度配置を Fig.2 に示す。即ち、胴体下面に取り付けられた 2 つの車輪によって床上移動が可能である。また、左右両腕と頭部のうなずき角度は、ステッピングモータによって制御される。

舞踊動作のデータ記述方式と、動作制御のアルゴリズムについては Nakata [6] に記述したとおりである。

#### 3.3 実験手順

1) まず被験者に Fig.4 に示す印象回答用紙を渡し、回答方法を教示する。回答方法は、“嬉しそう”・“びっくりしている”・“悲しそう”・“怒っている”の 4 つの基本情動から択一する。適当なものがない場合は“どれでもない”を選択する。いずれかの基本情動を選択した場合、印象の強さを“やや”・“まあまあ”・“とても”の 3 段階で評価する。

2) 次に被験者の正面 1[m] 程度の床上で、ロボットを動作させ舞踊提示する。実験に用いた舞踊については、Fig.5 にそれぞれの舞踊の代表的なポーズを示した写真を示す。各舞踊の動作計画データを Fig.6 に示す。

舞踊 1: 両腕を真上に上げ、頭部うなずき角も上方に向け、床上ではその場で左右交互に回転する動作を繰り返す。

舞踊 2: 床上では右斜め前方に急速に進み、次いで急速に元の位置へ戻る移動をする。この前進にタイミングを合わせて、右腕を前方に振り上げ、頭部うなずき角もあげる。この舞踊は他の舞踊に比べ、実行時間が短い。

舞踊 3: 両腕を真上に上げ、頭部うなずき角も上方に向け、後退と停止を断続的に繰り返す。

舞踊 4: 両腕を後方斜め後に引き、うなずき角を下げ、等速度で連続的に後退する。

舞踊 5: 舞踊 4 と同じ姿勢で断続的に後退・停止を繰り返す。

Table 4 Kendall's Correlation Coefficient between Laban's Movement Feature Values and Produced Impression

	Effort			Shape		
	Weight	Space	Time	Door	Wheel	Table
Joy	0.93* Strong	-0.56	0.18	0.67	-0.07	0.67
Sur-pri-ed	0.69* Strong	-0.15	0.09	0.89* Ascend-ing	0.14	0.89* Enclos-ing
Sad	-0.75* Weak	0.33	-0.67	-0.61	0.15	-0.61
An-gry	-0.15	-0.42	0.67	-0.17	-0.75* Advanc-ing	-0.17

(\*:  $p < 0.05$ )

舞踊 6: 舞踊 4 と同じ姿勢で断続的に前進・停止を繰り返す。各舞踊に関して、2 章で掲げた式を用いて計算したエフォート・シェイプの数値を Table 3 に示す。

なお、舞踊 1 の力加減エフォートの値が他に比べ突出しているが、これは舞踊 1 ではロボットは胴体ごと常時大きく旋回しているためである。

#### 3.4 結果

被験者数は工学系大学生 21 人 (男性 17 人、女性 4 人) であった。

回答結果を Table 3 に示す。この表では、2 つの集計法で結果を表示している。ひとつは、印象の強さ“やや”・“まあまあ”・“とても”をそれぞれ 1, 2, 3 に割り当て、全被験者での合計を算出したデータである。この方法は情動の種類だけでなく、表現の強さがわかり有益である。しかし、厳密には強さの数値は間隔尺度として成り立つ保証がない。よって、強さのデータを無視し、各情動の種類に回答した人数のみの計をとったデータを主として解析に用いる。このデータを Table 3 の右方に示す。

実験結果の分析の目的は、Table 3 に示される、人間への刺激としてのラバン特徴量と、人間からの応答としての印象評定との因果関係を明らかにすることである。これらのデータの数値は、値の大小順序には意味がある順序尺度であるが、間隔尺度としての性質を備えている保証はない。よって相関分析には Kendall の順位相関係数の算出し、その有意性を検定する [7]。

相関分析結果を Table 4 に示す。個々のラバン特徴量と個々の印象に於いて有意な相関関係が得られた対は 6 対である。それらの関係を文章に書き下すと以下の通りになる。

相関関係 1: 力強い (力加減エフォートが“力強い”) 特徴を持つ) 身体運動は、喜びの印象を与える傾向がある。

相関関係 2: 力強く、かつ両腕や視線が上方に向かい (ドアの面が上昇)、かつ腕や視線の方向が揃った (テーブルの面が収縮) 身体運動は、驚きの印象をいを与える傾向がある。

相関関係 3: 弱々しい (力加減エフォートが“弱い”) 身体運動は、悲しみの印象を与える傾向がある。

相関関係 4: 前進する (車輪の面が“前進”) 身体運動は、怒りの印象を与える傾向がある。

しかしこのような単純な相関分析では、有意な相関関係にあ

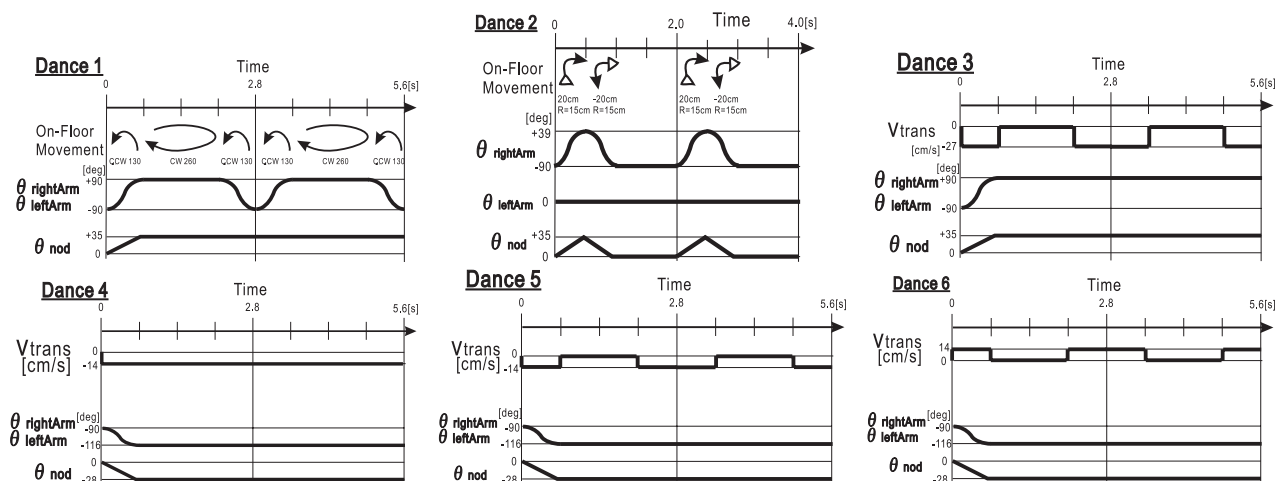


Fig. 6 Movement Data of Experimental Dances

Table 3 Experimental Result

Relationship between Laban's Movemental Feature Values and Produced Impression

Dance	Effort			Shape			Impression (Score Total)				Impression (Number of Persons)				
	Weight	Space	Time	Door	Wheel	Table	Joy	Surprised	Sad	Angry	Joy	Surprised	Sad	Angry	No Impression
1	3227	-7060	18.6	20.6	0	0.376	49	6	0	2	17	3	0	1	0
2	451	-3628	40.0	-11.6	34	0.364	1	2	0	10	1	1	0	7	12
3	427	-1060	18.6	20.6	456	0.376	0	30	0	0	0	15	0	0	6
4	201	-1583	7.1	-18.2	465	0.320	0	0	39	0	0	0	20	0	1
5	101	-1583	18.6	-18.2	237	0.320	0	0	29	1	0	0	17	1	3
6	101	-1583	18.6	-18.2	-219	0.320	0	0	21	9	0	0	12	8	1

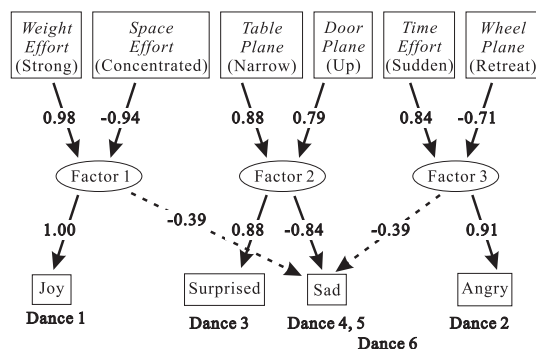


Fig. 7 Path Diagram depicting Factor Analysis Result

る対は数が少なく、これらだけでは、複数のラバン特徴量が組み合わさり関与する印象生成の構造が見て取れない。

複数要素間の因果関係进行分析する手法としては因子分析が優れている。よって本論文では、以下に因子分析を用いて、ラバン特徴量と印象の因果関係の定量的な分析と記述、すなわち印象生成過程のモデル作りを行い、実験仮説の検証に用いる。

因子数を決定する予備計算（探索的因子分析）では、固有値が 1 より大きい因子は 3 個存在した。因子の有効性を判断する慣例的な基準として、固有値が 1 より大きいことがある。よって本計算（確認的因子分析）では因子数 3 個のモデルにて分析した。共通性の推定は SMC 法を用い、因子の直交化にはバリマックス回転を用いた。3 因子の寄与率の合計は 93% であった。確認的因子分析の結果の数値データを Table 5 に示す。

Table 5 Factor Analysis Result on Experimental Result

Factor		F1	F2	F3
Factor Contribution		0.33	0.33	0.27
Factor Loading for Inputs	Effort	Weight	0.98	0.20
		Space	-0.94	-0.10
		Time	-0.02	0.37
	Shape	Door	0.52	0.79
		Wheel	-0.38	0.27
		Table	0.44	0.88
Factor Loading for Outputs	Joy	Score	1.00	0.10
		# of Prsn	1.00	0.11
	Surprised	Score	-0.14	0.88
		# of Prsn	-0.14	0.88
	Sad	Score	-0.39	-0.83
		# of Prsn	-0.39	-0.84
	Angry	Score	-0.06	-0.12
		# of Prsn	-0.12	-0.20
Factor Score	Dance 1	2.33	0.44	0.15
	Dance 2	-0.26	0.37	1.49
	Dance 3	-0.63	1.82	-0.69
	Dance 4	-0.41	-1.08	-1.52
	Dance 5	-0.62	-0.66	-0.44
	Dance 6	-0.18	-0.88	0.83

また、分析結果が意味する因果関係構造を示すパス図を Fig. 7 に示す。図中の矢印は因果関係を示し、矢印上の数字は因子負荷量である。因子負荷量の絶対値が 0.7 以上であるものを強い因果関係として実線の矢印で示した。また参考としてであるが、“悲しみ”印象の強さが、3 つの因子から、それぞれある程度影響を受けていたので、因子負荷量が -0.39 の弱い関係も破線

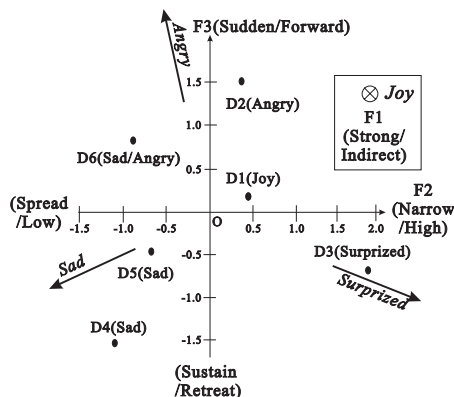


Fig. 8 Spatial Representation of Similarity of the Impressions

の矢印で示した。

このパス図は、実験身体動作のラバン特徴量から印象評定の人数分布への写像の構造を示している。図の読み方の例を挙げる。両腕やうなずき角が上方に向かう身体動作は、ドアの面特徴量は2章の定義では正に大きく算出される。(上方(Up)が数値の正の向きであるので、図中に(Up)と示した。)この数値は第2因子と負荷量0.79で相関しているの、第2因子も増加させられる影響を受ける。因子から印象の回答人数データへの因果関係も同様に矢印と負荷量で示されている。

次に、各舞踊の印象空間での類似性を、因子得点データを用いて図示する。今回、因子得点は3次元のデータになった。第1因子については、舞踊1だけが突出している。そこで第1因子を省略して、2次元データとしてFig.8にプロットする。ここでは、第2因子に関する得点をx座標に、第3因子の得点をy座標としてプロットした。また同図中に、各情動への因子負荷量を方向ベクトルの成分として、印象の方向を示した。なお、第1因子の軸は紙面に対して垂直であり、“嬉しそう”印象の方向は紙面に対してほぼ垂直である。

### 3.5 考察

ラバン特徴量と基本情動印象の強さの関係について、本実験結果では、有意な順位相関を持つ関係が見い出された。これらの相関関係は常識に反するものではないが、不完全さがある。例えば、相関関係1は“身体運動は力強いと喜んでいるように見える”ということの意味する。確かに、喜んでいる時は身体運動は快活になる傾向がある。しかし、テーブルの面などの他の要素も、喜びの印象の決定に関わるべきである。実際実験結果では、テーブルの面と喜び印象との相関係数は0.67であり比較的高いが、統計上有意とは判定されなかった。また実験結果の普遍性については、相関関係2で“驚いている時はキョロキョロしない”ということの意味しているが、これは常識に照らして普遍的な事実であるとは言いがたく、むしろ実験舞踊の組み合わせから生じた見かけ上の相関関係と見なす方が安全である。これらの問題は、本実験では舞踊の数が6つと少ないから生じていると考えられる。従って、他の多様な舞踊に対しても追加実験を行うことで、相関分析結果の不完全さを是正することが出来るだろう。

また因子分析による印象生成過程のモデル化においても、因

子負荷量の大きさかつ直交性が高い因果関係によって組み立てられたモデルを得ることに成功した。このことは、身体運動の印象生成過程を記述することに対してラバン特徴量が有用性を持つことを意味し、実験の仮説を支持するものである。

この結果は、動作体の身体運動のラバン特徴量が定まれば、身体運動の印象もほぼ定まることを意味する。よって、動作体表現の印象を制御するという問題に対して、目標の印象に対応するラバン特徴量を実現するように動作を制御するという方法が提案できることがわかった。

しかし、今回得られたラバン特徴量と情動印象の関係が一般的な法則であるかは、保証できない。なぜなら、実験に付した舞踊が6パターンと少なく、また動作体も1体のロボットを用いただけである。法則の有意性を調べるためには、さらなる実験が必要である。

## 4. 結 論

ロボットなどの動作体の身体運動が観客に与える印象の生成過程を分析するために身体運動の特徴を定量的に表すラバン特徴量セットが応用可能であることを示し、具体的なラバン特徴量の計算法の設計指針と、計算例を挙げた。さらに有効性を検証するため、ロボットのダンスが観客に与える基本感情(喜怒哀楽)に関する印象の計測実験を行い、ラバン特徴量と観客が得た情動印象が、有意にかつ直交性高く相関することを示した。

これらの結果は、ラバン特徴量セットによって、身体動作の印象の生成過程を数理的に記述できることを示している。

ただし、以下の課題が残った。

- 1) ラバン特徴量から印象を予測する精度は、まだ改善の余地がある。特に、緒論で言及した“部分的な動作の物理的特徴量”の研究などを参考として、ラバン特徴量の定義を改良することが出来るだろう。
- 2) 本実験で用いた動作体の体型は、頭が1つ、腕が2本で左右対称という、哺乳類類似体型であった。しかし、特殊で異常な体型に対してラバン理論がどの程度成立できるか不明である。裏を返せば、不気味さ・異様さの知覚についても理論があるはずである。これが明らかになれば、ラバン理論と補完しあって、動作の知覚・解釈の過程を説明付けるだろう。
- 3) 本論文では、身体動作以外の要素を併用する表現までは至らなかった。しかし、身体動作以外の表現要素についても、表現形態とその印象とを結びつける法則で既知のものが数多くあるので[8]、それらとの併用についても研究することが可能である。対人行動物が複数の表現要素を協調的用いることにより、より人間に深く心理的な作用を与えることができるだろう。

将来の展開については次のような展望を持っている。本論文で得られた知見を高精度化し応用すれば、動作体の任意の身体動作について、それが与える基本情動の印象を事前に予測・評価することができる。これは、動作体が自律的に身体動作を生成し人間に対し情動を表現することの可能性を強く示唆するものである。

また、人間動作を解析して、その人の心理状態を機械が分析することも考えられる。これは対人コミュニケーションの入力手段として重要になるう。

さらに動作体の情動システムが動物らしい適切なものになれば、感情面での対人コミュニケーションは完成を見る。しかし、この問題には文脈に応じて情動を適切に変化させる技術も必要であり、筆者らはこれに目下取り組んでいる [13]。

#### 謝 辞

この論文の理論を構成するために非常に重要な舞踊学の知識を提供してくださった、ラバノーション研究会 (<http://www.mars.dti.ne.jp/~monako/laban/>) の皆様に深く感謝致します。

#### 参 考 文 献

- [1] I. Bartenieff, D. Lewis: Body Movement – Coping with the environment, Gordon and Breach Publishers, 1980.
- [2] C. Darwin: On the Expression of the Emotions in Man and Animals, John Murray, 1872.
- [3] M. Hattori, et al.: "An analysis of the Bunraku puppet's motions based on the phase correspondence of the puppet's motion axis", Proceedings of IEEE SMC '99, pp.1041-1046, 1999.
- [4] J. Kestenberg Amighi, et al.: The Meaning of Movement, Gordon and Breach Publishers, 1999.
- [5] H. Mizoguchi, et al.: "Realization of Expressive Mobile Robot," Proceedings of IEEE Robotics and Automations '97, pp.581-586, 1997.
- [6] T. Nakata, T. Sato, H. Mizoguchi, T. Mori: "Synthesis of Robot-Human Expressive Behavior for Human-Robot Symbiosis," Proceedings of IROS '96, pp.1608-1613, 1996.
- [7] C. Robson: Experiment, Design, and Statistics in Psychology, Penguin Books, 1973.
- [8] M.D. Hauser: The Evolution of Communication, MIT Press, 1996.
- [9] 池浦, 大塚, 猪岡: "皮膚電気反射に基づくロボット運動の心理的評価に関する考察" 日本人間工学会誌, vol.31, no.5, pp.355-358, 1995.
- [10] 池浦, 中里, 猪岡: "人間の舞踊動作に基づくダンシングロボットの動作計画", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.6, pp.927-933, 1997.
- [11] 遠藤俊彦: 喜怒哀楽の起源, 岩波書店, 1996.
- [12] 柴田, 猪岡: "評定尺度法によるロボット運動の心理的評価", 日本人間工学会誌, vol.31, no.2, pp.151-159, 1995.
- [13] 中田, 高, 森, 佐藤: "人とロボットの交流における行動エントロピーと心理要素", 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol.3, pp.1117-1118, 1999.
- [14] 舞踊教育研究会編: 舞踊学講義, 大修館書店, 1991.
- [15] 松浦, 藤城, 山本, 井口: "ダンスロボットの開発とその主観的評価", 日本ロボット学会誌, vol.9, no.2, pp.177-183, 1991.
- [16] 溝口, 名須川, 森, 佐藤: "人間共棲ロボットにおける行動を介した安心感の創出", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス'97 講演会予稿集, pp.561-562, 1997.

テムとそのためのアーキテクチャに関心がある。博士 (工学)。 (日本ロボット学会正会員)

#### 佐藤 知正 (Tomomasa SATO)

1948 年 9 月 22 日生。1972 年 3 月東京大学工学部卒業。1976 年 3 月同大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年電子技術総合研究所入所。超音波 3 次元水中撮像, 知的遠隔作業ロボット, 知能化ハンドアイシステムの研究に従事。1991 年東京大学先端科学技術研究センターに移籍。現在同大学工学系研究科。微細作業ロボット及び人間支援ロボットの研究に従事。工学博士。 (日本ロボット学会正会員)

#### 中田 亨 (Toru NAKATA)

1972 年 12 月 9 日生。1995 年東京大学工学部卒業。1996 年～1997 年, カリフォルニア大学サンタ・バーバラ校大学院に留学。1997 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。人間とのインタラクションを重視したペットロボットの研究に関心がある。現在同大学大学院博士課程在籍。日本機械学会, 日本動物行動学会, ヒトと動物の関係学会, 日本認知科学会の会員。 (日本ロボット学会学生会員)

#### 森 武俊 (Taketoshi MORI)

1967 年 9 月 8 日生。1990 年 3 月東京大学工学部卒業。1995 年 3 月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年同大学先端科学技術研究センター助手。1998 年 4 月同大学講師。ロボットビジョンシス