舞踊運動モデルにおける自由度と感性評価との関係*

中里 央**, 池浦良淳***, 猪岡 光**

Traditional automata perform only one pattern of motions because they are controlled by mechanical components like cams and gears. We have developed computer controlled automata which can perform various motions by changing computer programs. We try to use a human dancing motion for motion planning of the automata. But the automata has a limited degrees-of-freedom, while human dancing motions have many ones. Thus, it is difficult for us to express a human dancing motions under a limited degree-of-freedom. We propose a method to select important joints of the human dancing motion model, and to reduce degree-of-freedom by restricting unimportant ones. In this method, we evaluate the error (C_g) of centroid of each body part to decide the importance of joint. We also evaluate the generated motion by subjective evaluation. As the result, it is shown that the index C_g is useful for selecting the important joints of the human dancing motion.

古くからある自動人形は、カムやギヤなどのみで構成されていたため、ひとつの動作しかできなかった。そこで我々は、プログラムを変えることによってさまざまな動作ができるコンピュータ制御の自動人形を開発している。このような人形の動作計画は人間の感性に基づいているため、人間が動作教示することが望ましい。そのような理由から人間の踊りの動作を元に教示を行おうとしているが、ハードウェアの設計上、人間と同じだけの自由度を人形にもたせることは難しいため、人間の踊りのデータをそのまま人形に再現させることができない。そこで本研究では、踊りの動作にとって重要な関節を選び出し、不要な関節を拘束する方法を提案する。この方法において、人体モデルにおける各リンクの図心位置の変動量 (C_g) を用いて、人間の動作から得られた動作モデルの各関節に対し、その重要度を評価した。また、この方法で作成した動作モデルに対して主観評価を行い、この方法の有効性について検討した。その結果、指標 C_g を用いることで、その踊りにとって重要な関節を的確に選出することが示された。

(キーワード：アミューズメントロボット、運動モデル、教示、主観評価)

1. 緒 言

古くから自動人形 (Automata) はその巧みな動作で我々を楽しませてきた。しかしながらそれらの人形はカムやギヤなどの機構のみで構成されているため、ひ

とつの動作しか実行できなかった。現在では、コンピュータで制御されたロボットがその代わりとしてさまざまな動作を行い、我々を楽しませてくれている。特に人間とほぼ同じ大きさをした人間型ロボットなどは、多いもので 30 以上の関節をもっており、人間の動作をもとに動作計画を行うことで、人間が行う細やかな動作やそれに含まれる感性までも表現しようとしている。そのような例として藤原ら¹⁾が行った 26 個の関節をもつ阿波踊りロボットの開発があげられる。

このような人間を模したロボットを開発するうえで重要な点のひとつに、人間がもつおよそ 100 の自由度

* 1995 年 8 月 28 日受付

** 東北大学 情報科学研究科
Dept. of Information Sciences Tohoku Univ.

*** 三重大学 工学部機械工学科
Dept. of Mechanical Engineering Mie Univ.

の中からどの箇所をいくつ選んでロボットに組み込むかという問題がある。なぜならば、ロボットに人間と全く同じだけの自由度をもたせることは設計上難しいことであるし、また、踊りに必要のない関節をロボットに付けることは、設計やコストの面から考えて無駄となるからである。たとえば藤原らの場合は、阿波踊りの名人の動作を数値化し、それを丹念に分析したうえで、阿波踊りでは指の表現が重要であるというような経験則も用いるなど、この作業に多くの時間と労力を費やしている。

そこで本研究では、踊りの動作にとって重要な関節を選ぶための指標を導入し、その踊りを踊らせるために最小限必要な関節の場所と数を求める手法を提案する。ここでは、はじめに人間の舞踊動作から 29 自由度

のモデルを作成し、次にこのモデルの関節を拘束することによって自由度を減少させ、主観評価によって提案した方法の有効性について検討する。

2. 舞踊運動モデルの作成

舞踊ロボットに動作計画を行うためのモデルを作成するに当たって、人間の踊りを撮影した映像から図 1 に示す体の各点の 3 次元位置を計測する¹⁾。このデータから、解剖学的肢位の状態での関節角度を 0°として、表 1 に示す 29 個の関節について角度を計算する。この計算の際に用いた肩や腰などのリンク構成を図 2

表 1 計算可能な自由度

Tab. 1 Calculable DOF of this method.

番号	自由度	番号	自由度	番号	自由度
1	頭部・前後	11	左腕・前後	21	右脚・回転
2	頭部・左右	12	左腕・左右	22	左足首
3	頭部・回転	13	左腕・回転	23	左膝
4	右手首	14	腰・前後	24	左脚・前後
5	右肘	15	腰・左右	25	左脚・左右
6	右腕・前後	16	腰・回転	26	左脚・回転
7	右腕・左右	17	右足首	27	体・前後
8	右腕・回転	18	右膝	28	体・左右
9	左手首	19	右脚・前後	29	体・回転
10	左肘	20	右脚・左右

図 1 体の計測点

Fig. 1 Measured point of the human body.

図 2 リンクの構成

Fig. 2 Configuration of joints.

に示す。図中の関節部の印が同じ関節は同じリンク構造をもつ。また、凡例の(a)はひねりの動作、(b)は紙面に平行な平面内での回転動作、(c)は紙面に垂直な平面内での回転動作を表している。これらのリンクの構成については、双腕マニピュレータ³⁾や歩行ロボット⁴⁾などを参考にしている。

3. 関節の重要度を決定する指標

前節において作成されたモデルは29自由度をもっているが、実際の自動人形のもつ自由度はそれほど多くない。そこでその踊りにとって不必要な関節をその関節角度の平均値の位置に拘束して、自由度の少ないモデルを新たに作成する。

図3に、左肘の関節(10番目の関節)と、右足の前後方向の関節(19番目の関節)をそれぞれ拘束した様子を示す。関節を、その関節角度の平均値 $\bar{\theta}^l$ に拘束することにより、モデルが実線で示す状態から破線で示す状態に変化する。

この図から、拘束する関節の場所によって、拘束後のモデルの状態に差があることが分かる。したがって、拘束後の動作に大きな影響を与える関節とあまり影響を与えない関節が存在すると考えられる。そこで、各関節がその踊りにとってどれだけ重要であるかを定めるために、以下に示す3種類の指標を定義する。

まずひとつ目として、角度増分の平均(A_d)を定義する。これは、各サンプルごとの関節角度から角度増分の絶対値を求め、それを平均したものである。この指標は、その踊りを通して関節がどのぐらい大きく動いているかを表す指標になると考えられる。 l 番目の関節における A_d の値(A_d^l)は式(1)で与えられる。

$$A_d^l = \frac{1}{T(n-1)} \sum_{k=2}^n |\theta_k^l - \theta_{k-1}^l| \quad (1)$$

ここで、 T , n はそれぞれサンプリング周期、およびサンプル数であり、 θ_k^l は l 番目の関節の k 番目のサンプルにおける関節角度である。

次に2つ目として、角度標準偏差(S_θ)を定義する。これは各サンプルごとに計算した関節角度について、その分布の標準偏差を計算したものである。 l 番目の関節における S_θ の値(S_θ^l)は式(2)で与えられる。

$$S_\theta^l = \frac{1}{T} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\theta_k^l - \bar{\theta}^l)^2} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{\theta}^l$ は l 番目の関節における関節角度の平均値である。

最後に3つ目として、関節の動きそのものではなく、それによって引き起こされる体の各リンクの図心位置の変動量を考慮した指標(C_g)を定義する。これは、人体モデルを図1に示すような直線や三角形で表し、そのモデルを四肢がそれぞれ3個、体幹部が3個の合計15個のリンクに分割し、各リンクについてそれぞれ図心の位置を求め、その位置が関節の拘束前と後でどれだけ変化したかを計算したものである。なお、このモデルは人体のリンクだけしか考えていないので、筋肉や骨などの質量まで含めた動力学については考慮していない。 l 番目の関節における C_g の値(C_g^l)を求めるには、まず l 番目の関節だけを拘束したモデルを作成し、式(3)に示す計算を行う。

$$C_g^l = \frac{1}{nT} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{15} |o_{ij} - r_{ij}| \quad (3)$$

ここで、 o_{ij} , r_{ij} はそれぞれ拘束を行う前のモデルと後のモデルの各リンクの図心の

◎ : Restrict joint

$\bar{\theta}^l$: Average of joint angle of the l th joint

図3 関節を拘束したモデル

Fig. 3 Restricted model.

位置ベクトルである。図4に、右肘関節の C_g の値を求める場合について模式的に示す。肘の関節を、その関節角度の平均値 $\bar{\theta}$ の位置に拘束することで、前腕と手が実線で示す状態から破線で示す状態に移動する。それによって生じた図心位置の誤差 $e_{ij} = o_{ij} - r_{ij}$ について、各リンクごとと各サンプルごとに和を求めることで C_g が求められる。

4. 具体例

具体例として、バレエの動作から図1に示す各20点の三次元位置をサンプリング周波数10 Hzで23秒間計測した。

一般に三次元空間内の点を三次元計測する場合は、計測物体を2方向以上から撮影して計測を行うのが普通である。しかし今回は一方向だけから撮影された、すでに撮影済みの映像を用いたため、まず各関節の二次元位置を計測し、それをもとに人体骨格についての統計などからダンサーの前腕や上腕などの長さを求め、その長さや画面への投影長さから奥行きを算出して二次元データに加えて三次元の位置データとした。今回用いたバレエの動作は画面の奥行き方向の動作が比較的少ないため、当処理方法でも不都合は生じないものと思われる。しかしこのデータは本プログラムでは扱えない自由度（肩の挙上・引き下げなど）も含んでいる。そこで以下の分析に用いるため、測定した位置データから表1に示す関節の角度を計算し、それをもとに29自由度しか含まない舞踊運動モデルを作成した。以下の分析ではこのモデルを基準のモデルとして分析していく。

図4 C_g の計算

Fig. 4 Calculation of C_g .

4-1. 関節の重要度の分析

このモデルについて、前述した3種の指標を計算し、それぞれの指標によって各関節に対してその重要度の順位づけを行った。ここでは、指標の値が大きい関節ほど重要度が高いとみなしている。この後で関節を拘束して自由度を少なくした舞踊運動モデルを作成するが、その際にはここで決めた重要度が低い関節から先に拘束していく。表2にその結果について上位10位までを示す。この表より、 A_d からは腕の回転や手首・足首などが、 S_θ からは主に腕が、そして C_g からは主に体幹部分が重要と判断されることが分かる。

4-2. 関節を拘束した運動モデルの誤差評価

前節で求めた関節の重要度に基づいて、重要度の低い関節から順にひとつずつ関節を拘束するという方法で、3種の指標について29個ずつ、計87個の運動モデルを作成した。拘束を行わないモデルを基準とすると、これらのモデルは何らかの誤差を含んでいる。本研究では2種類の誤差を考え、それらを用いて各モデルを評価した。

まずひとつ目は、関節角度の誤差 E_θ である。これは、拘束前には θ_k の位置にあった関節を $\bar{\theta}$ の位置に拘束したことによって生じる角度の誤差の絶対値を、全関節について合計したものである。式(4)に E_θ の定義式を示す。

$$E_\theta = \frac{1}{nT} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^{29} |\theta_k^l - \bar{\theta}_k^l| \quad (4)$$

ここで、 θ_k^l は拘束を行った後のモデルにおける、 l 番目の関節の k 番目のサンプルでの角度であり、拘束を行った関節では、その値が $\bar{\theta}^l$ になる。

表2 重要度の分析結果

Tab. 2 Importance of joints.

重要度	A_d	S_θ	C_g
1	右腕・回転	左腕・前後	体・回転
2	右脚・回転	左腕・回転	体・左右
3	左脚・回転	右腕・回転	腰・前後
4	左腕・回転	右脚・回転	腰・左右
5	右腕・前後	右腕・前後	腰・回転
6	左腕・前後	左脚・回転	左脚・前後
7	左手首	体・回転	左腕・前後
8	右手首	首・回転	右脚・前後
9	首・回転	右足首	右腕・前後
10	右足首	左足首	左脚・左右

2つ目として、3章ですでに指標として定義した C_g^l を用いる。 C_g^l を計算する際には l 番目の関節だけを拘束したが、そのような限定条件を与えず、複数の関節を拘束したモデルについて式(3)の計算を行ったものを、モデルの誤差 E_{cg} と定義する。

以上のように定義した2種類のモデル誤差を、作成した87個のモデルに対して計算した。その結果を図5, 6に示す。簡単にするため、以下の記述において、“ A_d ”、“ S_θ ”、および“ C_g ”の各指標に基づいて作成された運動モデルのことを、それぞれ“ A_d -Model”、“ S_θ -Model”、および“ C_g -Model”と呼ぶ。

図5より、モデル誤差 E_θ については C_g -Model のほうが A_d -Model より大きいことが分かるし、反対に、図6より、モデル誤差 E_{cg} については A_d -Model のほうが C_g -Model より大きいことが分かる。また、定義式が類似しているためと考えられるが、 A_d -Model や S_θ -Model については E_θ の変化が滑らかであるし、反対に、 C_g -Model については E_{cg} の変化が滑らかになっていることも分かる。

本研究の目的は、拘束前の動作を損なわないようにモデルの自由度を減らすため、的確に関節の重要度を定めることができるような指標を探すことである。この目的からすれば、自由度を小さくするに従ってモデルのもつ印象が徐々に変化し、また、小さな自由度でもなお基準の動作モデルに近い印象をもたせられるような指標が望ましい。しかし、この2種類のモデル誤差 E_{cg} および E_θ による評価では、それぞれの指標に基づいて作成したモデルの評価が全く反対になっている。また、これらのモデル誤差が人間の主観と一致しているかは分からない。そこで、関節を拘束したモデルが基準のモデルとどれだけ似ているかについて人間による主観評価を行った。

4-3. 人間による主観評価

評価の際には被験者に対して10数個のモデルを提示する。そのため、あまり長い動作を提示することは被験者の負担となり、正確な評価が難しくなると考えられる。そこで、前節で作成した23秒間のモデルから10秒間分を抜き出し、そのモデルを基準のモデルとして関節を拘束したモデルを作成した。これらのモデルに対してモデル誤差 E_θ および E_{cg} を求めた結果を図7, 8に示す。これらの図は、23秒間のモデルについてモデル誤差を求めた図(図5, 6)とほぼ同じ傾向を示している。このことから、10秒程度の長さがあればさまざまな動作を平均的に含んでいるため、10秒間のモデルを用いても、それ以上長い動作を用いた場合と同様に、有為な評価ができると考えられる。

主観評価の対象として用いた運動モデルは、図7, 8に番号と記号で示した10種類のモデルである。番号のアルファベットの部分は関節の重要度を求めた指標を表しており、たとえば A_d6 は、指標 A_d に基づいて作成された6自由度をもつモデルを表している。また、図9に各モデルの可動関節を示す。図中の関節部分の記号は、その関節がもつ自由度数を表している。たとえば、 A_d10 の右肩についているハッチングされた丸印は、拘束を行わない運動モデルがもっている、前後、左右および回転の3自由度の内の2自由度をもつことを表している。

実験は、拘束を行っていない基準のモデルを一番最初に見せ、その後に評価対象とするモデルをランダムに3回ずつ見せて、“躍動感”、“面白さ”、“親近感”、“美しさ”および“基準の踊りとの類似性”の5項目について5段階評価をしてもらった。これらの項目は機械の動作⁵⁾やアミューズメントロボットの印象⁶⁾など

図5 E_θ の計算結果 (23 秒間)

Fig. 5 Error E_θ of restricted models (23 sec).

図6 E_{cg} の計算結果 (23 秒間)

Fig. 6 Error E_{cg} of restricted models (23 sec).

図7 E_θ の計算結果 (10 秒間)

Fig. 7 Error E_θ of restricted models (10 sec).

について主観評価を行った文献を参考にして選んだ。“基準の踊りとの類似性”とは、評価対象となるモデルが、基準のモデルとどの程度似ているかについて評価するための項目であり、基準のモデルを5として評価してもらった。その他の項目については被験者個人個人の価値基準に基づいて評価してもらった。

(1) モデルの類似性についての評価実験

はじめに、モデルの誤差と類似性についての評価との関係を見るために、 S_{g17} , S_{g27} , C_{g6} および C_{g17} を用いて評価実験を行った。これらのモデルは、主に E_{cg} に基づいて、自由度やモデル誤差が同じ程度のものを選んだ。被験者は工学部機械工学科の男子学生 19 名と、文科系および家政系女子大学の学生 32 名である。図 10 に評価結果を示す。図中の記号は評価の平均値を、縦棒は標準偏差を表している。また、各モデルの評価の平均値は、有意水準 1% で有意な差がある。

この図より、 C_{g17} と S_{g17} とでは、 E_{cg} の値がより小さい前者のほうが基準のモデルにより似ていると評価されたことが分かる。また、 C_{g6} と S_{g17} や、 C_{g17} と S_{g27} のようにモデル誤差 E_{cg} の値が同程度のモデル同士では、自由度数の多いモデルのほうが高い評価を得ていることも分かる。これらのことから、運動モデルの類似性は、図心位置の誤差から求めたモデルの誤差 E_{cg} とモデルのもつ自由度数に依存しているのではないかと考えられる。

次に、図 7, 8 において、自由度を少なくするにつれてモデル誤差が徐々に大きくなっていることに着目し、モデルの主観的な類似性についても同様な傾向がみられるかどうかを確かめる評価実験を行った。今回の評価実験に用いたモデルは、 A_{d6} , A_{d10} , A_{d17} , A_{d23} および C_{g6} , C_{g10} , C_{g17} , C_{g23} の 8 種類である。これらは、 A_d -Model と C_g -Model から同じ自由度をもつモデルを 4 種類ずつ選んだものである。実験の際には、

図8 E_{cg} の計算結果 (10 秒間)

Fig. 8 Error E_{cg} of restricted models (10 sec).

Degree-of-freedom of joint ○:0 ◎:1 ◐:2 ●:3

図9 評価に用いたモデルの自由度配分

Fig. 9 DOF assignment of 10 models used in subjective evaluation.

C_g -Model については前節と同じ被験者グループに評価してもらい、 A_d -Model についてはそれとは別の男性被験者 11 名に評価してもらった。その結果を図 11 に、評価の平均値についての検定結果 (t 検定) を表 3 に示す。

この図から、図 8 にみられるような、ある点で評価が急激に悪くなるという傾向はみられなかった。ここでは、約 6 自由度ずつ自由度が少なくなるように評価対象のモデルを選んだが、3 自由度ずつなど、もう少し小さな幅でモデルを選んでもいけばそのような傾向がみられたかもしれない。そこで次に、この曲線が図 7 と図 8 のどちらに似ているかということに観点をえて検討してみる。

図 10 類似性についての主観評価の結果(1)

Fig. 10 Subjective evaluation about similarity (1).

図 11 類似性についての主観評価の結果(2)

Fig. 11 Subjective evaluation about similarity (2).

表 3 図11の平均値の検定結果

Tab. 3 Significance test of difference between two models of Fig. 11.

	A_d6	A_d10	A_d17	A_d23	C_g6	C_g10	C_g17	C_g23
A_d6		1.992	6.933**	13.61**	1.817	6.766**	13.91**	15.34**
A_d10			4.814**	11.83**	1.128	3.558**	10.85**	12.41**
A_d17				4.179**	8.991**	4.668**	3.174**	5.045**
A_d23					16.99**	12.36**	2.909**	0.595
C_g6						8.307**	21.75**	24.86**
C_g10							14.23**	17.64**
C_g17								3.934**

** : $p < 0.01$

まずはじめに、10 自由度や 17 自由度では C_g -Model のほうが A_d -Model よりも高い評価を得ていることが分かる。ここでは被験者が同じ自由度のモデル同士を見比べていないにもかかわらず評価に差が出たようである。次に各曲線の変化について詳しくみると、 C_g17 と C_g23 との間や、 A_d6 と A_d10 との間の評価の差が小さいことが分かる。これは、図 8 においてそれらの区間で E_{cg} の差が小さくなっている傾向と似ている。これらのことから、モデルの類似性の自由度数に対する変化は、モデル誤差 E_{cg} の変化とよく対応しているといえる。

以上 2 つの結果から、モデル誤差 E_{cg} と主観評価によるモデルの類似性との間に強い関係があることや、図心位置の誤差 C_g を指標として関節の重要度を決定することで的確に関節の重要度を判断でき、より少ない自由度で踊りを表現できることなどがいえるだろう。

(2) その他の印象について

その他の項目についての評価結果を図 12 に示す。図中では、モデルのもつ自由度が少なくなるにつれて、

各点を結ぶ破線の間隔が大きくなるように表している。また、表 4 に基準のモデルの評価との相関係数を求めた結果を示す。

この図より、20 自由度以上のモデル（実線）は“躍動感”や“美しさ”が“面白さ”や“親近感”より高い評価を得るといった基準のモデルと同じような傾向を示していることが分かる。しかし、17 自由度程度（細かな破線）を境に傾向が変わりはじめ、10 自由度以下（間隔の大きな破線）では別の傾向を示している。このことから、それ以上自由度を少なくするとモデルのもつ印象が変わってしまうような、境界となる自由度数があると考えられる。次に各項目について検討すると、“躍動感”や“美しさ”を表現するためにはより多くの自由度が必要であると思われるし、反対に“面白さ”などは自由度にあまりよらないことから、それなりの自由度でも表現できるといえるだろう。

図 13 に 17 自由度をもつモデルだけを抜き出して示す。この図より、同じ自由度でも C_g17 は基準のモデルと同じ傾向を示しているが、 A_d17 や S_g17 は別の傾向

図 12 印象についての主観評価の結果(1)
Fig. 12 Subjective evaluation about impression (1).

図 13 印象についての主観評価の結果(2)
Fig. 13 Subjective evaluation about impression (2).

表 4 基準のモデルとの間の相関係数

Tab. 4 Correlation between standard model and restricted model.

Model	r	Model	r	Model	r
A_d6	-0.942	A_d17	0.011	C_g23	0.857**
C_g6	-0.860	$S_\theta17$	-0.471	$S_\theta27$	0.735**
A_d10	-0.715	C_g17	0.784**		
C_g10	-0.423	A_d23	0.792**		

** : $p < 0.01$

を示していることが分かる。図 8 とこの結果を見比べると、モデル誤差 E_{cg} が少ないほうがモデルのもつ印象が似ていると考えられる。

5. 結 語

本研究では、人間の踊りの動作を人間より少ない自由度をもつ自動人形でより忠実に再現することを目標として、踊りの動作にとって重要な関節を選ぶための指標を提案した。その指標とは、角度増分の平均(A_d)、角度標準偏差(S_θ)、および体の各リンクの図心位置の誤差(C_g)の 3 種類である。

具体例としてバレエの動作を取り上げ、29 個の関節それぞれについて 3 種類の指標を用いてその重要度を求めた。そして、重要度の低い関節を拘束していくつかの運動モデルを作成し、それらに対しリンクの図心位置の誤差(E_{cg})と、関節角度の誤差(E_θ)によって、拘束を行わないモデルとの誤差を数値的に評価し

た。またそれと同時に、拘束したモデルについて主観評価を行った。

その結果、モデル誤差 E_{cg} と主観評価との間に強い関係があることが分かった。また、図心位置の誤差を利用した指標 C_g を用いて関節の重要度を定めることが、人間の主観によって関節の重要度を定めることに非常に近いことも分かった。また、動作の“面白さ”については、モデルの自由度数による主観評価の差が小さかったことから、少ない自由度でもある程度面白さを表現できると思われる。

参考文献

- 1) 藤原晴夫：阿波踊りロボットの制御，計測と制御，31(12)，1264～1270，1992。
- 2) R. Ikeura and H. Inooka：“Manual control approach to the teaching of a robot task”，IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 24(8)，1994。
- 3) 内山 勝：フレキシブル・マニピュレータの軌道制御，日本ロボット学会誌，12(2)，184～191，1994。
- 4) 木村 浩：4 足歩行ロボットの動歩行について，日本ロボット学会誌，11(3)，372～378，1993。
- 5) 小川鑛一，森 政弘，平井明樹夫，土屋謙一郎，湯原博光：ものの動きに関する感情分析，人間工学，25(4)，243～251，1989。
- 6) 松浦壮一，藤城智子，山本一道，井口信洋：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，9(2)，177～183，1991。