

SAIによる3次元形状操作

増田 智仁[†] 池内 克史[‡]

東京大学 情報理工学系研究科[†]

東京大学 生産技術研究所[‡]

概要

本論文では、レーザーレンジファインダーなどで得られた物体表面の3次元点列データを deformable surface で近似し、deformable surface の各頂点において、曲率の一種でメッシュ面から安定に計算できる simplex angle を求め、それを球面に投影し、物体形状を SAI(spherical attribute image) として表象する手法について述べる。さらにこの SAI から deformable surface へ可逆的に復元できることを示し、二つの物体の SAI を線形補間して得られる中間 SAI からそれらの中間形状を生成できることを述べる。

3D Shape Manipulation by Using Spherical Attribute Image

Tomohito Masuda[†] Katsushi Ikeuchi[‡]

Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo[†]

Institute of Industrial Science, University of Tokyo[‡]

Abstract

In this paper, we propose to represent the object shape as its spherical attribute image (SAI), which is obtained from its mesh approximating its surface: First, a range of 3D points of the object surface, measured by a laser range finder, is approximated by using a deformable surface. At each vertex of the deformable surface, a simplex angle, a class of surface curvature, is calculated and then mapped to a corresponding surface point on a unit sphere. The resulting spherical representation is referred to as an SAI of the object. This SAI is a convenient tool to examine the congruence among objects. We can also inversely reconstruct an original shape from a given SAI. By using this inverse mapping, we can construct intermediate shapes between two objects through interpolating SAI. We have implemented these manipulation processes, and verified the effectiveness of SAIs for shape manipulation.

1 はじめに

近年、文化財の保護や修繕、復元の目的のためのデジタルデータ化が頻繁に行われるようになり、このデータの取扱いに関する技術が多く研究されている。本研究ではその一環として、2 物体間の形状マッチングと

モーフィングについて提案する。

近年の医療や映画などに反映されている映像技術に見られるように、2 次元画像上でのモーフィングのためのマッチング技術は数多くの研究がなされていて、それらのマッチングは画像の輝度を追跡したりするこ

とによって行われているしかし、3次元のマッチングは形状特性を用いなければならないという点で2次元でのマッチング技術とは全く異なるものである。

3次元形状の簡単なマッチング方法として、2物体間の対応する複数の特徴点をユーザーが与えるという方法がある。しかしこれは、正確なマッチングを取ろうとするほどユーザーに大きな負担がかかり、実用的ではない。また、仮にそのような特徴点が多く存在したとしてもその特徴点での曲率が適切に補間されているとは限らないという点で、2物体間のスムーズな形状変形は望むことができない。

そこで我々は、モーフィングの中間画像の生成に関し、以下のような目標を設定した。

- 現実性:中間画像は元々の物体形状にふさわしい3次元ジオメトリをもち、その本質的特徴を保持しなければならない。
- スムーズな形状変化:2物体間の形状変化はスムーズに移行しなければならない。

この目標を達成するためには、スケール等に依存しない曲率の観点から2物体間の対応を自動的に取る必要がある。そのためには物体形状を特殊な座標系に適切に表現できる手法を確立しなければならない。

Gauss はジーナス0のトポロジーを持つ物体形状を球上にマッピングすることで物体のマッチングを3自由度の球座標系で取る手法を提案した[1]。物体形状の球状へのマッピングはEGI、CEGI等の手法[2][3][4]が提案されているが、これらはそのマッピングが1対1対応にならないことがあり、形状に一意な表現ができないことが問題となってくる。よって、Gauss mappingとは異なる形状表現手法を確立する必要がある。

本研究では、球状メッシュを使うことによって物体の表面形状を近似し、その本質的な形状表現としてメッシュの各ノードで局所曲率を計算し、メッシュ全体にその曲率をマッピングする(spherical attribute image(SAI)の生成)手法を提案する。但し、その目標物体は球と同じトポロジーであるジーナス0の物体に限る。さらに、各ノードの動きに何らかの均一性制約を設けることにより、元の物体形状が復元できることを示す。また、2物体のSAIの曲率の差の合計が最小になるような対応が自動的に取れることについて言及し、その対応のもとで曲率を線形補間したSAIを作り、それを形状空間に復元することによって中間画像を生成する手法を提案する。

以降、2章では、球状メッシュとして deformable surface を使用し、その初期メッシュの生成方法や、メッシュでの表面近似の過程で各ノードに発生する変形力について述べる。3章ではメッシュの各ノードでガウス曲率の一種である simplex angle を定義し、それをメッシュ全体にわたり計算し、単位球にマッピングすることでSAIを生成する手法について述べる。4章では、求められたSAIをもとの初期メッシュに与えると、物体形状が復元できることについて言及し、5章ではモーフィングの前段階としての2物体間の形状マッチングがSAIを使うことによってできることを示す。また、そのマッチングのもとで対応しているノードの曲率を線形補間したSAIを作成し、それを復元することで2物体間の中間画像を生成できることについて述べる。最後にこれらをプログラミング実装して実験し、全体の結論を述べてまとめとする。

2 Deformable Surface

まず最初に、3次元物体表面をメッシュにより適切に近似する手法として、deformable surface を使うことを考える。

2.1 初期メッシュ

deformable surface の初期メッシュは、球の近似表現として、以下のように生成する(図1参照)。まず、正20面体(図1(a))の各面を一樣に高次分割(図1(b))した多面体(図1(c))として生成する。次にその多面体の双対(図1(d))(図1(e))を取る。双対を取るのは各ノード接続性を均一化することにより、この場合各ノードは3つのノード(近傍ノード)と接続している。

2.2 メッシュの変形

目標物体の表面を近似する過程で、この初期メッシュを変形させる時に各ノードに働く力は以下の2つの力で構成される。まず第一に、各ノードが物体のレンジデータの最近傍点に近づこうとする力である。各ノードからの最近傍点を効率的に特定するのに、我々はkd-tree[12]を使って実装した。第二に、局所的均一性(local regularity)を保持しようとする力である。local regularityとは、各ノードの密度を常に均一に保持しようとする

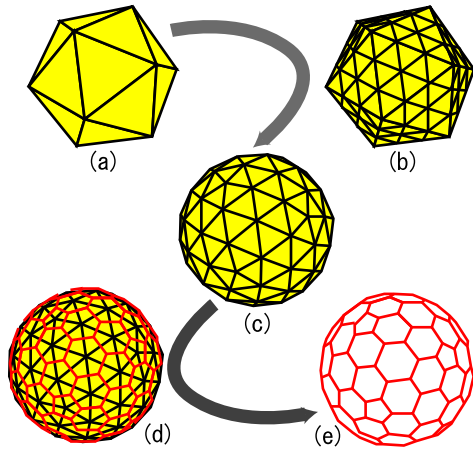


図 1: 初期メッシュの生成

る制約である。具体的には、ノード P の近傍ノードを P_1, P_2, P_3 とすると、 P の P_1, P_2, P_3 からなる平面 (近傍平面) への投影点 Q と三角形 (近傍三角形) $P_1 P_2 P_3$ の重心 G が一致することである (図 2 参照)。この制約は局所的に定義されたものであるから、回転や平行移動に不変である。図 3 は deformable surface での表

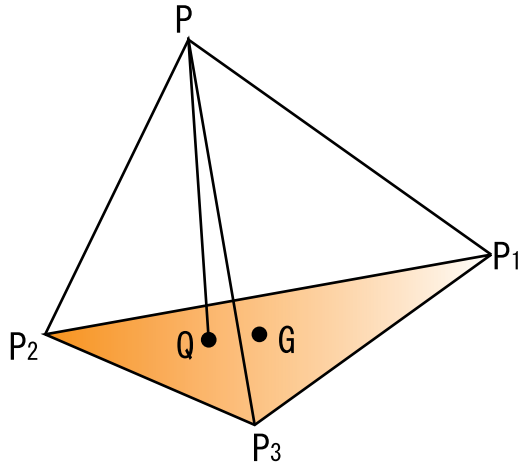


図 2: 局所的均一性 (local regularity)

面近似の例である。

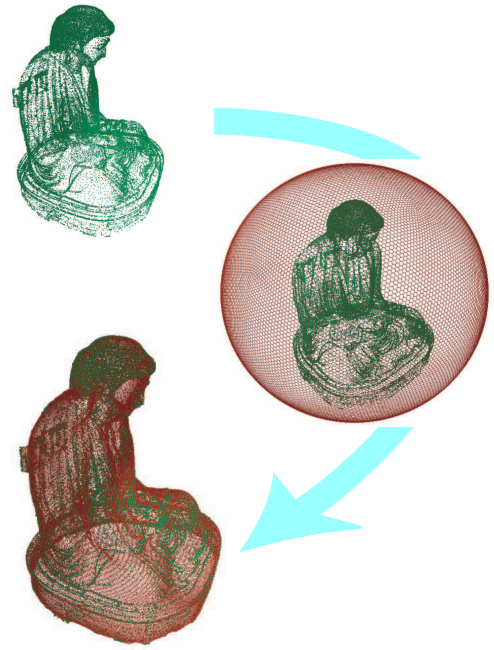


図 3: 鎌倉大仏のレンジデータからの表面近似

3 Spherical Attribute Image (SAI)

次に、変形して物体表面を近似したメッシュから安定して求められる曲率を定義しなければならない。ここでは近傍点との相対位置に関して simplex angle を定義する。

3.1 Simplex Angle

ノード P の近傍ノードを P_1, P_2, P_3 、正四面体 $PP_1P_2P_3$ の外接球を O 、 O と近傍三角形 $P_1P_2P_3$ の外接円の中心 C を通る直線を Z 、 P と Z を含む平面を Π (図 4 参照) とし、この平面 Π での切断面 (図 5 参照) を考える。この時、近傍三角形の外接円は P の対辺に対応している。

ここで我々は simplex angle を三角形の頂点 P の外角として定義した。これをノード P での曲率として取り扱う。

具体的に曲率 ϕ は、図 5 において、 P の対辺への投影点を Q とし、 $l = \overline{CQ}$ 、また、近傍円の半径を k とすると、

$$\phi = \arctan \frac{t}{k-l} + \arctan \frac{t}{k+l}$$

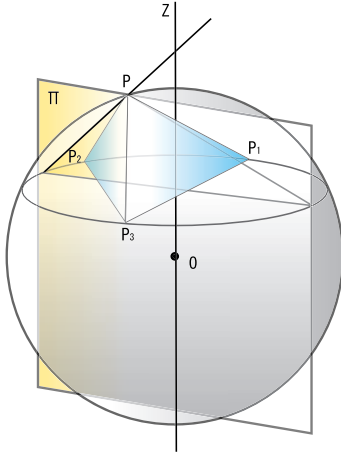


図 4: ノード P とその近傍点 P_1, P_2, P_3

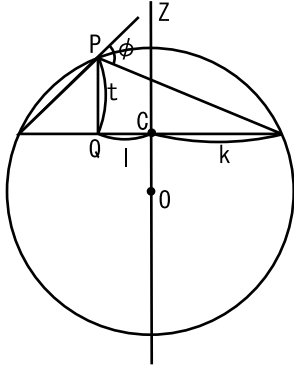


図 5: 図 4 の平面 Π での断面図

として求めることができる。

simplex angle の取りうる値の範囲は $-\pi$ から π までであり、その値が正の時は P は近傍のなす平面の外側 (凸状) に、負の時には内側 (凹状) に、0 の時には同一平面上に位置する。また、その値は P と近傍平面との距離に比例する。simplex angle は近傍平面との相対的な位置関係によって定義されているので、回転や平行移動、物体の大きさに依存しない。

3.2 SAIの生成:形状空間から SAIへ

物体全体の形状を把握するためには、simplex angle をメッシュ全体のノードで計算する必要がある。それらに対応するノードの単位球上にマッピングしたものを spherical attribute image(SAI) と呼ぶことにする (図 6 参照)。これを用いることによって物体の類似性

やマッチングを調べることができる。

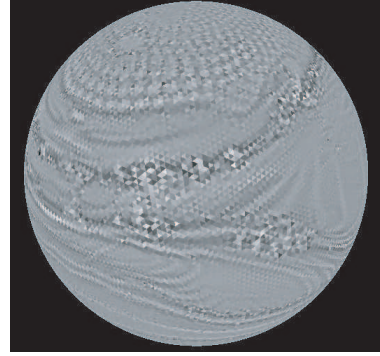


図 6: 図 3 で表面近似した鎌倉大仏の SAI

4 SAIからの形状復元:SAIから形状空間へ

これまで、物体の本質的な表現方法として、特殊な座標系上に曲率をマッピングすることについて述べた。逆にその曲率分布を初期メッシュに与えることによって形状復元できるだろうか?この問題について言及する。

この形状復元は、与えられた曲率と実際のメッシュの曲率との最小化問題として取り扱うことができる。しかし、この最小化問題は非線型方程式で表されるため複雑なので、deformable surface の変形の過程と同様、反復法を用いる必要がある。各ノードの動きは以下のようにモデル化されている。

$$m \frac{d^2 P_i}{dt^2} + k \frac{dP_i}{dt} = F$$

ここで、 m はノードの単位質量、 k はダンピング・ファクター、 F は与えられた曲率を満たすような復元力である。 i をノード番号、 t を時間として、これをオイラー法を使って離散的に表現すると、

$$P_i^{(t)} = (1 - k)(P_i^{t-1} - P_i^{t-2}) + F$$

となる。ここで F は反復の各段階で逐次変化する。

ところが、メッシュのノード数が n のときノードは 3 次元なので未知数は $3n$ である。それに対して n の方程式だけしか成立していないので、さらなる制約が必要となる。その制約の一つとして Delingette は、各ノードの近傍平面への投影点を近傍点のなす 2 つのベ

クトルで表現するという方法を考えた [11] (図 7 参照)。つまり、 P の投影点 Q は、

$$Q = \varepsilon_1 \vec{P_1} + \varepsilon_2 \vec{P_2} + \varepsilon_3 \vec{P_3},$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 1$$

と表されるので、

$$Q = P_1 + \varepsilon_2 \vec{P_1 P_2} + \varepsilon_3 \vec{P_1 P_3},$$

として、 $\varepsilon_2, \varepsilon_3$ をパラメタセットとして保持すれば $3n$ の未知数に対し $3n$ の方程式が成立することになる。

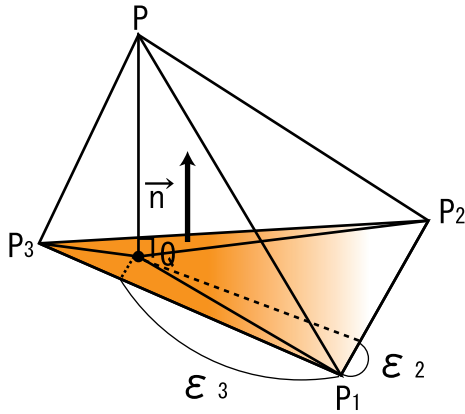


図 7: Delingette の制約

しかし、ここで我々は、メッシュの変形の過程で local regularity を用いた。local regularity とは、

$$Q = \frac{1}{3}(\vec{P_1} + \vec{P_2} + \vec{P_3})$$

つまり、

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{3}, \varepsilon_3 = \frac{1}{3}$$

である。よって、変形の過程で local regularity を用いると、曲率だけで形状の復元が可能になる。以下、 F の計算方法について述べる。

4.1 復元のためのメッシュの変形

メッシュのもとの形状への復元力は、以下の二つの力で構成される。まず第一にノードが与えられた曲率を満たすように近傍平面からの距離を保とうとする力である。これは simplex angle を求める式

$$\phi = \arctan \frac{t}{k-l} + \arctan \frac{t}{k+l}$$

を変形して、以下のように求められる。

$$t = \begin{cases} \frac{-\sqrt{k^2 - \tan^2 \phi (l^2 - k^2)} - k}{\tan \phi} & \text{if } \frac{\pi}{2} < |\phi| < \pi \\ \frac{\sqrt{k^2 - \tan^2 \phi (l^2 - k^2)} - k}{\tan \phi} & \text{if } 0 < |\phi| < \frac{\pi}{2} \\ -\sqrt{k^2 - l^2} & \text{if } \phi = -\frac{\pi}{2} \\ \sqrt{k^2 - l^2} & \text{if } \phi = \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{if } \phi = 0 \end{cases}$$

第二に、local regularity を満たす力である。この二つの力を反復の各段階で逐次計算する。

図 8 は図 6 の SAI を初期メッシュに与えて復元した結果である。

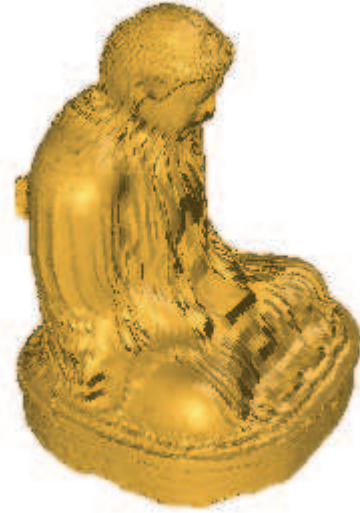


図 8: 鎌倉大仏の SAI からの形状復元

5 SAI からの中間形状の生成

これまで、deformable surface で物体表面を近似し、物体形状を SAI で表現し、逆に SAI から deformable surface を用いて形状復元できることを示した。ここでは SAI により、曲率の観点から 2 物体間の形状のマッチングを取り、その対応のもとで 2 つの SAI を線形補間した新たな SAI を形状復元することで、2 物体間の中間形状を作成することを考える。

5.1 SAI 上での形状マッチング

二つの SAI が与えられると、それらの対応は以下の性質に基づいて計算することができる。

- トポロジーが固定されている。
- 各ノードは近傍の 3 つのノードと接続している。

つまり 2 物体間の対応は、3 つのノードの対応が決まると計算できる。図 9 に示すように、形状 A のノード P と、形状 B のノード P' が対応しているときに、マッチングは P の近傍ノード P_1, P_2, P_3 と P' の近傍ノード P'_1, P'_2, P'_3 間の 3 回転でのマッチングがあり、ノード数 n の時 $3n$ のマッチングで全ての対応計算が終える。2 物体間の形状マッチングは、 $3n$ のマッチングの時に、対応しているノード間の曲率の差の総和を計算して、その総和が最小になるようなマッチングを 2 物体間の最適なマッチングとする。

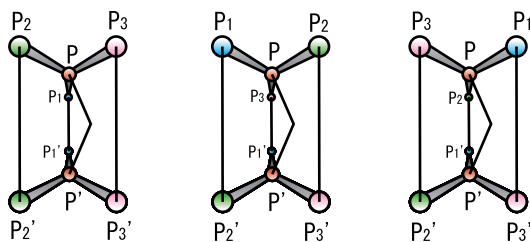


図 9: ノード P と P' が対応しているときの 3 通りのマッチング

5.2 線形補間 SAI からの形状復元

2 物体間の中間形状を表す deformable surface の各ノードの曲率は、上で述べた最適マッチングのもとで対応しているノードの曲率を線形補間したものである。つまり、物体 A の i 番目のノードの曲率 ϕ_{A_i} と物体 B の i 番目のノードの曲率 ϕ_{B_i} によって、中間形状 C の i 番目のノードの曲率は、

$$\phi_{C_i} = (1 - t)\phi_{A_i} + t\phi_{B_i}, t \in [0, 1], i = 1 \dots n$$

と表される。

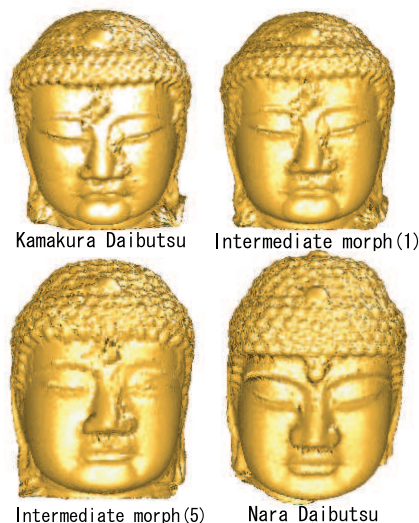


図 10: 鎌倉大仏と奈良大仏の中間画像の生成

6 実験

図 10 は鎌倉大仏と奈良大仏のモーフィングである。鎌倉大仏と奈良大仏のデータはレーザーレンジファインダーから得られた複数のレンジデータをアラインメント、マーキングして構築された [14] [15]。レンジデータ点数 90859 点に対し、deformable surface は正 20 面体を 63 分割してつくられ、ノード数は 79380 個である。このメッシュで近似したあとに SAI を作成し、マッチングを取って線形補間した SAI を作成し、それを形状復元した中間形状である。モーフィングは、対応するノードの動きを追跡することで行った。

7 まとめ

本研究では、deformable surface を用いて物体の表面を近似し、メッシュ全体にわたって曲率を計算することで、物体の位置・姿勢や大きさによらない本質的な形状表現として SAI を導入することを提案した。また、2 次元のモーフィングとは異なり、対応を取ることが難しいとされてきた 3 次元モーフィングが、SAI を用いることによって容易に、かつ自動的になされることを示した。

今後は、deformable surface での物体の表面近似、復元の過程での変形の終了条件について研究し、モーフィングの全自動化を目指す予定である。また、ジーンラス

0 以外のトポロジーの物体に関してもこの 3 次元形状操作が適応できるようにする予定である。さらに最終的には文化財等の復元のため、2 次元画像から 3 次元モデルを構築する手法を考える予定である。

参考文献

- [1] Gauss, K. F., “General Investigations of Curved Surfaces”, Raven Press, New York, 1965.
- [2] Lysternik, L. A., “Convex Figure and Polyhedra”, Dover Publications, New York, 1963.
- [3] Ikeuchi, K., “Recognition of 3-D Objects using the Extended Gaussian Image”, Proc. of Intern. Joint Conf on Artificial Intelligence, Vancouver, B. C., pp.595-600, August 1981.
- [4] Nalwa, V. S., “Representing Oriented Piecewise C2 Surfaces,” Proc. 2nd Intern. Conf. on Computer Vision, pp.40-51, December 1988.
- [5] K. Higuchi, M. Hebert, and K. Ikeuchi, “Building 3-D Models from Unregistered multiple range images”, Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol. J79D-II(8), No. 8, pp. 1354-1361, August 1996.
- [6] H. Shum, M. Herbert, and K. Ikeuchi, “On 3D Shape Synthesis”, CMU-CS-95-213, November 1995.
- [7] M. Hebert, K. Ikeuchi and H. Delingette, “A Spherical Representation for Recognition of Free-Form Surfaces”, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 17, No. 7, July 1995.
- [8] K. Ikeuchi and M. Hebert, “Spherical Representations: from EGI to SAI”, CMU-CS-95-197, October 1995.
- [9] Paul J. Besl, Member, IEEE, and Neil D. McKay, “A Method for Registration of 3-D Shapes”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, February 1992.
- [10] H. Shum, M. Hebert, K. Ikeuchi, “On 3D Shape Similarity”, CMU-CS-95-212, November 1995.
- [11] H. Delingette, “Simplex Meshes: a General Representations for 3D Shape Reconstruction”, INRIA report 2214, January 1995.
- [12] J. H. Friedman, J. L. Bentley and R. A. Finkel: “An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time” ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 3, No. 3, pp.209-226, September 1977.
- [13] Heung-Yeung Shum, “Modeling from Reality: Representation and Integration” PHD. Thesis, Carnegie Mellon University, July 1996.
- [14] Taku Nishikawa, Ko Nishino, Yoichi Sato, and Katsushi Ikeuchi, “Constructing a 3D Model Using a High Resolution Range Sensor”, Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan Fourth Annual Conference, pp.199-202, September, 1999.
- [15] M.D. Wheeler, Y. Sato, K. Ikeuchi, “Consensus surfaces for modeling 3D objects from multiple range images”, Proc. International Conference on Computer Vision, January 1998.