

階層的探索法による仮想人間の動作生成

向井 智彦 栗山 繁 金子 豊久

豊橋技術科学大学 情報工学系

{mukai, kuriyama, kaneko}@mmip.tutics.tut.ac.jp

仮想人間の全身を使った動作は、関節における回転角を多数指定する必要がある、これを直接的な操作で設定するのは熟練が必要とされる。したがって、多関節体の動作を設計する際には、手先や足先の軌道から関節の回転角を推定する逆運動学の計算が用いられている。このとき、関節の構造に起因する曲げの制限や動力的な効率性を考慮しないと、生成される動作がしばしば不自然になる。したがって、逆運動学の計算に冗長な変数を導入し、その値を種々の条件を課して計算して自然な動作を生成する試みがなされている。しかしながら、全身に及ぶ複合的な動作を対象とした場合、その条件を状況によって変化させる柔軟性が必要とされる。本研究では、生成される動作が与えられた特徴を満たすように、冗長変数の値を階層的に探索する手法を提案する。本手法により、手先や足先の最終的な状態を指定するだけで自然な動作が自動的に生成され、仮想人間の動作設計に要する作業コストが大幅に削減される。

Motion generation of virtual humans using hierarchical search

Tomohiko Mukai, Shigeru Kuriyama, and Toyohisa Kaneko

Toyohashi University of technology, Department of information and computer sciences

Creating motions of a whole body of a virtual human requires many rotational angles to be set with respect to all joints. Therefore, in creating motions of multi-joint bodies, the inverse kinematics (or IK) is used for inversely calculating all joints angles from the trajectory of end-effectors, such as hands and feet. The resulting motions often lack naturalness without considering the rotational limits of mechanical joints and dynamical efficiency. Therefore, redundant parameters are introduced to the calculations of IK, and their values are determined by adding various constraints in order to generate natural motions. However, complicated motions of a whole body require the constraints to be flexibly changed according to given situations. This research proposes the method for hierarchically searching the values of the parameters so that the resulting motions satisfy given features. This method automatically generates complicated motions by merely specifying the final states of the end-effectors, and dramatically reduces the workload in designing motions.

1. はじめに

近年、テレビゲームやコンピュータゲームにおいて、3次元CGで仮想的に構築した人間（以後、仮想人間）の動作の効率的な生成法が重要な技術的課題となっている。現在の技術では、仮想人間の動作や振舞いは、プレイヤーの選択操作に従ってあらかじめ蓄えている動作のデータを再生する方式を採用しているが、その表現力を高めるためには、動作や振舞いが自律的に生成されるのが望ましい。また複合的な動作を、ゴールの状態を指定するだけで自然さを損なわずに生成できれば、アニメーション製作時における作業コストを大幅に削減できる。

上半身を用いた機械操作を計画する手法[1]は、動作を Transfer Task と呼ばれる作業に分解し、腕部の関節の回転角を手先の位置に関する式で与えるので、生成される動作は一般性を欠く。また、知識ベースに基づく仮想人間の動作の計画方法[2]は、あらかじめ規則として与えた動きの組み合わせでしか動作が実現されず、動力学的な最適性も考慮されていない。

本研究では、仮想人間の手先や足先の位置の終了状態を指定し、動作時の動力学的な値も考慮した最適な動作を生成するように、逆運動学の計算で用いられる冗長な変数の値を探索する手法を提案する。

2. IKの冗長変数

人体のような複雑な多関節体を少ない自由度で制御するには、エンド・エフェクターと呼ばれる手先や足先の時間を媒介変数とする軌道を指定して、冗長な自由度を有する関節の回転角を推定する逆運動学（あるいは、Inverse Kinematics. 以後、IKと呼ぶ）の計算が広く用いられている。IKは冗長度を有する関節角度の変化分の自乗和が最少にする計算なので、関節の動力学的な値を考慮したものではない。

したがって、IKの計算に冗長な変数を導入し、その値を決定する手法として、関節の構造を考慮した曲げ角の制限を導入する手法[3][4]や、各関節の回転の剛性を重み係数として制御する手法[5]、特異点を回避する手法[6][7]、および発生トルクを最適化する手法[8]などが提案された。しかしながら、全身を使った動作を生成する際には、これらの条件を単独で用いただけでは、見た目に良好な結果が得られない。したがって、IKの冗長変数の値が取り得る全ての範囲で探索的に求める必要があるが、人体の関節数の多さを考慮すると、最適化すべき変数の探索空間が膨大なものになってしまうので、効率的な探索手法を導入するのが望ましい。

3. 冗長変数学習モデル

一般的に用いられるIKの計算では*i*番目の関節角度の変位を q_i とした時、その自乗和

$$Q = \sum_i q_i^2$$
を最小にするように q_i を決定する。

本手法では、 $Q = \sum_i w_i q_i^2$ のように、冗長変数

として重み w を導入した式によって Q の値を計算し、その値を最小にするように q_i を決定する、重み付きIKの計算を用いる。

ここで重み w_i には任意の正定値を与えることができる。この値が大きくなるほど、 Q に占める q_i の値が小さくなるような計算結果が得られる。このため、他の関節に比べて w_i が大きな関節はその変位分が少なくなり、他関節がその抑制分を補う形で大きな変位を示すようになる。つまり、各 w_i 間の相対的な関係を変化させることで、エンド・エフェクターの軌道を保ちながら、多様なIKの解が得られる。この特性を活かし、重み係数ベクトル $\mathbf{W} = [w_0 \ \dots \ w_n]$ を変化させることで様々な動作パターンを生成することができる。我々

はこれらの生成動作の中に、人体が実際行う動作に近い、自然な振舞いを示すものが存在すると仮定し、そのような動作を与える W の値を探索する。

3.1 動作モデル

動作の生成には図 1 に示すような、固定長の剛体を可動関節で接続して構築されるモデルを用いた。各関節には表 1 に示すように、一部単純化した自由度を設定した。

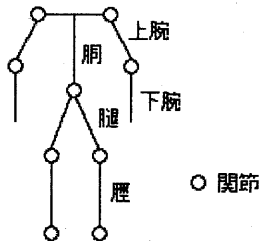


図 1 動作モデル

部位	足首	膝	股	肩	肘	半身	全身
自由度	1	1	3	3	1	9	18

表 1 関節の自由度

なお、本報告での動作生成は、簡単化のために右半身(右足・胴・右腕)のみを対象とした。

3.2 遺伝的アルゴリズムによる探索

本研究では、遺伝的アルゴリズム[9] (あるいは Genetic Algorithm, 以後 GA と呼ぶ) のに基づき、最適な動作を生成する W を探索した。 w_i には重み値 1~15, もしくは関節の固定を示す 0 のうちいずれか 1 つが与えられる。これらの値を 4 ビットの 2 進コードに変換し、連結したものを W を表す遺伝子とした。探索開始時には、ランダムに決定した 8 パターンの個体群を初期集団として与える。各世代において遺伝子には、交叉や突然変異といった GA の操作を、それぞれが発生する確率に応じて施し、新たな個体群を発生させる。新たに発生する個体数は、交叉が発生した回数によって変化する。次世代に残す遺伝子は、個体群の中から遺伝子の適応

度に応じて確率的に 8 つ選択される。このようにして世代を重ねることで、より高い適応度を示す 8 つの遺伝子を求めることができる。探索は、解が収束して遺伝子に変化がなくなるか、一定の世代数を超えたときに終了する。なお、交叉確率は 0.5, 突然変位率は 0.1 として、最大 20 世代に渡って探索を行った。

3.3 適応度の計算

各遺伝子の適応度は、その遺伝子に対応する W によって生成される動作への評価をもとに計算する。我々は評価の基準としていくつかの動作条件を与え、これらの条件をもとに動作の評価を行い、適応度を計算した。

関節の可動範囲：

IK の計算ではモデルの関節構造は考慮されないため、 W の与え方によっては、幾つかの関節が運動中、もしくは最終姿勢において不自然な角度をとることがある。このような動作を与えた W に対して、減点評価を与える。

重心位置：

足元から重心位置へのベクトルの水平成分を垂直成分で割った値が大きくなるほど体は不安定になると考えられるので、この値が大きいくほど、大きな減点評価を与える。

トルク：

動作全体を通じて必要となるトルクが大きいほど、大きな減点評価を与える。

これら 3 種類の減点評価値をそれぞれ 0~1.0 に正規化し、重要度(可動範囲>重心>トルク)に応じて重みをかけ、総和をとったものを W の評価値とする。つまり、評価値の値が小さいほど、遺伝子の適応度の値は大きくなる。このような評価計算を行う関数は、スカラー値を返す任意の関数で与えることができるので、ユー

ザーの目的に応じて新たな評価基準を与えたり、その重要度を変更するなど、自由な設定が可能である。

3.4 階層的な探索法

3.2 で述べた探索法を用いることで、探索空間の大きさに対して十分な回数の試行を行うことにより、良好な探索結果を得ることができる。しかし、重み係数の総数を n 、各 w_i に与える値のパターン数を m とすると、探索すべき空間は m^n と、重み係数の個数に対し指数的に増加する膨大なものになる。このように膨大な探索空間から効率よく最適解を探索するために、我々はその探索空間を2層の階層構造を用いて分割した。

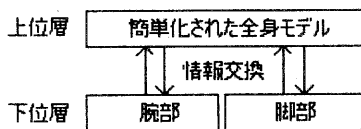


図2 階層構造

上位層に対応するモデルは図3のようになる。図中で、関節の横の数字はその関節の自由度を示す。

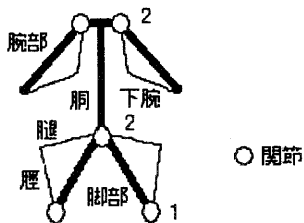


図3 全身モデルの簡単化

このモデルでは、胴体は固定長、腕部と脚部は可変長の剛体を可動関節で接続して構成される。腕部と脚部の伸縮は図3の細線に示すように、肘と膝を曲げた場合の、手先と肩、および足先と大腿付け根の距離の変化に相当する。調節すべきパラメーター数は、重み w_i に腕部・脚部の縮みを加え、全体で14つと、階層化によ

り4つ減少する。また、腕部をこのような1つの剛体として表現することにより、上位層では肘の位置に関する最適性を考慮する必要がなくなるので、腕の軸回りの回転を省くことができ、自由度を減らすことができる。探索においては、まず下位層で、肩の位置を固定し、腕部だけを動かすことで目標位置へ手先を移動させるための、最適動作を生成する重み w_i の探索を、な目標に対して行う。この時、上位層では無視される、肘の位置に関する最適性も考慮して探索を行う。脚部では、腰の位置が決まれば足首と膝の角度は一意に決まるので、これらの関節の可動限界から、腰が移動できる範囲を求めておく。次に上位層において、目標となる手先軌道を満足し、最適な動作を与える重み係数と脚部・腕部の縮みを求める。この時、脚部・腕部の縮みに対応する脚・腕の動作は下位層の結果を用いる。上位層での探索結果、腕が胴体を通り抜けるといった不具合が残るような場合は、その情報を下位層へ戻し、それを解消するように腕部への重み係数の修正が行われる。このように考慮すべき最適性を各層で分担することで、効率的な評価・探索が行える。また、全体の関節自由度を減らしたモデルを用いた探索を行うことで、IKの計算に要する時間を短縮することができる。

4. 動作生成例

初期姿勢である直立姿勢から、様々な位置へ手先を移動させる動作を、探索した W から生成した。全ての図は、時間を横軸にとり、左の初期姿勢から右の最終姿勢へ移動するときの、運動者の右前方から見た姿勢をワイヤフレーム表示する。なお、左腕と左脚は動作が生成されないので表示を省略した。探索時間はPentiumIII 500MHzのマシン上で実行した時に、探索に要したクロック数から算出した。

4.1 手先の左前下方への移動

運動者の左前下方に手先の目標位置を設定したときの探索結果を示す。複数の候補動作の中で、見た目に良好な結果を示したものが図4である。重心を中心付近に保ちながら、自然な動作を行っていることが確認できる。

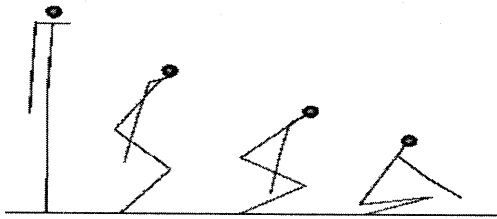


図4 手先の左前下方への移動1

また、図5に別の候補動作を示す。このように複数の候補動作の中から、ユーザーの目的に合った動作を選択することが可能である。これらの探索は約9秒で終了した。

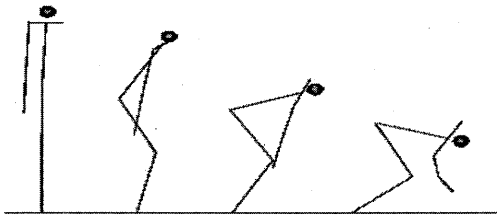


図5 手先の左前下方への移動2

4.2 手先の足元への移動

次に、目標位置を運動者の足元としたときの探索結果を示す。図6は候補動作の中で、見た目に最も良好な結果を示したものである。この探索は約6秒で終了した。

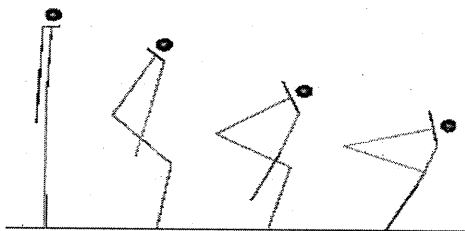


図6 手先の足元への移動

図6の探索結果をもとに、脚部の縮みを増すようにパラメーターを調整した動作を図7に示す。システムにはこのようなパラメーター・エディタの機能も用意されており、探索結果に微調整を加えることができる。GAによる探索では真に最適な解を求めることが困難なため、より良好な結果を得るためには、ユーザーによるこういった直接的な操作が必要になる。

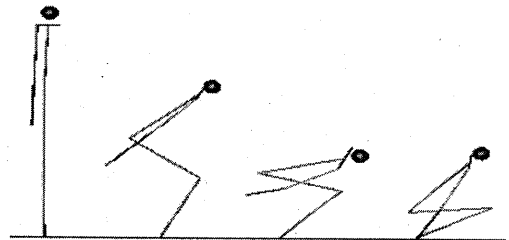


図7 手先の足元への移動(調整後)

5. おわりに

本研究では、階層的な探索法を用いた複合動作の生成法を提案した。本手法により、手先や足先の最終的な状態を指定するだけで、自然な振舞いを示す動作が生成される。また、動作の評価に用いる報酬値は動力学的あるいは幾何学的な計算を含んだ任意の関数で与えることが可能なので、本手法は拡張性に富んでいるといえる。また、擬似逆行列の代わりに非線形最適化計算[10]に用いられる変数を探索の対象にすることも可能である。今後は、階層構造を3層以上の多階層にすることで、さらに高速な探索を実現することを検討している。また、さらに良好な結果を得るために、シミュレーテッドアニーリングなど他の探索法を用いることなども、検討すべき課題である。

6. 謝辞

本研究は、財団法人放送文化基金の「対話的な映像放送における仮想人間の動作の自律制御」に対する一般援助金の助成を受けている。ここ

に感謝の意を表します。

7. 参考文献

- [1] Y. Koga, K. Kondo, J. Kuffner and J.-C. Latombe, "Planning Motions with Intentions", SIGGRAPH '94, pp. 395-408 (1994).
- [2] M.-R. Jung, N. Badler and T. Noma, "Animated Human Agents with Motion Planning Capability for 3D-Space Postural Goals", J. Visualization and Computer Animation, vol.5, pp.225-246 (1994).
- [3] A. Liegeois, "Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. SMC-7, pp. 868-871(1977).
- [4] P. H. Chang, "A Closed-Form Solution for Inverse Kinematics of Robot Manipulators with Redundancy", IEEE J. of Robotics and Automation, RA-3-5, 393/403(1987)
- [5] D. E. Whitney, "Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses", IEEE Trans. Man-Machine Syst., vol. MMS-10, pp.47-53 (1969).
- [6] T. Yoshikawa, "Analysis and control of robot manipulations with redundancy", in Robotics Research, The First International Symposium, pp. 207-214 (1984).
- [7] Y. Nakamura and H. Hanafusa, "Inverse Kinematic Solutions with Singularity Robustness for Robot Manipulator Control", Trans. Of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, 108, 163/171(1986)
- [8] J. M. Hollerbach, K. C. Suh, "Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization", IEEE J. of Robotics and Automation, vol. RA-3, no.4, pp. 308-316 (1987).
- [9] 北野宏明, "遺伝的アルゴリズム", 産業図書(1993)
- [10] J. Zhao and N. I. Badler, "Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures", ACM TOG, vol.13, no.4, pp.313-336 (1994).