

レーブグラフを用いた3次元物体アニメーションの研究

カノンシャイヨス・ピサヌ

西田 友是

東京大学

キーフレームアニメーションにおいてスケルトン技術は広く用いられている。スケルトンベースのモデリング技術を使った3次元アニメーションが開発されている。本研究では、拡張レーブグラフを使った新しいアニメーションシステムを提案する。位相情報を表すレーブグラフは物体のスケルトンを表現し、そのノードの位置、エッジの形状、物体の輪郭線が幾何情報を表す。レーブグラフと輪郭線は、移動、クォータニオンによる回転、変形によって変換される。そして変換されたレーブグラフと輪郭線を元にして新たな座標系で物体が再構成される。キーフレーム間のスケルトンを補間することによって、中間レーブグラフと輪郭線が生成される。レーブグラフと輪郭線によって物体の基本的な構造を再構成できる方法で、この方法は形状をエディットするのに直観的な方法であり、また計算・制御する際の簡潔なデータ表現法でできる方法を提案する。

A Study of 3D Animation Using Reeb Graphs

Pizzanu Kanongchaiyos

Tomoyuki Nishita

The University of Tokyo

A new homotopy modeling is described for 3D skeleton-based key frame animation. Using the homotopy model that constructs object surfaces from their cross-sectional contours and Reeb graphs, an animator can create a motion sequence by editing the graphs and contours of the objects. The Reeb graph is a skeletal abstraction of an object providing topological information while the contour provides surface information. It is converted to a set of articulated Reeb graphs in order to satisfy the height function restriction when they are transformed. A user interface, which allows interactive and predictable editing of the Reeb graphs and contours, defining of key-frames, reconstructing the objects, is also presented.

1 はじめに

実世界の物体を自動的に再構築することはコンピュータグラフィックスの重要な問題である。コンピュータグラフィックスにおけるアニメーションシステムは、物体を定義する道具と共に、その動きと変形を表現する手法を兼ね備えていなければならない。多くのアニメーションシステムでは物体の基本的な形状[7]、例えば平面や球などの物体で近似しているが、これらの表現方法ではユーザーが明示的にトポロジー情報を指定する必要がある。しかし、物体の

内側に接する最大の球の中心によって定義される骨格表現[1]で物体を表せば、物体の持つトポロジー情報と幾何情報をうまく利用することができる。

このような骨格表現の考え方は、モデリングとアニメーションの分野において重要である。物体の骨格の変形、回転、平行移動、そして形状の再生成をする方法として Medial Axis Transform[12]が挙げられるが、ユーザーに直観的な変形をさせることができないという欠点がある。骨格は自然な方法で変形させることが可能だが、骨格は明示的な表面の

情報をもっていないので、それだけでは表面をどう変形させるかまでは決まらない。

レーブグラフを用いた複雑な形状のモデリング[13]では、レーブグラフでトポロジー情報を含む骨格を表し、輪郭線で表面を表す。骨格と陰関数[2]による表現を用いる手法と比べると、レーブグラフを用いる手法は幾つかの利点がある。レーブグラフは直観的な編集が可能な骨格の表現と考えることができるのに加え、他の骨格を使った手法[4],[6]と違って、輪郭線の変形がグラフの構造に大きな影響を及ぼさないというのが挙げられる。その上、ポリゴン表現から変換が容易である。

この論文ではレーブグラフとその輪郭線によって表現された物体のキーフレームを基本としたアニメーションに特に注目する。レーブグラフと輪郭線を用いてキーフレームを決定し補間する。物体の形はレーブグラフを編集して輪郭線を変えることで、変形される。そして、レーブグラフは1つのエッジのレーブグラフの集合として再生される。物体の構造を正しく保つために、Displacement Constraints[5]を使用する。変形された輪郭線が自分自身と交差していないかどうかのチェックも行なう。

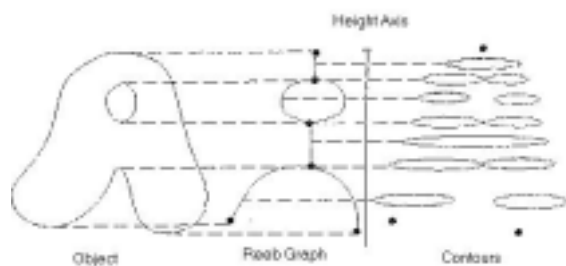


図1：レーブグラフと高さ関数

2 レーブグラフ

2.1 定義

レーブグラフは3次元物体のトポロジー情報を持った骨格を表現している。レーブグラフは断面で切った輪郭線をそれぞれ1つの点とすることで定義される[13]。例えば、図1が高さ関数レーブグラフで

ある。特異点はグラフのノードとして表されている。連結な部分というのはグラフのエッジに対応している。

物体の幾何情報が欠けているので、3次元物体を表すためにはレーブグラフだけでは十分ではない。それゆえ、輪郭線を加えてレーブグラフを拡張する。輪郭線と連続なトロイダルグラフ[13]の間に表面パッチを張ることで物体を再構築する。

2.2 輪郭線の定義

輪郭線は、自分自身とも他の輪郭線とも交差しない閉じた曲線と定義する。輪郭線は高さ関数に垂直な平面上に存在する。輪郭線は、ポリゴンや球やスプライン曲線として編集することができる。また、3次元物体のポリゴンデータを輪郭線ベースの表現方法に変換することもできる。

3 変形によって起こる高さ軸の問題

アニメーションで物体が変形する際に2章で述べた高さ関数に関する条件を満たさなくなってしまうかもしれない。例えば、変形時にレーブグラフのエッジが高さ軸と垂直になってしまう。この問題を解決するために下のようにレーブグラフを定義する。

3.1 関節レーブグラフ

高さ軸の問題を解決するため、レーブグラフの各エッジは、図2のようにそれ自身も変形する局所的な高さ軸を保つように変形する。最初のエッジが定義された時は局所的な高さ軸は大域的な高さ軸と一致している。レーブグラフを変形させていくと、それぞれのエッジは局所的な座標空間の中で、それぞれが局所的なレーブグラフであるかのように変形していく。このグラフを関節レーブグラフと呼ぶことにする。おおもとのレーブグラフはそれぞれが高さ軸をもつ1つのエッジのレーブグラフに分割される。これらの1つエッジグラフは連結部分では似たような輪郭線をもつ。

4.6 章で説明する点間の拘束条件を使って物体のトポロジーを保つ。さらに、輪郭線は定義上交差持つことは許されないもので、もし交差があればその向

きを変更する。再び変形させる時の面というのは、連結している部分の正規化された高さ軸を足合わせた方向である。

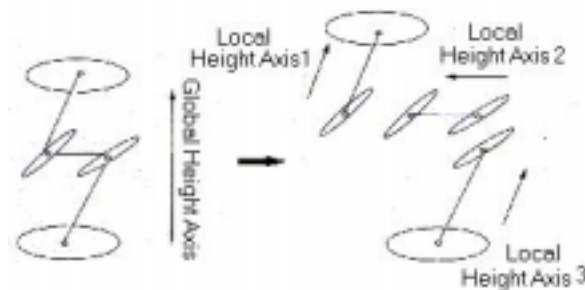


図2：関節レーブグラフ

3.2 関節レーブグラフを使った表面構築

関節レーブグラフによって表されている物体の表面は既存の方法[13]を使って、それぞれの部分に対応するレーブグラフを用いて構築する。各レーブグラフはそれぞれの座標空間内で関節レーブグラフとして使われる。レーブグラフが連結している部分には、連続した表面を生成するために、輪郭線がなければならぬ。さらに、輪郭線は自分自身と交差してはいけぬ。連続した曲線の生成は既存の手法[13]を用いて対応している上と下の輪郭線を利用することで行なわれる。

4 変形と補間

4.1 平行移動

我々のシステムでは、エッジは基本的なスプライン曲線[15]、Catmul-Rom スプライン曲線[3]、もしくは線分の集合で表されている。グラフの平行移動はそのノードとエッジのコントロールポイントの平行移動によって行なわれる。同様に、輪郭線も平行移動ができる。

4.2 回転移動

回転移動にはクォータニオン[14]単位球を用いる。それぞれの拡張したレーブグラフのエッジと輪郭線にクォータニオン座標を適用する。単位球上に連続したクォータニオンの列 q_n が存在する。列中のそれ

ぞれのクォータニオンは球上の線分の端点になる。そこで球上の線形補間、Slerp(Spherical Linear Interpolation)[14]を使ってクォータニオンを補間する。最後に補間されたクォータニオンから、物体のベクトルを回転する行列を求める。

球上での回転移動の計算時間は一定であることはできる。2つの与えられた方向に対応する点を球上に取り、それを結ぶ円弧を描けばよい。

q_1 から q_2 への、パラメータ u が0から1へと変化する時の Slerp の式は2つの方法で求めることができる。すなわち、

$$\text{Slerp}(q_1, q_2, u) = q_1 \cdot (q_1^{-1} \cdot q_2)^u \quad (1)$$

と表すことができ、 $q_1 \cdot q_2 = \cos \theta$ として

$$\text{Slerp}(q_1, q_2, u) = \frac{\sin(1-u)\theta}{\sin \theta} q_1 + \frac{\sin(u)\theta}{\sin \theta} q_2 \quad (2)$$

と表すことができる。ここでは式(2)を使うことにする。なぜなら式(1)の式は解析に適した単純な形であるのに対して、式(2)は実用に向いているからである。

4.3 変形

関節レーブグラフはトポロジーの情報だけではなく物体の幾何的な情報も持っているので、物体を変形させるにはグラフと輪郭線の形を変えればよい。前述したようにエッジの形というのはそのコントロールポイント（直線のエッジの場合は端点）によって制御される。面の変形には輪郭線の変形を使う。平行移動は輪郭線の頂点を移動させることで行い、回転移動にはクォータニオンを用い、輪郭線に垂直な高さ軸の方向を使う。

4.4 自己交差

図3のように回転移動によってエッジや輪郭線が変形されたときに、2つの輪郭線が交差する可能性がある。

輪郭線同士の交差が起こった際に、それを避けるための回転移動を計算する方法を次に示す。

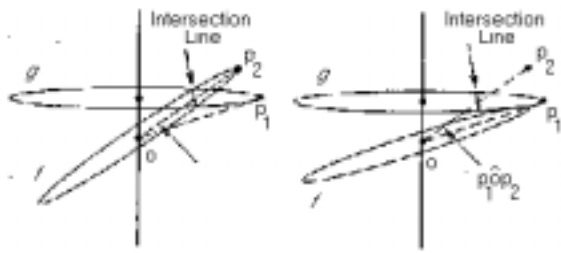


図3：輪郭線を回転移動の計算

1. f を回転した輪郭線、 g をそれと交差した輪郭線とする。
2. 二つの輪郭線の交差部分である直線 l があれば求める。
3. l は g を2つの部分に分割する。グラフの軸を囲む部分とそうでない部分である。後者の領域のなかで l から最も遠い点 p_1 を求める。同様に f についても後者の領域中で l から最も遠い点 p_2 を求める。
4. o をレーブグラフのエッジ上の点で輪郭線 g と連結しているものとする。
5. f を角度 $p_1 \hat{o} p_2$ 分だけ反対方向に回転させる。

4.5 レーブグラフの対応

アニメーションおよび、モーフィングの過程における重要な課題の一つは2つの物体を対応させることである。レーブグラフおよびその断面輪郭線の変形・移動により、ユーザーが両物体を変換する。両物体の対応レーブノードと対応エッジが Isomorphism アルゴリズム[16]により、求められることになる。このアルゴリズムによれば、レーブグラフは、ダイレクトグラフとして導入され、グラフの特徴は、特徴マトリクスの形で得られる。同質の特徴を持つ2つのレーブノードを対応させ、対応後の特徴マトリクスを再計算し、グラフが完全に対応するまで、この作業を繰り返す。しかしながら、この研究において、対応が可能な物体は、同じトポロジー情報を持っている物体でなければならない。異なるトポロジー情報を持つ物体間に関しては、トポ

ロジーの変換がなされなければならない。この点に関しては、今後の研究に委ねることにする。

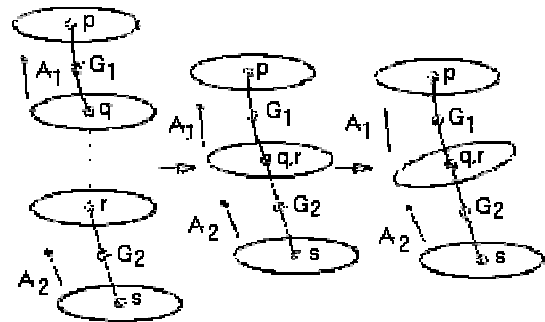


図4：点間の拘束条件

4.6 点間の拘束条件

関節レーブグラフをアニメーションに使用しているので、補間は1つのエッジのレーブグラフに関して別々に施される。点間の拘束条件を持たすために独立したグラフをつなげてから修正を加える。

二つのグラフの間の点と点を連結するための拘束条件には回転に関して自由度が3である。この条件を満たす一般的なアルゴリズムを Gascuel[5]の記法に従って以下に示す(図4)。

Step1 両方のグラフが独立だとしてその位置と方向を計算する。

Step2 グラフに少量の回転または平行移動を加える。

Step3 補正量が決められた範囲内であるうち、もしくは反復回数が最大に達したとき(2つのキーフレーム間で5回)に補正を終了する。輪郭線もまた回転して、正規化された高さ軸ベクトルの和の方向に垂直になるようにする。

点間の拘束条件というのはグラフを平行移動させれば満たされるが、これでは非現実的な結果しか得られない。しかし、我々の手法は平行移動だけではなく回転移動も補正に加えている。

ここで Step2 を詳しく説明する。図4は中心がそれぞれ G_1, G_2 であるグラフ R_1, R_2 を表している。中心とはグラフの一番上と一番下の点の中間の高さに

あるエッジ上の点である。グラフ R_1 の点 P_1 とグラフ R_2 の点 P_2 を一致させるための自由度が3である。関節レーブグラフの計算法は以下のとおりである。

(1) R_1 と R_2 にそれぞれ少量の回転移動

$$\Delta \vec{R}_1 = \mu_{12} (\vec{P}_1 - \vec{G}_1) \times (\vec{P}_2 - \vec{G}_1) \quad (3)$$

$$\Delta \vec{R}_2 = \mu_{21} (\vec{P}_2 - \vec{G}_2) \times (\vec{P}_1 - \vec{G}_2)$$

を加える

(2) 拘束条件を満たすため回転後の新しい位置 P'_1, P'_2 に平行移動

$$\Delta \vec{x}'_1 = \mu_{12} (\vec{P}'_2 - \vec{P}'_1) \quad (4)$$

$$\Delta \vec{x}'_2 = \mu_{21} (\vec{P}'_1 - \vec{P}'_2)$$

を加える。ここで μ_{12} は R_1 から R_2 回転、平行移動できる度合を表していて、 μ_{21} は R_2 から R_1 への度合である。 ($0 < \mu_{12} < 1, \mu_{21} = 1 - \mu_{12}$)

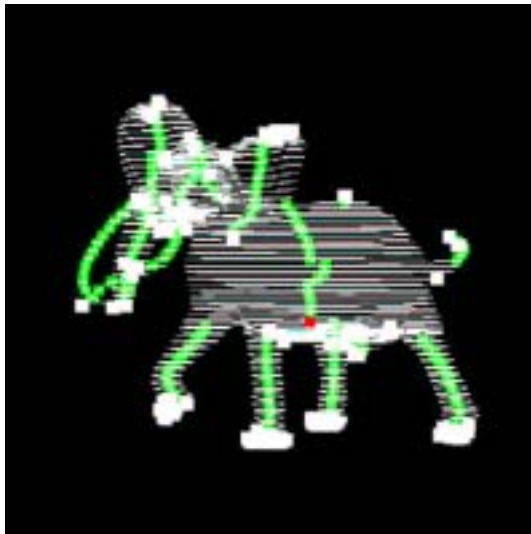


図5：像のレーブグラフと輪郭線

5 結果

レーブグラフを使ったアニメーションシステム、「レーブアニメーター」を我々は実装した。レーブアニメーターは物体をモデリングしてアニメーションさせるものである。まず、物体の拡張したレーブグラフを作成するかファイルから読み込む。そして、グラフは編集されてキーフレームに指定させる。もう一方のキーフレームは既に指定したグラフをコピー

し、変形し回転させたりして作ることができる。最後にキーフレーム間の補間が自動的になされる。

図5は像のレーブグラフと輪郭線を表している。これはポリコンデータを輪郭線とレーブグラフに変換したものである。レーブグラフと輪郭線のファイルのサイズは104,653バイトである。足と鼻のアニメーションをそれぞれ図6、図7に載せる。1つのキーフレームの計算時間はSGI Octane2のMIPS 64-bit R12000A™ 400MHzのプロセッサで約4秒であった。

6 まとめと今後の課題

この論文ではレーブグラフを用いた3次元物体のアニメーションを行なう新しい手法を提案した。物体はそれぞれが独自の座標系をもつ関節レーブグラフに分割され、形状の変形時にはそのトポロジーを保つため、反復補正において点間の拘束条件を使った。そして、輪郭線はレーブグラフの条件を満たし、かつ、物体の幾何形状がおかしくならないように、ある平面上に移動させた。

物体の再構築に関しては我々の手法は単純な幾何的なもので、骨格要素を決定したり表面の輪郭線を生成したりするような最適化計算は一切行っていない。よって Medial Axis Transform[12], Implicit Function[10], Surface Reconstruction Function[8]といった他の手法[4]と比べると表面の変形は直観的であるし、扱える物体の形状にも制限がない。

アニメーションに断面の輪郭線を使うというのは、その断面形状や直径を容易に計算することができるので、地形学、生医学、地球物理学の断面輪郭のデータを扱う上で優れた方法だといえる。その上、ポリコンで表現された物体も、データをレーブグラフと輪郭線に変換することで容易に変形することができる。

今後の課題として、以下のようなことを検討中である。

- 計算コストの非常に大きい自己交差のチェックを高速化する。

- 物体のレーブ構造を対応させることでトポロジーの異なる物体をモーフィングする。
- 力、環境からの影響、条件などの物理的なパラメータを取り入れることで物理学をベースにしたアニメーションの作成できる手法の開発。

謝辞

多くの助言を下さった、イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校の品川義久氏、法政大学の国井利泰氏に、感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Arcelli and G. Sanniti di Baja, "Euclidean Skeleton via centre-of-maximal-disc extraction," Image and Vision Computing 11, pp.163-173, 1993.
- [2] J. Bloomenthal, Bulge Elimination in Convolution Surfaces," Computer Graphics Forum 16, pp.31-41, 1997.
- [3] E.Catmull and R.Rom, "A Class of Local Interpolation Splines," Computer Aided Geometric Design, pp.317-326, 1974.
- [4] E.Ferley, M-P. Gascuel and D. Attali, "Skeleton Reconstruction of Branching Shapes," Computer Graphics Forum 16, pp.283-293, 1997.
- [5] J-D. Gascuel and M-P Gascuel, "Displacement Constraints for Interactive Modeling and Animation of Articulated Structures," Visual Computer 10, pp.191-204, 1994.
- [6] S. M. Gelston and D.Dutta, "Boundary Surface Recovery from Skeleton Curves and Surfaces," Computer Aids Geometric Design 12, pp.27-51, 1995.
- [7] G. Kwaiter, V. Gaildrat and R. Caubet, "Interactive Constraint System for Solid Modeling Objects," Proceedings of the Fourth Symposium on Solid Modeling and Applications, pp.265-274, 1997.
- [8] M.Teachmann and S. Teller, "Assisted Articulation of Closed Polygonal Model," Technical Sketch at SIGGRAPH, pp.254-264, 1998.
- [9] C.W. Misner, K.S. Thorne and J. A. Wheeler, "Gravitation, ed.," W.H. Freeman, 1973.
- [10] A. Opalach and M-P. Gascuel, "Local Deformations for Animation of Implicit Surfaces," SCCG. Pp.85-92, 1997.
- [11] C. W. A. M. van Overveld and B. Wyvill, "Polygon Inflation for Animated Models: A Method for The Extrusion of Arbitrary Polygon Meshes," The Journal of Visualization and Computer Animation 8, pp.3-16, 1997
- [12] E.C.Sherbrooke, N.M.Patrikalakis and E. Brisson, "An Algorithm for The Medial Axis Transform of 3D Polyhedral Solids," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 2, pp.44-61, 1996.
- [13] Y. Shinagawa and T. L. Kunii, "The Homotopy Model: A Generalized Model for Smooth Surface Generation from Cross Sectional Data," Visual Computer 7, pp.72-86, 1991.
- [14] K. Shoemake, "Animation Rotation with Quaternion Curves," ACM 19, pp.245-254, 1985.
- [15] R. hom, "Esquiss D'une Semiophysique," Inter Editions, Paris, pp.57. 1988
- [16] S. Wu and J. F. Abel and D. P. Greenberg, "An Interactive Computer Graphics Approach to Surface Representation," CACM 20, pp.703-712, 1977.
- [17] D.C Schmidt and L.E. Druffel, "A Fast Backtracking Algorithm to Test Directed Graphs for Isomorphism Using Distance Matrices," J.A.C.M.23, pp.433-445, 1976

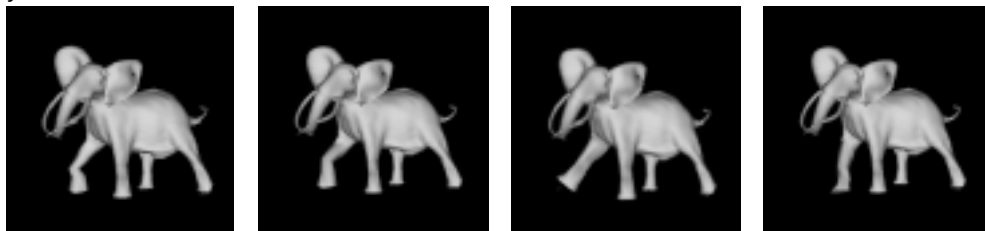


図 6: 像の足のアニメーション

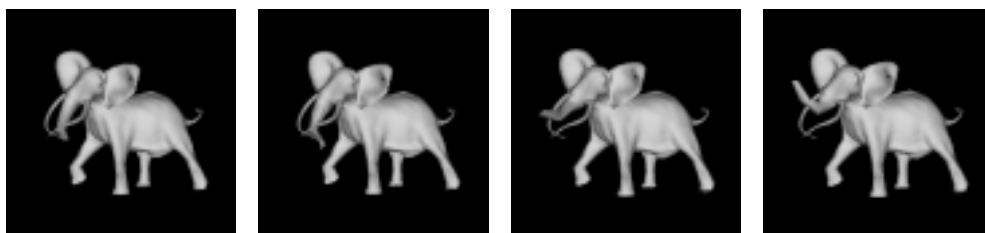


図 7: 像の鼻のアニメーション