

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2009年11月26日(26.11.2009)

PCT

(10) 国際公開番号

WO 2009/142037 A1

- (51) 国際特許分類:
G06F 17/50 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2009/053252
- (22) 国際出願日: 2009年2月24日(24.02.2009)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2008-135643 2008年5月23日(23.05.2008) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 国立大学法人横浜国立大学(NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION YOKOHAMA NATIONAL UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒2408501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号 Kanagawa (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 前川 卓 (MAEKAWA, Takashi) [JP/JP]; 〒2408501 神奈川県

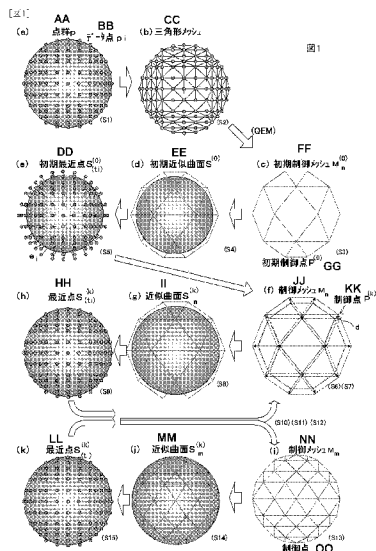
横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号 国立大学法人横浜国立大学内 Kanagawa (JP). 西山 悠 (NISHIYAMA, Yuu) [JP/JP]; 〒2408501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号 国立大学法人横浜国立大学内 Kanagawa (JP). 森岡 真之 (MORIOKA, Masayuki) [JP/JP]; 〒2408501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号 国立大学法人横浜国立大学内 Kanagawa (JP).

- (74) 代理人: 塩野入 章夫 (SHIONOIRI, Akio); 〒2510024 神奈川県藤沢市鵠沼橋1丁目1番4号 藤沢セントラルビル6階 Kanagawa (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT,

[続葉有]

(54) Title: APPROXIMATION PROCESSING METHOD AND APPROXIMATION PROCESSING DEVICE

(54) 発明の名称: 近似処理方法、および近似処理装置



AA POINT GROUP p
 BB DATA POINT p_i
 CC TRIANGLE MESH
 DD INITIAL CLOSEST POINT $S^{(0)}$ (tt)
 EE INITIAL APPROXIMATED CURVED SURFACE $S^{(0)}$
 FF INITIAL CONTROL MESH $M_n^{(0)}$
 GG INITIAL CONTROL POINT $P^{(0)}$
 HH CLOSEST POINT $S^{(k)}$ (tt)
 II APPROXIMATED CURVED SURFACE $S^{(k)}$
 JJ CONTROL MESH M_n
 KK CONTROL POINT $P^{(k)}$
 LL CLOSEST POINT $S^{(k)}$ (tt)
 MM APPROXIMATED CURVED SURFACE $S^{(k)}$
 NN CONTROL MESH M_m
 OO CONTROL POINT

(57) Abstract: An approximation processing method for approximating a point group by a curved line or curved surface defined by a control point is equipped with a process of forming an approximated curved line (or approximated curved surface) using the control point for reserving the characteristics of a shape, a first calculation process for calculating points closest to data points on the approximated curved line (or approximate curved surface), a second calculation process of calculating error vectors connecting the data points, from the points closest to the data points which have been obtained in the first calculation process, and a third calculation process of moving the control point based on the error vectors obtained in the second calculation process and calculating the modified control point. By repeating the process of forming an approximated curved line (or approximated curved surface) and the first to third calculation processes, the approximated curved line (or approximated curved surface) is approximated to a curved line (or curved surface) consisting of the data points. By calculating the control point using a simple geometrical algorithm in the modification of the control point, the number of times of calculations for making the control point converge is reduced and thereby a curved line or curved surface which approximates the data points, which are a point group, can be generated in a short time without solving a linear system.

(57) 要約:

[続葉有]



WO 2009/142037 A1



RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY,
TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN,
ZA, ZM, ZW.

GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL,
NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF,
CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD,
TG).

- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,

添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

制御点により定義される曲線又は曲面で点群を近似する近似処理方法において、形状の特徴を保存する制御点を用いて近似曲線 (近似曲面) を形成する工程と、近似曲線 (近似曲面) 上において、データ点に最も近い最近点を算出する第 1 の算出工程と、第 1 の算出工程で求めた最近点からデータ点を結ぶ誤差ベクトルを算出する第 2 の算出工程と、第 2 の算出工程で求めた誤差ベクトルに基づいて制御点を移動し修正後の制御点を算出する第 3 の算出工程とを備える。近似曲線 (近似曲面) の形成工程と第 1 ～第 3 の算出工程を繰り返し、近似曲線 (近似曲面) をそれぞれ対象とするデータ点が構成する曲線 (曲面) に近似させる。制御点の修正において、制御点の算出を単純な幾何アルゴリズムで行うことによつて、制御点が収束する演算回数が低減し、線形システムを解くことなく短時間で点群のデータ点を近似する曲線又は曲面を生成する。

明 細 書

近似処理方法、および近似処理装置

技術分野

[0001] 本発明は、点群データを近似して曲線あるいは曲面を生成する近似処理方法、近似処理装置に関する。

背景技術

[0002] 自由曲面は、船、自動車、飛行機等、様々な工業製品のボディに用いられており、機能性と美しさの両方を兼ね備えるものであり、家庭電気製品や多くの消費材の外観など意匠的に美しい形状のデザイン設計に用いられる。

[0003] 近年、3Dレーザスキャナによって高密度の点群データを高速かつ容易に収集することができるようになり、物体形状を高精度で測定できることが可能と成っている。例えば、3Dモデリングの分野においては、デザイナーが手作業で作成したモックアップモデルを3Dレーザスキャナで計測し、コンピュータに取り込んだ点群データやポリゴンデータをもとに製品として生産するために必要な曲面データなどのCADデータを作成していくという、いわゆるリバースエンジニアリングの手法が行われている。

[0004] 一般に、3DモデルはポリゴンモデルまたはNURBSやB-Splineなどの曲面パッチによりコンピュータ上で表現される。

[0005] このポリゴンモデルは位相変化などの形状処理を行う上で効率的であるが、平面で構成されるため滑らかな表面を表現することができず、さらに形状を詳細に表現するほどデータ量が膨大になるなどの問題がある。

[0006] 曲面パッチは少ない制御パラメータで滑らかな曲面が表現できる反面、パッチ形状が四角形に限定される上にパッチ間の連続性を保つことが困難であるなどの問題がある。そこで、ポリゴンモデルと曲面パッチの利点を併せ持つ細分割手法が自由な幾何形状モデリングの有効な手法として注目されており、すでにアニメーションの分野では盛んに利用されている。

[0007] 細分割手法とは、初期ポリゴンメッシュに対して繰り返し規則的な分割を行うことによりその形状を滑らかにし、究極的には滑らかな曲面を得る手法である。その分割に

よる曲面は細分割曲面 (Subdivision Surface) と呼ばれ、究極的な曲面は極限曲面と呼ばれる。細分割手法は任意の位相を持つモデルに対しても簡単に滑らかな曲面を生成できるという特徴を持ち、さらにどの部分においても曲面が滑らかなに定義されるためモデリングなど幅広い利用が進んでいる。

- [0008] リバーズエンジニアリングの分野において、従来、細分割曲面、B-Spline、NURBS等を用いることによって、測定した点群データを近似して曲面を生成する方法が提案されている。点群のデータ点を近似あるいは補間する従来提案される方法では、データ点から得られる初期制御点と生成される曲面との距離誤差が最小となるように制御点を逐次求める演算処理を行っている。この制御点を求める演算は、点群の列をS、この点群を近似する曲面と生成するための制御点の列をP、曲面を定める基底関数マトリックスをAとしたとき、 $AP=S$ で表される線形の行列式を解くことで行われる。
- [0009] 従来提案されている近似方法として、例えば、Halstedらが提案する多面体メッシュに対するCatmull-Clark細分割曲面の補間手法が知られている(非特許文献1)。この手法は大規模な線形システムを解く必要があるばかりでなく、さらにフェアリングと呼ばれる曲面修正のために最小化問題を解く必要があり、非常に計算コストが大きくなる。
- [0010] また、Hoppeらは、点群のデータ点に対するLoop細分割曲面の近似手法として、細分割操作を行ったポリゴンメッシュを線形近似した細分割曲面とみなし、その曲面に対して各点からの正射影を行うことでパラメータ化し、各点とそれに対する線形近似した細分割曲面上の点との距離が最小となる最小自乗問題として扱う手法を提案している。(非特許文献2)
- [0011] Hoppeら(非特許文献2)の方法は線形近似した面でパラメータ化を行っているのに対し、MarinovとKobbeltはStamの理論を用いて極限曲面上でパラメータ化を行っている。しかし、制御点の算出には大規模な線形システムを解いており多大な時間を要する。(非特許文献8)
- [0012] SDM法(Squared Distance Minimization)を応用し、点群にLoop細分割曲面をフィットさせる方法が提案されている。この方法では、初期曲面から二乗距離関数を局所的に二次近似した目的関数を逐次的に変形させ目標曲面に変形させている。この方

法も線形システムを解いているため計算に多大な時間を要している。(非特許文献9)

- [0013] また、B-Spline曲線、曲面の補間において与えられた点群とその点群より生成された曲線、曲面のノットの関係を利用した手法が提案されている。この方法では、与えられた点群とノットとの距離を移動ベクトルとし、そのベクトル分対応する制御点を移動させ、この処理を点とノットとの距離が0になるまで繰り返す。ただし、両端で2重制御点を採用しているため、CADデータには利用できない。また、ノットとの誤差ベクトルを用いるため、うねりを生じる場合も出てくる。(非特許文献10)
- [0014] 非特許文献1:M.Halsted, M.Kass and T.DeRose.Efficient,fair interpolation using Catmull-Clark surfaces.In Eugene Fiume,editor.Proceedings of SIGGRAPH 1993,pages 47-61.ACM,ACM Press / ACM SIGGRAPH, 1993
- 非特許文献2:H.Hoppe, T.DeRose, T.Duchamp and M.Halsted. Piecewise smooth surface reconstruction.In Proceedings of SIGGRAPH 1994,pages 47-61.ACM,ACM Press / ACM SIGGRAPH, 1994
- 非特許文献3:M.Garland and P.S.Heckbert.Surface simplification using quadric error metrics. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 97,209-216.
- 非特許文献4:C.T.Loop.Smooth subdivision surface based on triangle. Masters thesis, Department of Mathematics. University of Utha.1987/.
- 非特許文献5:E.Catmull and J.Clark. Recursively generated b-spline surfaces on arbitrary topological meshes.Computer-Aided Design,10(6):350-355,1987.
- 非特許文献6:D.Doo and M.Sabin. Behavior of recursive division surfaces near extraordinary points.Computer-Aided Design,10(6):356-360,1978.
- 非特許文献7:G.M.Chaikin.An algorithm for high-speed curve generation. Computer Graphics and Image Processing,3:346-349,1974.
- 非特許文献8:M.Marinov and L.Kobbelt, Optimization methods for scattered data approximation with subdivision surface,Graphical Models 67,2005,452-473.
- 非特許文献9:K-S.D.Cheng, Wang.W, Qin.H, K-Y.K.Wong, Yang.H and Liu.Yang. 2007.Design and analysis of optimization methods for subdivision surface fitting. IEE

E Transaction on Visualization and Computer Graphics 13,5,878-890.

非特許文献10:Lin. H, Wang. G, and Dong. C. 2003. Constructing iterative non-uniform B-spline curve and surface to fit data points. Science in China 33, 912-923.

発明の開示

発明が解決しようとする課題

- [0015] 上記した、細分割曲面、B-Spline、NURBS等を用いて点群のデータ点を近似する従来提案される方法において、近似あるいは補間の演算を行列表を解くといった線形システムの解法を用いる方法では、その線形システムの演算の性質上、点群のデータ点及び制御点の個数が増加するほど演算回数が増加する。一般に、3Dモデリングに要する点群及びこの点群から形成される制御点の個数は多数であるため、点群から曲面を生成する演算は大規模な線形システムを解く演算となり、多大な計算時間を要するという問題がある。
- [0016] さらに、円滑な曲面を得るには、初期制御点と生成される曲面との距離誤差が最小となるまで、大規模な線形システムを解く演算処理を繰り返す必要があり、所望とする円滑な曲面を得るには膨大な時間を要することになる。
- [0017] そこで、本発明は前記した従来の問題点を解決し、点群のデータ点を近似する曲線又は曲面の生成において、演算時間を短縮することを目的とし、線形システムを解くことなく点群を近似する曲線又は曲面を生成する方法及び装置を提案することを目的とする。

課題を解決するための手段

- [0018] 本発明は、点群のデータ点の形状を曲線又は曲面で近似する近似処理において、点群のデータ点によって形成される折線あるいはメッシュから、形状の特徴を保持した特徴点を選択して制御点とし、この制御点によって曲線又は曲面を近似する。本発明は、この制御点を順次修正して近似度を高める際に、修正した各制御点の算出を単純な幾何アルゴリズムによって行うことによって、線形システムを解くための多大な計算時間を要すること無く短時間で近似を可能とするものである。
- [0019] なお、制御点によるフィッティングでは補間手法と近似手法が知られているが、補間手法はデータ点のデータ数と同数の制御点によって点群のデータ点をフィッティング

するのに対して、近似手法ではデータ点のデータ数より少ない制御点によって数で点群のデータ点をフィッティングするものである。

[0020] 点群のデータ点から形状を保持して制御点を選択する手法としてQEM (Surface simplification using quadric error metrics: 非特許文献3)を用いることができる。

[0021] 本発明は、点群のデータ点を開始データとし、このデータ点からQEM等の処理によって制御点を求め、算出工程によって制御点を順次修正する他、点群のデータ点とこのデータ点から選択した制御点とが既知である場合には、算出工程によって既知の制御点から順次修正してもよい。この制御点が既知である場合には、点群のデータ点から制御点を選択する処理を省くことができる。

[0022] 本発明において、制御点の移動は、与えられた点群の各データ点に対して最も近い曲線又は曲面上の最近点をニュートン法によって算出し、算出した最近点から各データ点に結ぶ誤差ベクトルを求め、この誤差ベクトルによって制御点を逐次的に移動させて近似を行う。この制御点を移動する処理は、線形システムを解くことなく幾何アルゴリズムの処理で行うことができるため、高速処理を行うことができる。

[0023] 本発明の方法は幾何アルゴリズムの処理で各制御点を扱うことになるため、線形システム自体を必要としない上に、幾何的なプロセスのみで近似曲線又は近似曲面を生成することができる。したがって、従来の方法と比べ処理を高速化することができる。

[0024] なお、本発明は、三次元に限らず二次元についても同様に適用することができ、三次元上の点群のデータ点を近似する細分割曲面を生成するほか、二次元上の点群のデータ点を近似する曲線の生成にも適用することができる。

[0025] また、本発明は、近似処理に関して、方法および装置の態様とすることができる。近似処理装置は、この近似処理方法をソフトウェアあるいはハードウェアによって実行させるための各手段を備える。

[0026] 本発明の近似処理方法は、制御点により定義される曲線又は曲面によって点群のデータ点を近似する近似処理方法において、形状の特徴を保存する制御点を用いて近似曲線又は近似曲面を形成する工程と、制御点の修正位置を算出する算出工程とを備える。

- [0027] 制御点の修正位置を算出する算出工程は、近似曲線又は近似曲線上においてデータ点に最も近い最近点を算出する第1の算出工程と、第1の算出工程で算出した最近点からデータ点を結ぶ誤差ベクトルを算出する第2の算出工程と、第2の算出工程で求めた誤差ベクトルに基づいて制御点を移動して修正後の制御点を算出する第3の算出工程とを含む。
- [0028] 近似曲線又は近似曲面を形成する工程および各算出工程は、幾何アルゴリズムが組み込まれた演算手段により行うことができる。幾何アルゴリズムにより近似曲線又は近似曲面の形成工程と第1～第3の算出工程を繰り返すことによって、近似曲線又は近似曲面をそれぞれ対象とするデータ点が構成する曲線又は曲面に近似させる。
- [0029] 本発明の近似処理方法に用いる点群のデータ点は、例えば、三次元形状計測器等によって取得することができる。最初の制御点は、与えられた点群のデータ点を結んで折れ線又はメッシュを形成し、この折れ線又はメッシュからQEM等の処理によって形状の特徴を保存した点を選択することで取得することができる。この点を初期制御点として、第1～第3の算出工程によって制御点の位置を修正する。
- [0030] この制御点の修正位置を算出する算出工程は単純な幾何処理であるため、従来の方法で必要な線形システムを解く必要がなくなる。
- [0031] 第1の算出工程は、ニュートン法によって近似曲線又は近似曲線上においてデータ点に最も近い最近点を算出することができる。
- [0032] 第2の算出工程は、点群の全データ点において、各データ点についてそのデータ点と最近点とを結ぶ誤差ベクトルを算出する工程である。
- [0033] 第3の算出工程は、第2の算出工程で算出した誤差ベクトルに基づいて各制御点を移動することによって修正した制御点を算出する工程であり、第2の算出工程で算出した複数の誤差ベクトルの内、修正を行う制御点の周囲にある最近点について算出した誤差ベクトルに重み付け処理を行い、この重み付けした誤差ベクトルをベクトル加算し、ベクトル加算で得た加算ベクトルを移動ベクトルとして、修正対象の制御点を移動し、移動後の制御点を修正制御点として算出する。
- [0034] 制御点の移動に用いる誤差ベクトルは、第2の算出工程において制御点の周囲の最近点で算出した誤差ベクトルをベクトル加算することで求める。このベクトル加算に

において、誤差ベクトルに重み付けを行うことによって、制御点が収束するまでの演算回数を低減させることができる。

- [0035] 第3の算出工程における重み付け処理は、各誤差ベクトルに係数を乗じる演算処理によって行うことができる。この係数は制御点と最近点との距離に応じて定め、制御点に近い最近点により大きな値を設定し、制御点から遠い最近点により小さな値を設定することによって重み付けを行う。制御点に近い最近点ほど制御点との関連性が高いと想定され、制御点に近い最近点の誤差ベクトルに対して大きな値の係数で重み付けすることで、制御点が収束するまでの演算回数を低減させることができる。
- [0036] 重み付けを行う係数は、重心座標系(barycentric coordinate)に従って定めることができる。
- [0037] 本発明の近似処理は、データ点とこのデータ点に対応する最近点との距離に基づいて、近似曲線又は近似曲面の近似誤差を算出し、算出した近似誤差が所定値未満となるまで制御点の算出処理を繰り返す。
- [0038] 近似曲面の形成において、制御点の移動による近似処理を所定回数繰り返しても近似誤差が所定値未満とならない場合には、制御点で形成されるメッシュの面分割を行って、制御点数を増加させたり、制御点で形成されるメッシュを局所的に再メッシュ化する。近似誤差が所定値未満となるまで制御点の算出工程と、面分割による制御点の増加や局所的な再メッシュ化とを繰り返す。
- [0039] また、近似曲線の形成において、制御点の移動による近似処理を所定回数繰り返しても近似誤差が所定値未満とならない場合には、ノット挿入によって制御点数を増加させる。近似誤差が所定値未満となるまで制御点の算出工程と制御点の増加とを繰り返す。
- [0040] 本発明の近似処理装置は、制御点により定義される曲線又は曲面によって点群のデータ点を近似する近似処理装置であり、形状の特徴を保存する制御点を用いて近似曲線又は近似曲面を形成する工程と、近似曲線又は近似曲面上において、データ点に最も近い最近点を算出する第1の算出工程と、第1の算出工程で求めた最近点からデータ点を結ぶ誤差ベクトルを算出する第2の算出工程と、第2の算出工程で求めた誤差ベクトルに基づいて制御点を移動し修正後の制御点を算出する第3の算

出工程の各工程を行う演算手段を備える。

[0041] 演算手段は、近似曲線又は近似曲面を形成する工程、および各算出工程を行う幾何アルゴリズムをソフトウェアで実行するためのCPU及び記憶装置、又は各幾何アルゴリズムをハードウェアで実行するための回路によって構成することができる。近似曲線又は近似曲面の形成工程と第1～第3の算出工程の演算を繰り返して行うことによって、近似曲線又は近似曲面をそれぞれ対象とするデータ点が構成する曲線又は曲面に近似させる。

[0042] 曲面は、三角形メッシュによるLoop細分割(非特許文献4)、B-Spline、NURBS、四角形メッシュによるCatmull-Clark細分割(非特許文献5)、Doo-Sabin細分割(非特許文献6)等の細分割等で定められる制御点により定義することができる。

[0043] また、曲線については、B-Spline曲線や、Chaikin細分割(非特許文献7)で定められる制御点により定義することができる。なお、Chaikin細分割は2次のB-Spline曲線に収束し、一般的にn次のB-Spline曲線についても近似を行うことができる。

発明の効果

[0044] 以上説明したように、本発明によれば、点群のデータ点を近似する曲線又は曲面の生成において、演算時間を短縮することができる。

[0045] また、本発明によれば、線形システムを解くことなく点群のデータ点を近似する曲線又は曲面を生成することができる。

図面の簡単な説明

[0046] [図1]本発明の近似処理の概略を説明するための概略図である。

[図2]本発明の近似処理の概略を説明するためのフローチャートである。

[図3]本発明の近似処理装置の概略構成図である。

[図4]本発明の近似処理を実施する工程を説明するための概略図である。

[図5]本発明の近似処理を実施する工程を説明するための概略図である。

[図6]近似曲面 $S^{(k)}$ 上の最近点 $S_i^{(k)}(t_i)$ を説明するための図である。

[図7]本発明の近似処理を実施する工程を説明するためのフローチャートである。

[図8]誤差ベクトル $e_i^{(k)}$ の重み付けを説明するための図である。

[図9]制御点の周りの誤差ベクトル $e_{ij}^{(k)}$ を説明するための図である。

[図10]制御点Pの増加を説明するための図である。

[図11]局所的な再メッシュの一例を説明するための図である。

[図12]局所的な再メッシュの一例を説明するための図である。

[図13]本発明による結果例を示す図である。

[図14]本発明の近似処理の一実施例を示す図である。

[図15]本発明のB-Spline曲線の近似における重み付けを説明するための図である。

符号の説明

- [0047] 1…入力手段
2…記憶手段
2a…データ記憶部
2b…演算ツールプログラム記憶部
2c…演算プログラム処理プログラム部
2d…一次記憶部
2e…演算記憶部
3…演算手段
4…表示手段
5…出力手段

発明を実施するための最良の形態

[0048] 以下、本発明の実施の形態について、図を参照しながら詳細に説明する。

[0049] 図1は本発明の近似処理の概略を説明するための概略図、図2は本発明の近似処理の概略を説明するためのフローチャート、図3は本発明の近似処理装置の概略構成図である。

[0050] 図1, 図2は、点群Pのデータ点 p_i から近似曲面 S^∞ を求める手順を概略的に示している。なお、ここでは、3Dレーザスキャナ(3次元形状計測器)等から得られた高密度・不規則な点群Pのデータ点 p_i から開始し、この点群Pのデータ点 p_i で形成されるメッシュからQEM等の手法によって形状の特徴を表す制御点を求め、この制御点から最終的な近似曲面 S^∞ を得る手順によって示している。

[0051] また、点群のデータ点とこのデータ点から選択した制御点とが既知である場合には

、既知の制御点を用いて順次修正し近似曲面 S^∞ を得る手順に適用してもよい。

[0052] なお、ここでは、主に曲面について説明するが、曲線についても同様に扱うことができる。また、以下のフローチャートでは、データ点を測定する工程から開始する場合について示している。

[0053] はじめに、3Dレーザスキャナ等の三次元計測器によって対象物を測定し点群 p のデータ点 p_i を求める(図1(a))(S1)。測定して得られた点群 p のデータ点 p_i を連結してメッシュ化する。ここでは三角形メッシュの例を示している(図1(b))(S2)。

[0054] データ点 p_i により形成される三角形メッシュから、元の対象物の形状特徴を保持しつつ簡略化し制御点とする。この制御点により制御メッシュが形成される。メッシュは三角形メッシュや四角形メッシュを用いることができる。この特徴を残すメッシュの簡略化の処理は、例えば、QEM等の既存の手法を用いることができる。

[0055] ここで、最初の制御点 $P^{(0)}$ から形成したメッシュを初期制御メッシュ $M_n^{(0)}$ とし、以後、制御点を変更して得られるメッシュを制御メッシュ M_n とする。ここで、添え字の0は初期段階を表し、 n は制御点数を表すものとする(図1(c))(S3)。

[0056] 初期制御メッシュ $M_n^{(0)}$ の制御点 $P^{(0)}$ を用いて初期近似曲面 $S^{(0)}$ を生成する(図1(d))(S4)。S4で生成した初期近似曲面 $S^{(0)}$ 上において点群 p の各データ点 p_i に対応する初期最近点 $S^{(0)}(t_i)$ を求める(S5)。

[0057] この初期最近点 $S^{(0)}(t_i)$ からデータ点 p_i に対する誤差ベクトル e_i を求め(図1(e))、初期制御点 $P^{(0)}$ の周囲に存在する誤差ベクトル e_i を用いて初期制御点 $P^{(0)}$ の位置を移動する移動ベクトル d を求める。初期制御点 $P^{(0)}$ の周囲に複数の誤差ベクトル e_i が存在する場合には、これらの複数の誤差ベクトル e_i をベクトル加算して移動ベクトル d を求める(S6)。

[0058] 求めた移動ベクトル d によって初期制御点 $P^{(0)}$ の位置を移動し、位置を修正した制御点を制御点 $P^{(k)}$ とする(S7)。

[0059] 次回の処理では、最近点 $S^{(k)}(t_i)$ からデータ点 p_i に対する誤差ベクトル e_i を求め(図1(e))、制御点 $P^{(k)}$ の周囲に存在する誤差ベクトル e_i を用い、複数の誤差ベクトル e_i が存在する場合には、これらの複数の誤差ベクトル e_i についてベクトル加算し、制御点 $P^{(k)}$ の位置を移動する移動ベクトル d を求め(S6)、求めた移動ベクトル d によって制御

点 $P^{(k)}$ の位置を移動し、位置を修正した制御点を制御点 $P^{(k+1)}$ とする(図1(f))(S7)。

[0060] なお、制御点 $P^{(k)}$ の添え字(k)は繰り返しの回数を表し、(k)回目の工程で得られる制御点を $P^{(k)}$ で表している。初期制御点 $P^{(0)}$ は添え字(0)を上付して表し、その後に繰り返して得られる制御点 $P^{(k)}$ の添え字(k)は繰り返し毎に“1”増やすことによって、繰り返し回数を添え字(k)の“k”の数値で表すことができる。

[0061] 移動ベクトル d によって移動して得られた制御点 $P^{(k)}$ を用いて近似曲面 $S^{(k)}$ を生成する(図1(g))(S8)。S8で生成した近似曲面 $S^{(k)}$ 上において点群 p の各データ点 p_i に対応する最近点 $S^{(k)}(t_i)$ を求める(S9)。

[0062] 上記したS6～S9の工程を繰り返すことによって、制御点 $P^{(k)}$ を順次移動して修正することによって近似曲面 $S^{(k)}$ を対象体の形状に近似させる。

[0063] 近似曲面 $S^{(k)}$ が対象体の形状に近似したか否かの評価は以下のS10～S11の工程で行い、近似曲面 $S^{(k)}$ の近似の程度が予め定めた許容値を満足しない場合には、S6～S9の工程を繰り返して行う制御点の移動、あるいは、S13～S15の工程によってメッシュの分割によって制御点を増加させる。

[0064] 近似曲面 $S^{(k)}$ が対象体の形状に近似したか否かの評価は、最近点 $S^{(k)}(t_i)$ とデータ点 p_i と絶対値誤差から誤差 E を求め(S10)、求めた誤差 E を予め定めておいた許容値と比較し(S11)、誤差が許容値内とならない場合には、S6～S9の工程を繰り返して制御点の移動することで近似の程度を向上させ、また、S13～S15の工程によってノットの挿入によって制御点を増加させる。

[0065] S13～S15の工程によるメッシュの分割は、S6～S9の工程を設定回数分繰り返しても誤差が許容値内とならない場合に行う(S12)。

[0066] S12において、S6～S9の工程を設定回数分繰り返しても誤差が許容値内とならない場合には、制御メッシュ M_n において、誤差が許容値内とならない箇所の制御メッシュを分割し(図1(i))(S13)、分割で得られた制御メッシュ M_m を用いて近似曲面 S_m を求める(図1(j))(S14)。なお、ここで、制御メッシュ M_m の添え字“m”は制御メッシュ M_n と異なるメッシュ構成であることを表し、近似曲面 S_m は制御メッシュ M_m を用いて形成した近似曲面であることを表している。

[0067] 求めた近似曲面 S_m について最近点 $S(t_i)$ を求め(図1(k))(S15)、S6に戻り制御メッシ

μM_m の移動ベクトル d の算出を行う。

- [0068] 近似処理によって距離誤差が許容範囲内に収束したときに得られる近似曲面 S^∞ は、点群 p のデータ点 p_i を近似する近似曲面となる。
- [0069] 本発明の工程は幾何アルゴリズムの演算によって行われる。例えば、S5, S9の工程では、初期近似曲面 $S^{(0)}$ あるいは近似曲面 $S^{(k)}$ 上において、データ点 p_i に最も近い初期最近点 $S^{(0)}(t_i)$ あるいは最近点 $S^{(k)}(t_i)$ をニュートン法で算出し、S7の工程では、データ点 p_i と最近点 $S^{(k)}(t_i)$ との誤差ベクトル e_i を求め、この誤差ベクトル e_i を用いて制御点 $P^{(k)}$ を移動する制御ベクトル d を求める。求めた制御ベクトル d によって制御点 $P^{(k)}$ を移動し、S8の工程では移動した制御点 $P^{(k+1)}$ を用いて近似曲面 $S^{(k+1)}$ を求める。
- [0070] なお、曲面を細分割処理する場合には、例えば、三角形メッシュによるLoop細分割、四角形メッシュによるCatmull-Clark細分割、Doo-Sabin細分割等を用いることができ、また、B-Spline曲面についても適用することができる。また、曲線の細分割として、例えば、Chaikin細分割を用いることができる他、 n 次のB-Spline曲線についても適用することができる。なお、Chaikin細分割は2次のB-Spline曲線に収束する。
- [0071] 本発明の近似処理によれば、計算コスト、演算の一般性の点で以下の利点がある。本発明の近似処理では、制御点の修正を幾何アルゴリズムによって行うことによって、線形システムを解く必要がないため、処理の演算速度を向上させることができる。
- [0072] また、本発明の近似のアルゴリズムは、単純な幾何プロセスにより曲面生成を行っており、細分割曲面のみならず、B-Spline曲面や曲線など、制御点により定義される曲線、曲面に対して適用することができ、曲面生成について一般性を有する。
- [0073] 図3は、本発明の近似処理のソフトウェアを記憶したプログラムをコンピュータで実行させる場合の一構成例を示している。
- [0074] 入力手段1は、点群 p のデータ点 p_i を入力し、記憶手段2中のデータ記憶部2aに記憶する。記憶手段2は、データ記憶部2aの他に、幾何処理の演算を行う演算ツールのプログラムを記憶する演算ツール記憶部2b、近似処理の演算の他、細分割処理等の演算処理のプログラムを記憶する演算処理プログラム記憶部2c、途中演算結果等を一時的に記憶する一時記憶部2d、近似処理によって得られた曲面の演算結果を記憶する演算結果記憶部2e等を備える。

- [0075] データ記憶部2aは、点群 p のデータ点 p_i を記憶する他、点群 p のデータ点 p_i から形成し三角形メッシュ、あるいは、メッシュからQEM等によって生成した初期制御メッシュ $M_n^{(0)}$ を記憶してもよい。
- [0076] 演算手段3は、演算処理プログラム記憶部2cに記憶されるプログラムによる演算手順に従い、また、このプログラムに指定される演算ツールのプログラムを演算ツール記憶部2bから逐次読み出して演算処理を行う。
- [0077] 演算手段3で行う演算としては、例えば、データ記憶部2aに記憶された点群 p のデータ点 p_i から三角形メッシュを形成する演算処理、メッシュから初期制御点 $P^{(0)}$ を求めて初期制御メッシュ $M_n^{(0)}$ を生成する演算処理、初期制御メッシュ $M_n^{(0)}$ を用いて行う初期近似曲面 $S_n^{(0)}$ を生成する演算処理、制御メッシュ M_n を用いて行う近似曲面 $S_n^{(k)}$ の生成を行う演算処理、初期近似曲面 $S_n^{(0)}$ 上においてデータ点 p_i に最も近い初期最近点 $S_i^{(0)}(t)$ をニュートン法で算出する演算処理、近似曲面 $S_n^{(k)}$ 上においてデータ点 p_i に最も近い最近点 $S_i^{(k)}(t)$ をニュートン法で算出する演算処理、データ点 p_i と初期最近点 $S_i^{(0)}(t)$ との誤差ベクトル e_i 、データ点 p_i と最近点 $S_i^{(k)}(t)$ との誤差ベクトル e_i を求め、この誤差ベクトル e_i を用いて制御点 $P^{(k)}$ を移動する制御ベクトル d を算出するベクトル演算を行う演算処理、制御ベクトル d によって制御点 P を移動する演算処理等がある。
- [0078] 演算結果記憶部2eに記憶された演算結果は、読み出されて表示手段4に表示したり、出力手段5に出力することができる。出力手段5は、演算結果を記録媒体に記録する記録装置、演算結果を用いて所定動作を行う加工装置等の外部装置とすることができる。
- [0079] なお、上記、ソフトウェア処理を行う構成は、専用のソフトウェア処理装置や、通常のパーソナルコンピュータに適用することができる。
- [0080] また、上記構成において、記憶手段を含む演算手段で実施される機能を回路で構成することでハードウェアにより実施することもできる。
- [0081] 次に、本発明の近似処理の詳細について、三次元の点群から近似曲面を生成する場合について、図2のフローチャート、図4～図13の説明図を用いて説明する。以下のフローは一例であり、本発明の近似処理を実施する工程及び手順であれば他のフローで構成してもよい。

[0082] 近似のアルゴリズムの流れは、与えられた点群の三角形メッシュから、形状の特徴を保持する初期制御メッシュをQEM等によって生成し、この初期制御メッシュから初期近似曲面を生成する。次に、データ点から制御メッシュ(1回目は初期制御メッシュ、2回目以降は制御点を移動した制御メッシュ)より生成される近似曲面上で最も近い最近点を求め、このデータ点から最近点への誤差ベクトルを求め、この誤差ベクトルを用いて制御点を移動して新たな近似曲面を生成する。この制御点の移動と移動後の制御点による近似曲面の生成の工程を繰り返すことにより、元の形状により近似した近似曲面を求める。

[0083] 以下、図4～図13を用いて幾何アルゴリズムによる近似処理を説明する。三次元計測器によって点群 p のデータ点 p_i を求め、各データ点 p_i を結んで、例えば、三角形メッシュによりメッシュ化する。図4(a)、(b)は点群 p のデータ点 p_i とメッシュ化で形成した三角形メッシュを模式的に示している。

[0084] なお、点群 p のデータ点 p_i に加えて、このデータ点 p_i から三角形メッシュを予め求めて記憶手段に記憶しておき、記憶手段から読み出しても良い。三次元の制御メッシュは、三角形メッシュの他に、四角形メッシュを用いてもよい。三角形メッシュの細分割手法としてはLoop細分割(非特許文献4)が知られ、四角形メッシュの細分割手法としてはCatmull-Clark細分割(非特許文献5)、Doo-Sabin細分割(非特許文献6)等が知られている。

[0085] 三角形メッシュから、よく知られたQEM(Surface simplification using quadric error metrics: 非特許文献3)等の処理方法で初期制御点 $P^{(0)}$ からなる初期制御メッシュ $M_n^{(0)}$ を生成し、初期制御メッシュ $M_n^{(0)}$ の制御点 $P^{(0)}$ を記憶部2aに記憶する。記憶した初期制御点 $P^{(0)}$ を用いて初期近似曲面 $S^{(0)}$ を生成する。なお、初期制御メッシュ $M_n^{(0)}$ によって生成される初期近似曲面を近似曲面 $S^{(0)}$ で表す。以後、制御点を移動することで生成される制御メッシュ M_n によって k 回目に生成される近似曲面を近似曲面 $S_n^{(k)}$ で表す。

[0086] 図4(a)は点群 p のデータ点 p_i を示し、図4(b)は点群 p のデータ点 p_i とデータ点 p_i から生成した制御メッシュ M_n とを示している。図4(c)は、点群 p のデータ点 p_i から生成した制御メッシュ M_n と、制御メッシュ M_n によって生成される近似曲面 $S_n^{(k)}$ を示している。

ここで、実線は制御メッシュ M_n を示し、白抜き丸印“○”は制御メッシュ M_n の制御点 P を示している。破線は近似対象の曲面を示し、データ点 p_i (図4(c)には示していない)はこの近似対象の曲面上の点である。図4(c)は、近似曲面 $S^{(k)}$ と近似対象曲面との間には誤差がある状態を示している。

[0087] 図5(a), (b)は、近似曲面 $S^{(k)}$ が近似対象曲面に近づく状態を示している。なお、データ点 p_i は図5中では黒丸“●”で示している。近似曲面 $S^{(k)}$ は、制御点 P によって近似対象の曲面に近似するように形成される。

[0088] 制御点 P を移動することによって近似曲面 $S^{(k+1)}$ を求める。制御点 P の移動を繰り返すことによって、近似曲面 $S^{(k+1)}$ と近似対象曲面との間の誤差は減少し、近似対象曲面に逐次近づいていく。制御点 P の移動は、データ点 p_i と、近似曲面 $S^{(k)}$ 上でデータ点 p_i に最も近い最近点 $S^{(k)}(t_i)$ との誤差ベクトル e_i に基づいて行う。

[0089] 図5は、データ点 p_i と、近似曲面 $S^{(k)}$ 上においてデータ点 p_i に最も近い最近点 $S^{(k)}(t_i)$ との関係を示している。図5(a)において、最近点 $S^{(k)}(t_i)$ は近似曲面 $S^{(k)}$ 上においてデータ点 p_i に最も近い点であり、図中では×印で示している。また、図5(b)において、最近点 $S^{(k+1)}(t_i)$ は近似曲面 $S^{(k+1)}$ 上においてデータ点 p_i に最も近い点であり、図中では×印で示している。

[0090] 図5(a)は移動前の制御点 $P^{(k)}$ とこの制御点 $P^{(k)}$ による近似曲面 $S^{(k)}$ を示し、図5(b)は移動後の制御点 $P^{(k+1)}$ とこの制御点 $P^{(k+1)}$ による近似曲面 $S^{(k+1)}$ を示している。制御点を移動することによって形成された近似曲面 $S^{(k+1)}$ は近似対象の曲面に漸近する。

[0091] 図6は、近似曲面 $S^{(k)}$ 上の最近点 $S^{(k)}(t_i)$ を説明するための図である。図6において、 T_p は接平面、 p_i はデータ点、 $S(v,w)$ はパラメータ (v,w) における近似曲面上の点、 i はデータ点番号を示している。

[0092] 1つのデータ点から近似曲面への垂線は次式により与えられる。

$$\begin{aligned} [(p - S(v,w)) \cdot S_v(v,w)] &= 0 \\ [(p - S(v,w)) \cdot S_w(v,w)] &= 0 \quad \dots (1) \end{aligned}$$

[0093] なお、 v と w は曲面のパラメータであり、 S_v 、 S_w は細分割曲面 S の v 、 w 方向の微分を示している。

[0094] 各データ点 p_i から、制御点によって張られる細分割曲面 S 上の最短距離となる点は

、Marinov and Kobbelt (非特許文献8)によると、 p から接平面 T_p への垂線を求める曲面のパラメータ $(\Delta v, \Delta w)$ に関する以下の式を解くことにより求めることができる。

$$\begin{aligned} [0095] \quad & [p - (S(v,w) + S_v(v,w) \Delta v + S_w(v,w) \Delta w)] \cdot S_v(v,w) \Big|_i^j = 0 \\ & [p - (S(v,w) + S_v(v,w) \Delta v + S_w(v,w) \Delta w)] \cdot S_w(v,w) \Big|_i^j = 0 \quad \dots (2) \end{aligned}$$

[0096] ここで、 i はデータ点番号、 j はパラメータ化におけるニュートン法の繰返し回数であり、 $(\Delta v, \Delta w)$ は曲面のアップデートパラメータである。

[0097] データ点 p_i と最近点 $S^{(k)}(t_i)$ との間の誤差はベクトルによって表すことができる。ここでは、データ点 p_i から最近点 $S^{(k)}(t_i)$ への誤差ベクトル e_i によって表す。図5中では、この誤差ベクトル e_i は、データ点 p_i と最近点 $S^{(k)}(t_i)$ あるいは $S^{(k+1)}(t_i)$ とを結ぶ直線で示している。

[0098] 本発明は、制御点 P の周囲に存在するデータ点 p_i について、そのデータ点 p_i と最近点 $S^{(k)}(t_i)$ との誤差ベクトル e_i を求め、複数の誤差ベクトル e_i がある場合には、これらの誤差ベクトル e_i をベクトル加算して移動ベクトル d を求め、この移動ベクトル d によって制御点 P を移動することによって新たな制御点 $P^{(k+1)}$ を求める。この制御点の移動状態は、前記の図5に示している。図5(a)は移動前の制御点 $P^{(k)}$ とこの制御点 $P^{(k)}$ による近似曲面 $S^{(k)}$ を表し、図5(b)は移動後の制御点 $P^{(k+1)}$ とこの制御点 $P^{(k+1)}$ による近似曲面 $S^{(k+1)}$ を表している。

[0099] 制御点 $P^{(k)}$ を誤差ベクトル e_i を用いて移動する際、各データ点 p_i および最近点 $S^{(k)}(t_i)$ により求めた各誤差ベクトル e_i に重み付けし、重み付けした誤差ベクトル e_i をベクトル加算して移動ベクトル d を求める。なお、制御点 $P^{(k)}$ の周囲にデータ点 p_i が1点のみしか存在しない場合には、この1点のデータ点 p_i に対応する最近点 $S^{(k)}(t_i)$ を求め、このデータ点 p_i と最近点 $S^{(k)}(t_i)$ との誤差ベクトル e_i に重み付けを行った誤差ベクトル e_i を移動ベクトル d とする。

[0100] また、重み付けを行う誤差ベクトル e_i は制御点 P の周囲に存在する。制御点 P の周囲として、例えば、制御点 $P^{(k)}$ を共通の頂点とするメッシュが生成する近似曲面内とすることができ、これらメッシュは制御点 $P^{(k)}$ を中心として1ループを形成している。制御点 $P^{(k)}$ の周囲に存在するメッシュは各制御点に応じて異なり、また、各メッシュに対応して存在する誤差ベクトル e_i も各メッシュに応じて異なるため、重み付けを行う誤差ベ

クトル e_i の個数は一定ではないが、誤差ベクトル e_i を形成するデータ点 p_i および最近点 $S^{(k)}(t_i)$ は、点群のデータ点の点数により定まっているため、全制御点 P について用いる誤差ベクトル e_i の個数は一定である。

[0101] ここで、重み付けを行う程度は、制御点 P と最近点 $S^{(k)}(t_i)$ との距離に応じて定めることができる。制御点 $P^{(k)}$ の近くに存在するデータ点 p_i に係わる誤差ベクトル e_i に対しては重み付けの程度を大きく設定し、制御点 P から遠くに存在するデータ点 p_i に係わる誤差ベクトル e_i に対しては重み付けの程度を小さく設定する。この重み付けを行うことによって、近似曲面 S を得るための繰り返し回数を低減させることができる。

[0102] 以下、図7のフローチャートおよび図8の説明図を用いて誤差ベクトル e_i の重み付けについて説明する。図8では、制御点 $P^{(k)}$ の周囲に形成される複数の三角形メッシュの内の一つの三角形メッシュ(図8中の太い実線が形成される三角形)について示している。図8において、三角形メッシュを太い実線で示し、この三角形メッシュに対する近似曲面 S に濃淡を付して示している。

[0103] 図8において、黒丸“●”で示すデータ点 p_i は近似対象の曲面上の点であり、×印で示す最近点 $S^{(k)}(t_i)$ はデータ点 p_i に最も近い点であり、データ点 p_i と最近点 $S^{(k)}(t_i)$ との間の矢印は誤差ベクトル $e_{i,j}^{(k)}$ を示している。なお、図8では、三角形メッシュおよび近似曲面 S において、データ点 p_i と最近点 $S^{(k)}(t_i)$ と誤差ベクトル $e_{i,j}^{(k)}$ の1組のみを示している。“ J ”は制御点 P の周囲に存在する J 番目の最近点 $S^{(k)}(t_i)$ を表している。

[0104] 制御点 $P^{(k)}$ の移動は、この制御点 $P^{(k)}$ の周囲に存在する誤差ベクトル $e_{i,j}^{(k)}$ に重み付けし、さらに、重み付けした重み付け誤差ベクトル $e_{i,j}^{*(k)}$ をベクトル加算して求めた加算誤差ベクトル $\Sigma e_{i,j}^{*(k)}$ を用いて行う。なお、“*”は重み付けしたことを表している。

[0105] この誤差ベクトル $e_{i,j}^{(k)}$ の重み付けは、その最近点 $S^{(k)}(t_i)$ と制御点 $P^{(k)}$ との距離に応じて行う。重み付け処理は、誤差ベクトル $e_{i,j}^{(k)}$ に重み付け係数 $u_{i,j}^{(k)}$ を乗じることによって行うことができる。

[0106] 重み付け処理において、制御点 P の近くに存在する誤差ベクトル $e_{i,j}^{(k)}$ に対しては、重み付け係数 $u_{i,j}^{(k)}$ の値を大きく設定して乗じ、制御点 P から遠くに存在する誤差ベクトル $e_{i,j}^{(k)}$ に対しては、重み付け係数 $u_{i,j}^{(k)}$ の値を小さく設定して乗じる。ここで、重み付け係数 $u_{i,j}^{(k)}$ は、 $u_{i,j}^{(k)} = 1.0 - v_{i,j}^{(k)} - w_{i,j}^{(k)}$ で表される重心座標系(barycentric coordinat

e)を用いることができる。この重心座標系(barycentric coordinate)による重み付け係数 $u_{i,J}^{(k)}$ は、図8において近似曲面 $S^{(k)}$ 上の曲線で表される。

[0107] この重み付け係数 $u_{i,J}^{(k)}$ を用いることによって、重み付けされた誤差ベクトル $e_{i,J}^{*(k)}$ は

$$e_{i,J}^{*(k)} = u_{i,J}^{(k)} \cdot e_{i,J}^{(k)} \quad \dots (3)$$

$$J=1, \dots, m$$

で表される。なお、 m は制御点 $P^{(k)}$ を共通の頂点としてその周囲に形成される複数の近似曲面 S 上に存在する最近点 $S_i^{*(k)}(t)$ の個数である。また、制御点 $P^{*(k)}$ における重み付け係数 $u_{i,J}^{(k)}$ は“1”であり、制御点 $P^{*(k)}$ から離れた近似曲面 S の縁部における重み付け係数 $u_{i,J}^{(k)}$ は“0”である(S6a)。

[0108] 次に、制御点 $P^{(k)}$ の周囲に存在する全最近点 $S_i^{(k)}(t)$ について、重み付けした重み付け誤差ベクトル $e_{i,J}^{*(k)}$ を加算して正規化することによって、制御ベクトル d を求める(S6b)。

[0109] 図9は、制御点の周りの誤差ベクトル $e_{i,J}^{(k)}$ を説明するための図である。

[0110] 各三角形メッシュが形成するそれぞれの近似曲面 $S^{(k)}$ において、各最近点 $S_i^{(k)}(t)$ についてデータ点 p_i からの誤差ベクトル $e_{i,J}^{(k)}$ に重み付けを行って重み付け誤差ベクトル $e_{i,J}^{*(k)}$ を求める。

[0111] 一つの制御点 $P^{(k)}$ にはその制御点 $P^{(k)}$ を共通の頂点とする複数の三角形メッシュが存在し、各三角形メッシュが形成する近似曲面 $S^{(k)}$ にある最近点 $S_i^{(k)}(t)$ について重み付けられた誤差ベクトル $e_{i,J}^{*(k)}$ が生成されるため、一つの制御点 $P^{(k)}$ に複数の重み付け誤差ベクトル $e_{i,J}^{*(k)}$ が生成される。制御点 $P^{(k)}$ において、これらの重み付け誤差ベクトル $e_{i,J}^{*(k)}$ を加算して制御点を移動する制御ベクトル $d^{(k)}$ を求める。

[0112] 制御点 $P^{(k)}$ を移動する制御ベクトル $d^{(k)}$ は、

$$d^{(k)} = \frac{\sum_J e_{i,J}^{*(k)}}{\sum u_{i,J}^{(k)}} \quad \dots (4)$$

で表される。 $\sum u_{i,J}^{(k)}$ は重み付け係数 $u_{i,J}^{(k)}$ の加算値であり、この加算値で誤差ベクトル $e_{i,J}^{*(k)}$ の加算値($\sum_J e_{i,J}^{*(k)}$)を除算することで正規化する。

[0113] この制御ベクトル $d^{(k)}$ によって制御点 $P^{(k)}$ を移動することで新たな制御点 $P^{(k+1)}$ を生成する。求めた新たな制御点 $P^{(k+1)}$ に基づいて近似曲面 $S^{(k+1)}$ を求める。

[0114] ここで、誤差関数 E を用いた近似処理の近似の程度の評価について説明する。評

価関数Eは、データ点 p_i と最近点 $S_i^{(k)}(t)$ との絶対値誤差を算出する。評価関数Eとして、平均誤差Eaveと最大誤差Emaxを定めることができる。

[0115] それぞれ次式で定めることができる。

$$\text{平均誤差Eave} = \sum_{i=1}^n \| p_i - S_i^{(k)}(t) \|_2 / n \quad \dots (5)$$

$$\text{最大誤差Emax} = \max_{1 \leq i \leq n} \| p_i - S_i^{(k)}(t) \|_2 \quad \dots (6)$$

[0116] なお、 $\| p_i - S_i^{(k)}(t) \|_2$ は、 $(p_i - S_i^{(k)}(t))$ の自乗平均を表している。

[0117] 前記した図2のフローチャートのS10の誤差Eと許容値との比較において、求めた平均誤差Eaveと最大誤差Emaxについて予め定めておいた許容値と比較し、平均誤差Eaveおよび最大誤差Emaxが許容範囲内となるまで、S6～S9の工程を繰り返す。

[0118] S6～S9の工程による制御点の移動を所定回数繰り返しても、誤差Eaveおよび最大誤差Emaxが許容範囲内に収束しない場合には(S12)、メッシュを分割して、制御点Pを増加して(S13)、近似曲面 S_m 、最近点 $S_i^{(k)}(t)$ を求め(S14,15)、平均誤差Eaveおよび最大誤差Emaxが許容範囲内となるまで、再度S6～S9の工程を繰り返す。

[0119] 図10は、メッシュの分割による制御点Pの増加を説明するための図である。図10(a)は、13個の三角形メッシュの例を示している。

[0120] 一例として、中央の三角形メッシュにおいて、3つの制御点の中央に新たに制御点(図中の白丸“○”で示す)を加えることによって、1つの三角形メッシュを4つの三角形メッシュに分割する。さらに、互換性を崩さないために追加した制御点を外側の三角形メッシュの制御点とを接続して、外側の3つの三角形メッシュのそれぞれを2つの三角形メッシュに分割する。

[0121] また、他の例では、中央に並ぶ3個の三角形メッシュにおいて、それぞれの三角形メッシュが持つ3つの制御点の中央に新たに制御点(図中の白丸“○”で示す)を加えることによって、各三角形メッシュについて1つの三角形メッシュを4つの三角形メッシュに分割する。さらに、互換性を崩さないために追加した制御点を外側の三角形メッシュの制御点とを接続して、外側の3つの三角形メッシュのそれぞれを2つの三角形メッシュに分割する。

[0122] また、制御点の点数を増加する他に、局所的な再メッシュによって近似度を高めることができる。図11、図12は局所的な再メッシュの一例である。

[0123] 図11は制御点Pの位相的な調整を説明するための図である。メッシュの質を制御点の位数 $d(v)$ によって評価することが知られている。境界の頂点での最適な位数 $d_{opt}(v)$ は4であり、その他の頂点での最適な位数 $d_{opt}(v)$ は6である。

[0124] メッシュの質を評価する評価関数 $R(M)$ として

$$R(M) = \sum (d(v) - d_{opt}(v))^2 \quad \dots (7)$$

が知られ、この評価値が低いほどメッシュの質が高いことを示している。なお、 v は M の要素である。

[0125] 評価関数 $R(M)$ の値を、図11(a)に示すメッシュと図11(b)に示すメッシュとで比較すると、図11(b)に示すメッシュの評価関数 $R(M)$ の値は図11(a)に示すメッシュの評価関数 $R(M)$ の値よりも低い値となる。したがって、メッシュの接続状態を変更することによって評価関数 $R(M)$ を下げることができ、このことはメッシュの質が高まったことを示している。

[0126] また、細長いメッシュは望ましくないうねりの要因となるため、細長いメッシュを取り除く必要がある。

[0127] 図12は、制御点を調整することで細長いメッシュを取り除く例を示している。図12(a)に示す制御点の接続状態から図12(b)に示す制御点の接続状態に変更することによって三角形メッシュの角度を大きくし、これによって細長いメッシュを除去する。

[0128] 以下に、本発明による結果例を図13に示す。図13は、繰り返しによる誤差と計算時間の変化を示している。

[0129] 平均誤差 E_{ave} は16回目の繰り返しで0.01%に達し、最大誤差 E_{max} は30回目の繰り返しで0.05%に達した。なお、5回目毎に表れる最大誤差 E_{max} のピークは、制御点の調整によるものである。

[0130] また、以下の表1は、各モデル例による誤差と計算時間を、本発明の例と他の手法による例を示している。比較に用いた他の手法は[Marinov and Kobbelt 2005](非特許文献8)と[Cheng etl 2007](非特許文献9)である。

[0131] [表1]

Model	original n	Initial n	Final n	E _{max} (%)	E _{rms} (%)	Precomputation	Total time
-------	------------	-----------	---------	----------------------	----------------------	----------------	------------

本願発明							
Model A	173K	433	3267	0.248	0.0618	19sec	1min:49sec
Model B	543K	4091	26838	0.049	0.0101	1min	7min:6sec
Model C	37K	612	7049	0.049	0.0108	4sec	22sec
Model D	134K	336	1572	0.238	0.0701	14sec	1min:8sec

Marinov and Kobbelt 2005							
Model A	173K	433	2820	0.248	0.0598	N/A	12min:26sec
Model B	543K	4093	17995	0.049	N/A	N/A	64min
Model C	37K	612	8440	0.048	N/A	N/A	5min
Model D	134K	336	1553	0.247	0.0575	N/A	8min:29sec

Cheng et al. 2007							
Model B	543K	4662	18715	0.43*	0.03*	83min:58sec	114min:6sec
Model C	35K	919	996	0.82*	0.09*	6min:1sec	7min:18sec
Model D	134K	526	2385	0.36*	0.05*	4min:11sec	6min:43sec

[0132] 表1において、本発明の近似処理では、平均誤差を0.01%とし最大誤差を0.05%とし、Pentium(登録商標)IV 3.0GHzのPC、2GBのRAMを用いて実施している。

[0133] 本発明の近似処理と[Marinov and Kobbelt 2005](非特許文献8)の手法とを比較すると、本発明によれば約6倍の処理速度であると評価することができる。なお、[Marinov and Kobbelt 2005](非特許文献8)では、Pentium(登録商標) 2.8GHzのPC、2GBのRAMを用いて実施し、平均誤差に代えて自乗平均誤差を用いている。

[0134] 本発明の近似処理と[Cheng et al. 2007](非特許文献9)の手法とを比較すると、本発明によれば約6倍の処理速度であると評価することができる。なお、[Cheng et al. 2007](非特許文献9)では、Xeon 2.8GHzのPC、2GBのRAMを用いて実施している。

[0135] 図14は、本発明の近似処理の一実施例を示す図である。図14(a)は近似対象の対象物のイメージを示し、図14(b)はデータ点を対象物のイメージに重ねて示した図であり、図14(c)はQEMによる三角形メッシュを示し、図14(d)は誤差ベクトルおよび制御ベクトルを示し、図14(e)は近似処理で得られた近似曲面を示している。

[0136] 上記では三次元による近似曲面を生成する例について説明したが、二次元による

近似曲線を生成する場合にも適用することができる。

- [0137] 以下、近似曲線を生成する例について説明する。以下では、与えられた $n+1$ 個の点群を近似するB-spline曲線について説明する。
- [0138] はじめに、 $n+1$ 個の点群から形状を保ちつつ特徴点 S を選び出す。このとき、近似曲線の簡略化手法であるダグラス・ポイカーアルゴリズム(Douglas-Peucker Algorithm)を用いる。このダグラス・ポイカーアルゴリズムは、近似曲線の簡略化手法であって、コンピュータグラフィックや地理情報システムにおいて広く用いられるものであり、近似曲線の始点と終点とを結んだ一本のエッジで簡略化から開始し、そのエッジに対して残りの頂点との距離を求め、エッジからの距離が閾値よりも遠い頂点がある場合には、最も遠い頂点によって近似曲線を分け、分けた近似曲線に対してそれぞれのエッジを簡略化する過程を帰納的に行うものである。
- [0139] 選び出された $N+1$ の特徴点 S に対してパラメータ値を割り当て、ノットベクトル T を定義する。ノットベクトル T と特徴点 S を制御点 P として初期曲線を生成する。ここで、本発明の曲線近似では、誤差ベクトルの算出と制御点の移動の2つの工程で行う。
- [0140] 誤差ベクトルの算出では、入力点群から制御点 P で定義される曲線へ垂線を下し、曲へ垂線を下ろしたときの垂線の足入力点に向かうベクトルを誤差ベクトルとする。垂線は入力点から曲線への最近点に相当し、ニュートン法によって求めることができる。
- [0141] 制御点の移動において、近似手法は補間手法と違って入力点群数に比べ制御点数が少ないため、誤差ベクトルと制御点とは一対一に対応しておらず、誤差ベクトルと移動ベクトルは一致していない。そのため、それぞれの入力点について、垂線が下りたスパンに影響を与える制御点ごとに誤差ベクトルをB-spline基底関数に基づいて重み付けを行う。それぞれの制御点 P を重み付けした移動ベクトルによって移動して新たな制御点 P を求める。
- [0142] この工程を繰り返すこと曲線近似を行うことができる。入力点群全てに対して距離が閾値を満たすまで上記二つ工程を繰り返すことにより、入力点群に近似するB-spline曲線を生成する。また、繰り返しの過程において、距離が大きい部分には適宜ノットを挿入することによって曲線の自由度を上げながら近似を行う。

- [0143] B-spline曲線の近似において、誤差ベクトルの重み付けはB-spline基底関数に基づいて行う。
- [0144] この重み付けでは、一つのスパンを構成するk個の制御点に着目して行う。各入力点について、垂線が下りたスパンに影響を与える制御点ごとに誤差ベクトルをB-spline基底関数に基づいて重み付けすることによって、移動ベクトルを定義する。B-spline基底関数を用いた重み付けを行うことで、制御点に近い誤差ベクトルほど大きく重み付けを行うことができる。
- [0145] 図15はB-spline曲線の近似における重み付けを説明するための図である。図15において、入力点Qから曲線に下ろした垂線の足が下りたスパンsを探す。
- [0146] スパンsを構成するk個の制御点毎に、B-spline基底関数で重み付けした誤差ベクトルを足し合わせる。図15に示す例では、スパンsを構成する制御点 P_{s-1} , P_s , P_{s+1} , P_{s+2} ごとに足し合わせる。
- [0147] 上記した工程を入力した点群の全てのデータ点について行い、総和ベクトルを正規化して移動の方向ベクトルを求める。正規化は、重み付けした誤差ベクトルの大きさを制御点ごとに足し合わせたスカラー量で除算することで行うことができる。また、大きさの総和(前記スカラー量)を足し合わせた総数で割って平均化することで移動量を求める。
- [0148] 本願発明は、上記して細分割曲面やB-Splineに限らず、NURBS等にも適用することができる。

産業上の利用可能性

- [0149] 本発明は、3Dモデリングの分野におけるリバースエンジニアリングに適用することができる。

請求の範囲

- [1] 制御点により定義される曲線又は曲面によって点群のデータ点を近似する近似処理方法において、
- 形状の特徴を保存する制御点を用いて近似曲線又は近似曲面を形成する工程と、
- 前記近似曲線又は近似曲面上において、前記データ点に最も近い最近点を算出する第1の算出工程と、
- 前記第1の算出工程で求めた最近点から前記データ点を結ぶ誤差ベクトルを算出する第2の算出工程と、
- 前記第2の算出工程で求めた誤差ベクトルに基づいて前記制御点を移動し修正後の制御点を算出する第3の算出工程とを備え、
- 前記近似曲線又は近似曲面を形成する工程および各算出工程は、幾何アルゴリズムを組み込んだ演算手段により行い、
- 前記近似曲線又は近似曲面の形成工程と前記第1～第3の算出工程を繰り返すことによって、前記近似曲線又は近似曲面をそれぞれ対象とするデータ点が構成する曲線又は曲面に近似させることを特徴とする近似処理方法。
- [2] 前記第1の算出工程は、ニュートン法によって近似曲線又は近似曲面上において前記データ点に最も近い最近点を算出することを特徴とする請求項1に記載の近似処理方法。
- [3] 前記第3の算出工程は、前記第2の算出工程で算出した複数の誤差ベクトルの内、修正を行う制御点の周囲にある最近点について算出した誤差ベクトルに重み付け処理を行い、当該重み付けした誤差ベクトルをベクトル加算し、当該ベクトル加算された加算ベクトルを移動ベクトルとして前記制御点を移動し、移動後の制御点を修正後制御点として算出することを特徴とする請求項1又は2に記載の近似処理方法。
- [4] 前記第3の算出工程における重み付け処理は、前記制御点の周囲の最近点について求めた誤差ベクトルに係数を乗じる演算処理であり、
- 前記係数は制御点と最近点との距離に応じて、制御点に近い程ほど大きな値を設定することを特徴とする請求項3に記載の近似処理方法。
- [5] 前記係数は、重心座標系(barycentric coordinate)に従って定めることを特徴とする

請求項4に記載の近似処理方法。

- [6] 前記データ点と当該データ点に対応する近似曲線又は近似曲面上の最近点との距離に基づいて、近似曲線又は近似曲面の近似誤差を算出し、
前記近似誤差が所定値未満となるまで前記第1～第3の算出工程を繰り返すことを特徴とする請求項1から5の何れか一つに記載の近似処理方法。
- [7] 前記制御点の算出処理の繰り返し回数が所定回数を超えた場合には、面分割による制御点の個数を増加させ、
前記近似誤差が所定値未満となるまで前記制御点の算出工程と前記面分割による制御点の増加を繰り返すことを特徴とする請求項6に記載の近似処理方法。
- [8] 前記曲面は、三角形メッシュによるLoop細分割、四角形メッシュによるCatmull-Clark, Doo-Sabin細分割、NURBS、B-Splineの何れか一つにより定められる制御点により定義されることを特徴とする請求項1から請求項7の何れか一つに記載の近似処理方法。
- [9] 点群のデータ点を結んで折れ線又はメッシュを形成する工程と、
当該折れ線又はメッシュの特徴をとらえた頂点を求め、当該頂点を初期制御点とする工程とを備え、
前記近似曲線又は近似曲面を形成する工程は、前記初期制御点を用いて第1回目の近似曲線又は近似曲面の形成を行うことを特徴とする請求項1から請求項8の何れか一つに記載の近似処理方法。
- [10] 制御点により定義される曲線又は曲面によって点群を近似する近似処理装置において、
形状の特徴点を保存する制御点を用いて近似曲線又は近似曲面を形成する工程と、
前記近似曲線又は近似曲面上において、前記データ点に最も近い最近点を算出する第1の算出工程と、
前記第1の算出工程で求めた最近点から前記データ点を結ぶ誤差ベクトルを算出する第2の算出工程と、
前記第2の算出工程で求めた誤差ベクトルに基づいて前記制御点を移動し修正後

の制御点を算出する第3の算出工程の各工程を行う演算手段を備え、

前記演算手段は、前記近似曲線又は近似曲面を形成する工程、および前記各算出工程を行う幾何アルゴリズムをソフトウェアで実行するためのCPU及び記憶装置、又は各幾何アルゴリズムをハードウェアで実行するための回路を備え、前記近似曲線又は近似曲面の形成工程と前記第1～第3の算出工程を繰り返すことによって、前記近似曲線又は近似曲面をそれぞれ対象とする曲線又は曲面に近似させることを特徴とする近似処理装置。

[図1]

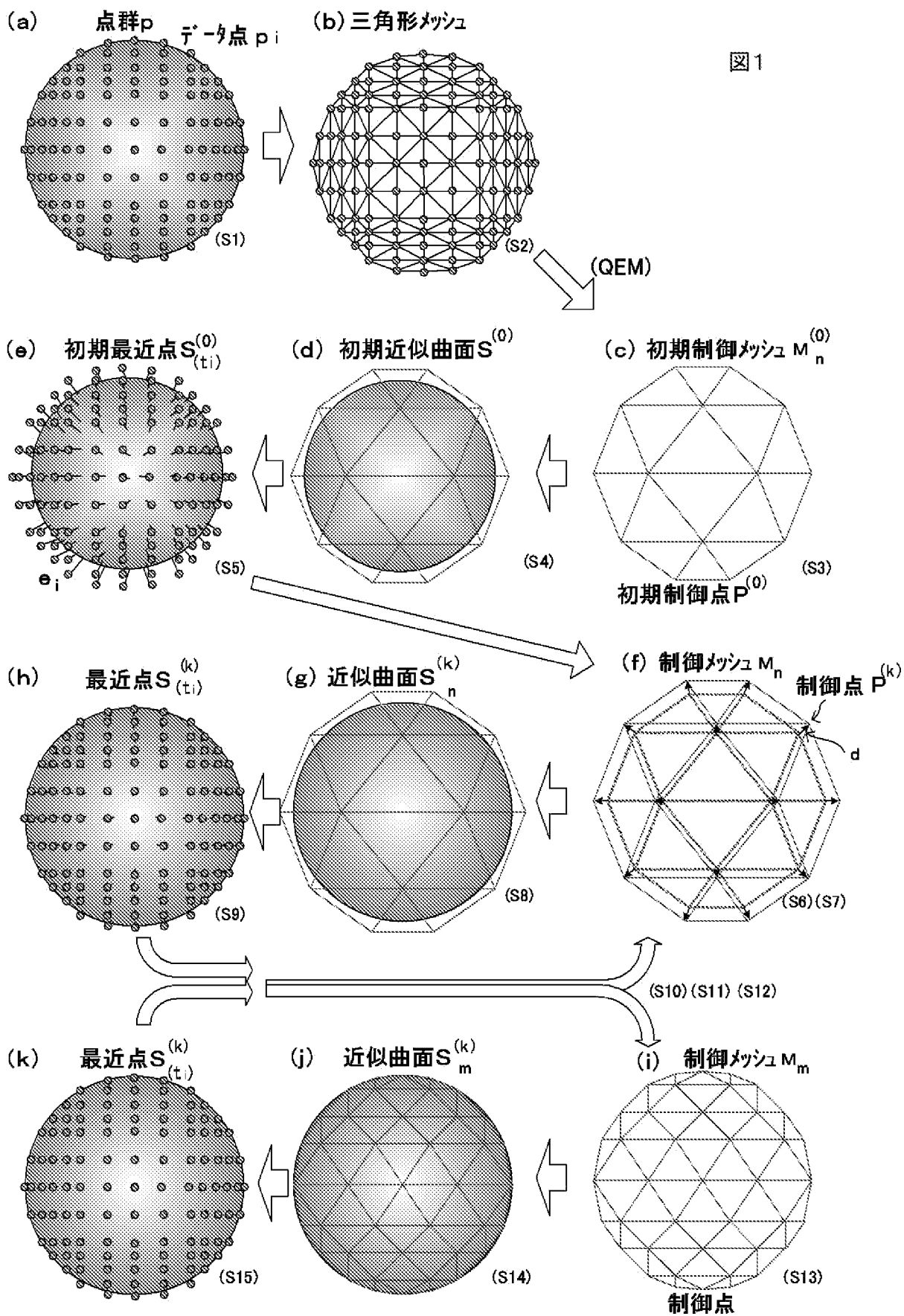


図1

[図2]

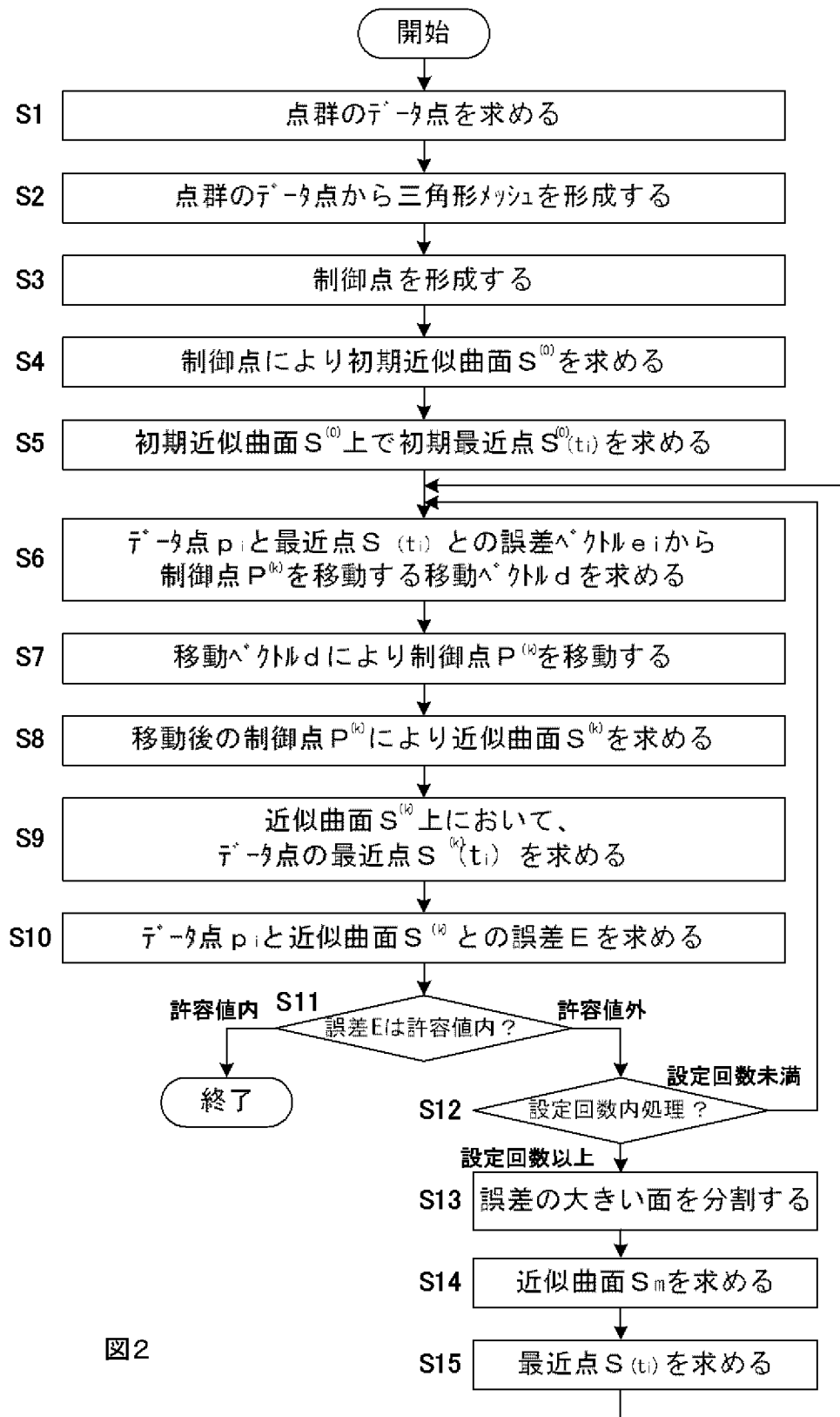


図2

[図3]

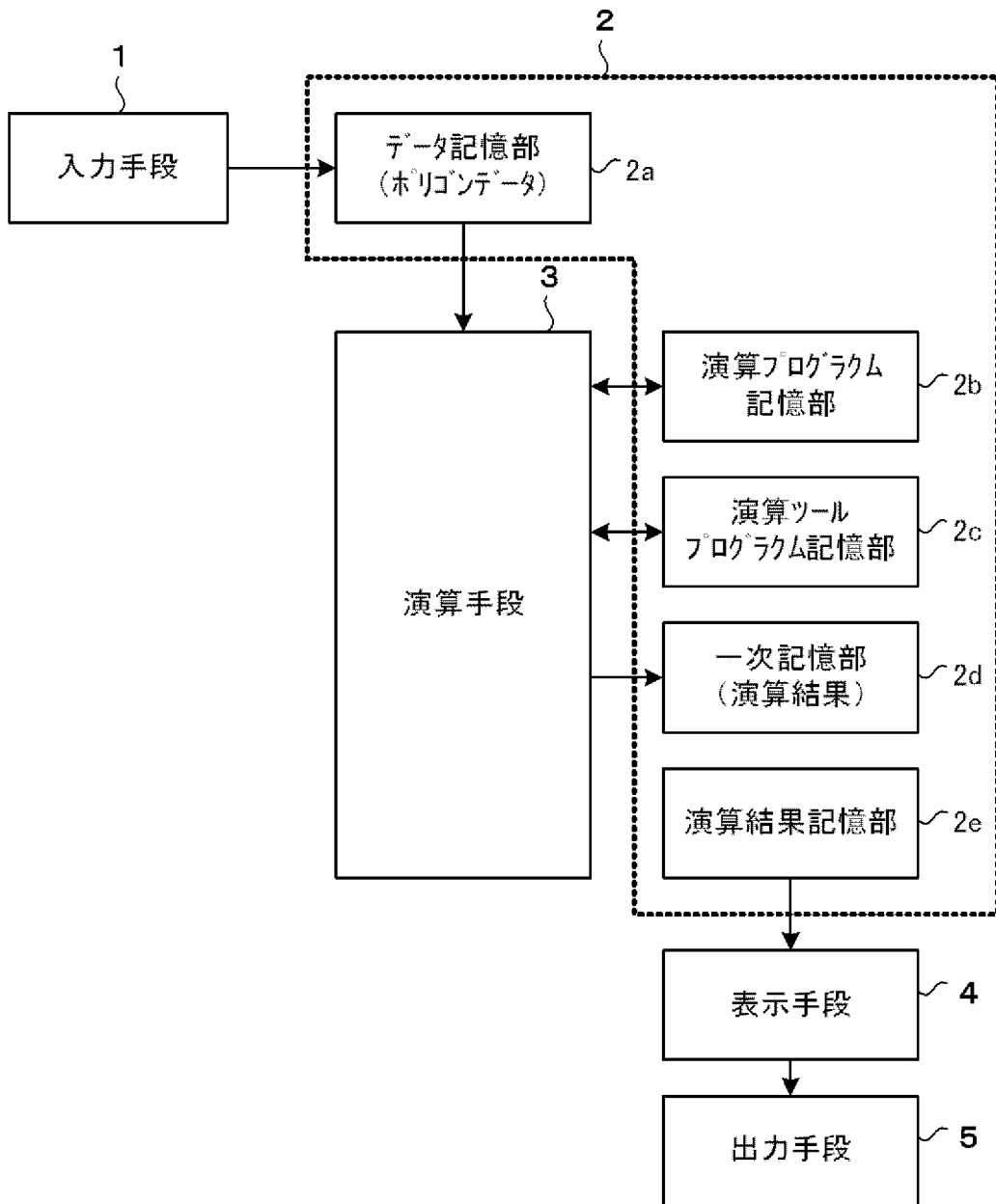
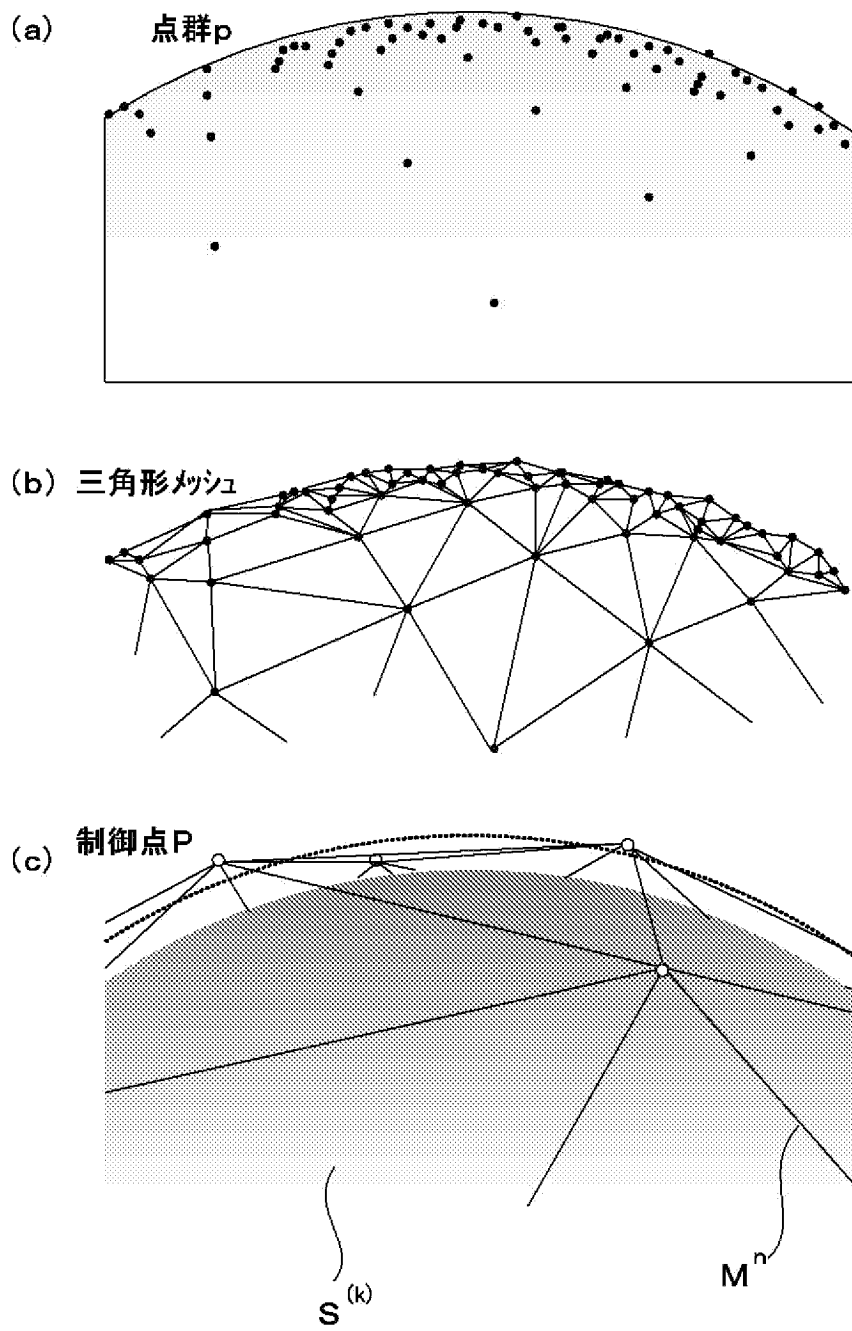


図3

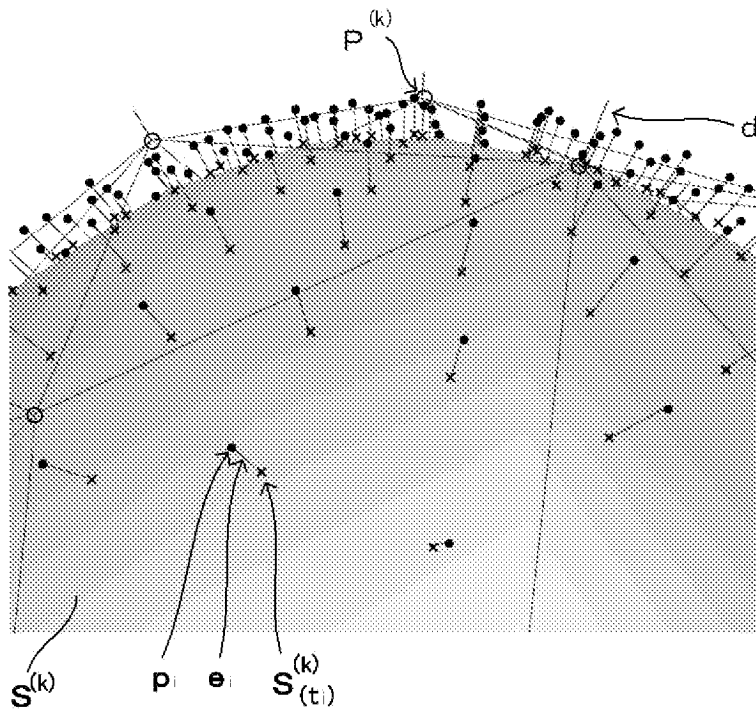
[図4]



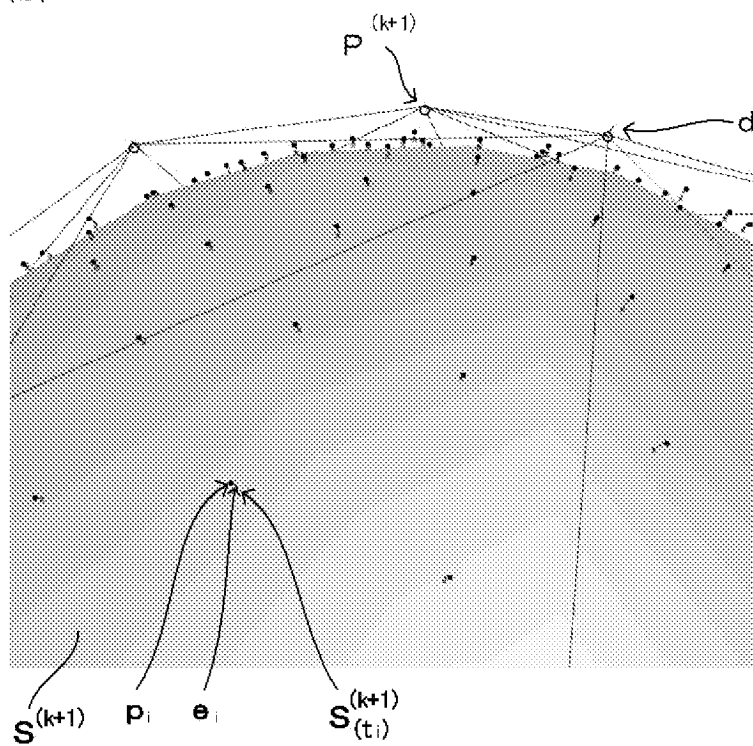
[図4]

[図5]

(a)

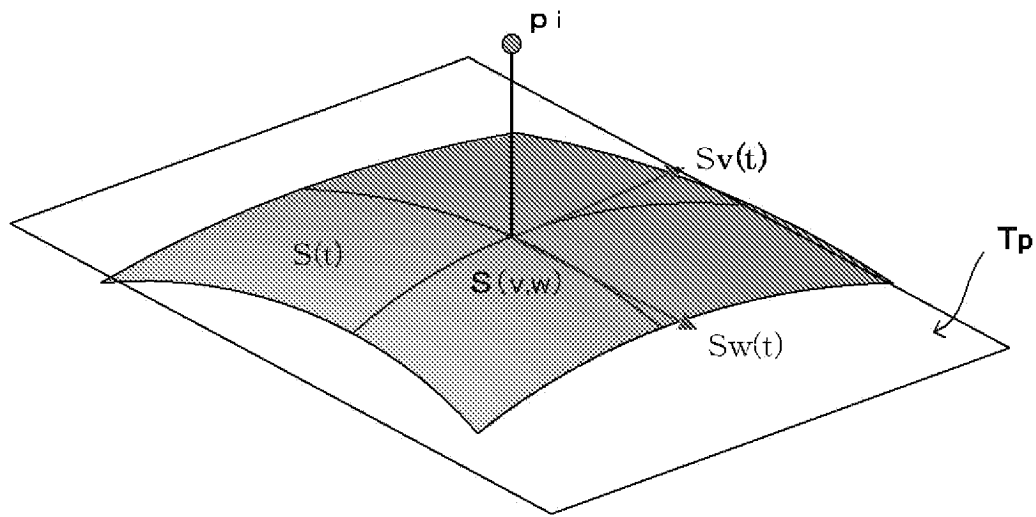


(b)



[図5]

[図6]



[図6]

[図7]

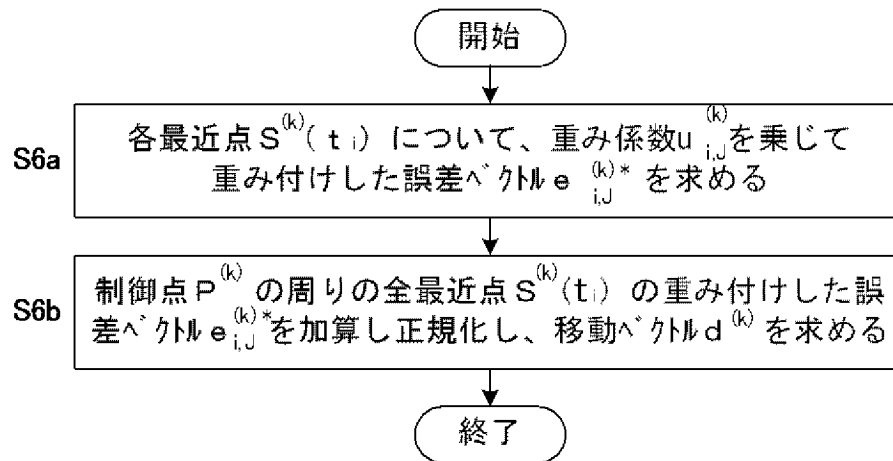
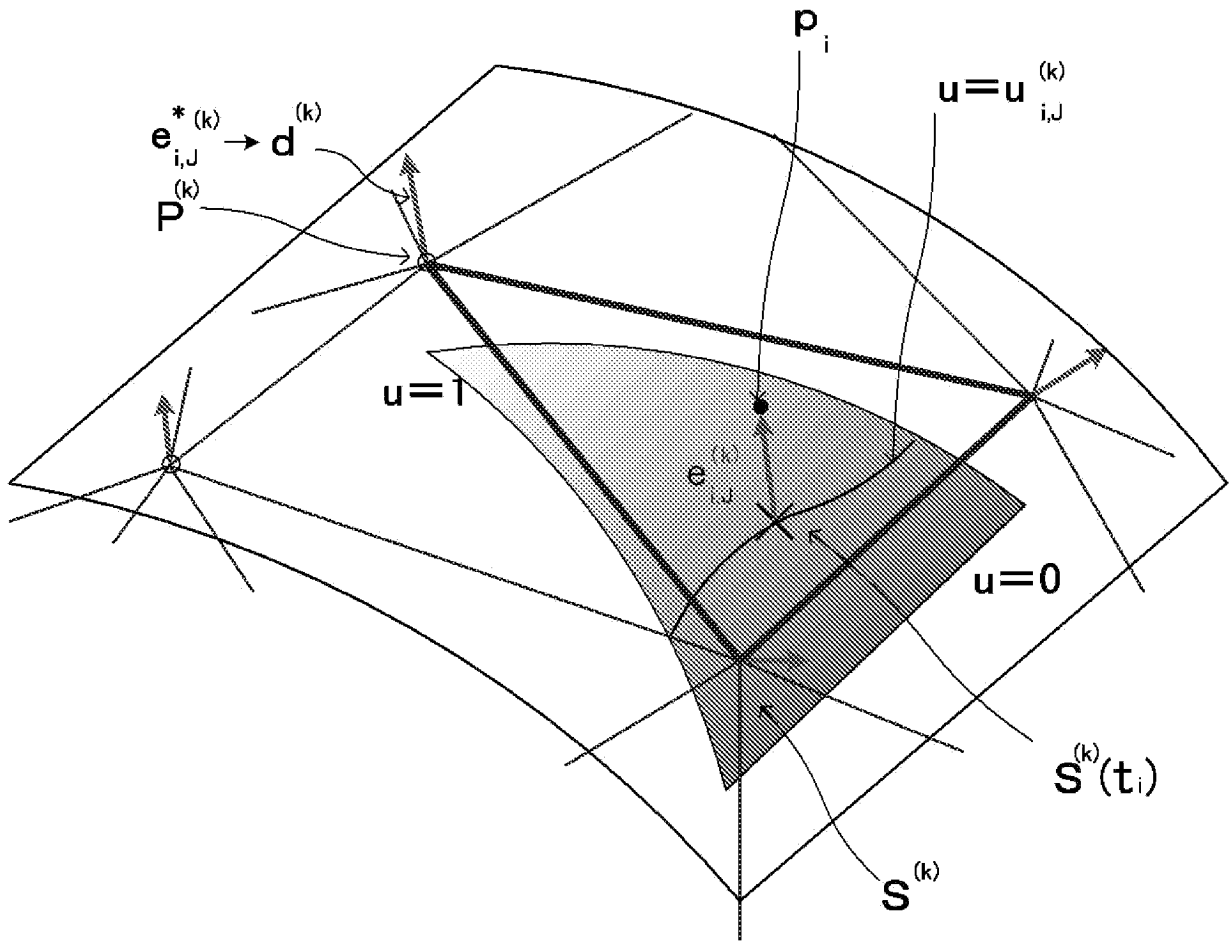


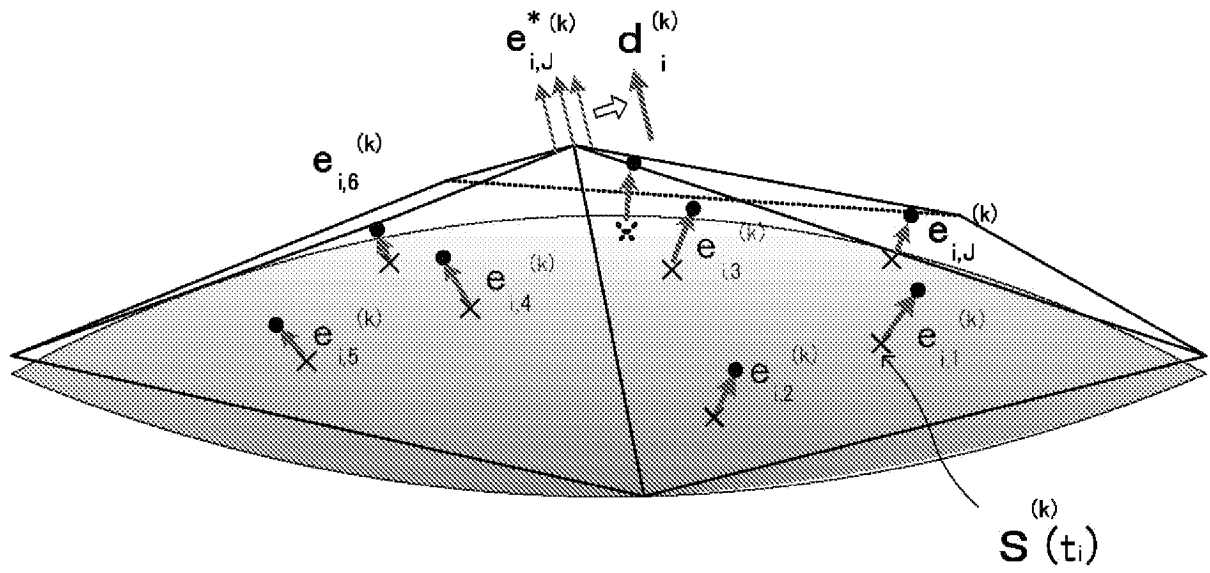
図7

[図8]



[図8]

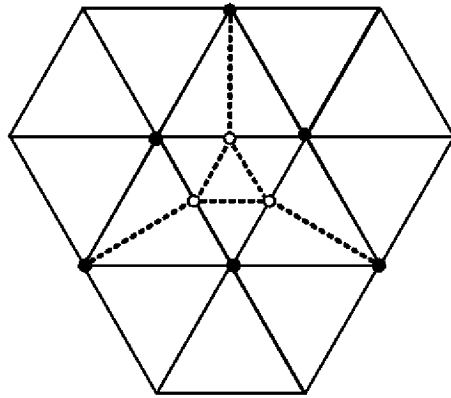
[図9]



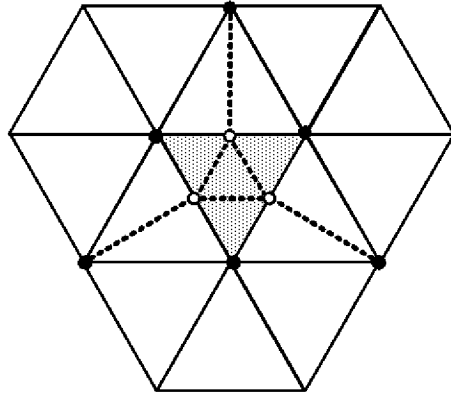
[図9]

[図10]

(a)



(b)



(c)

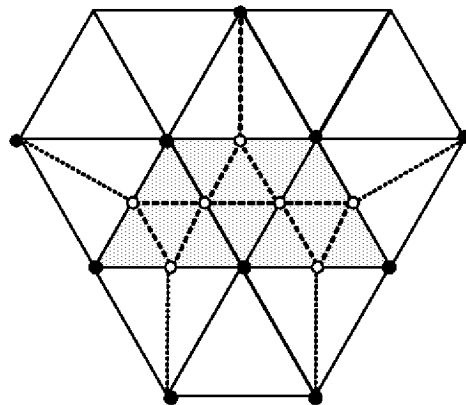
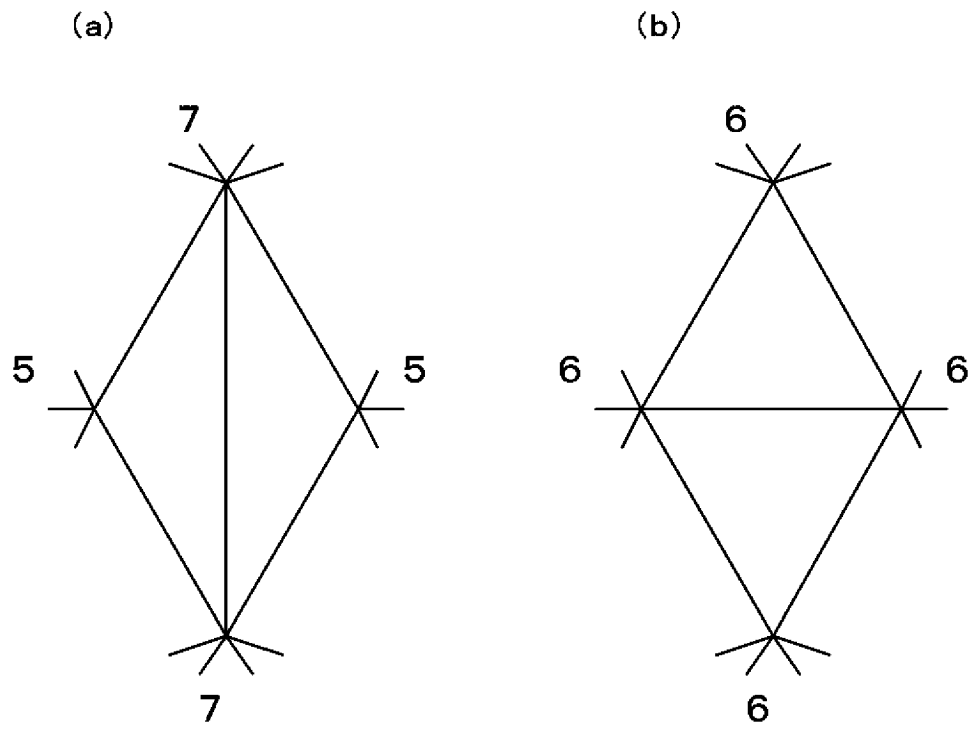


图10

[図11]



[図11]

[図12]

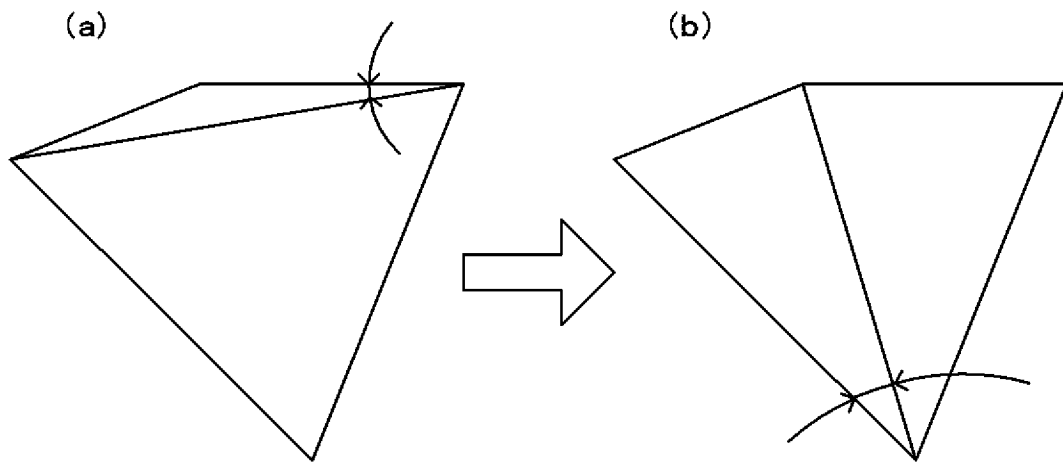


図12

[図13]

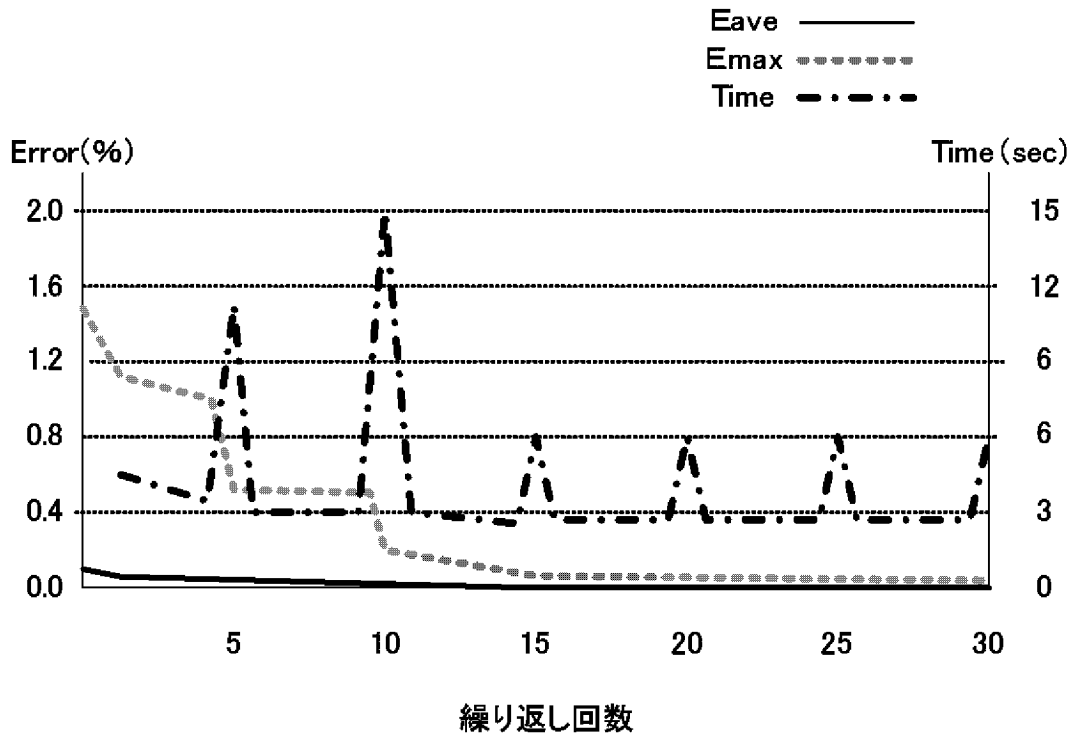
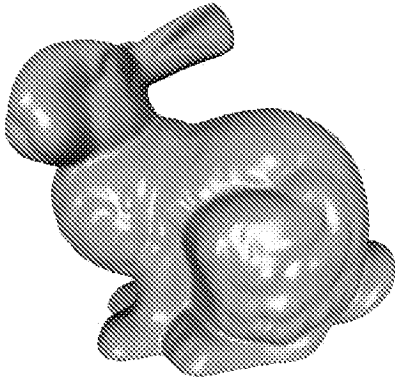


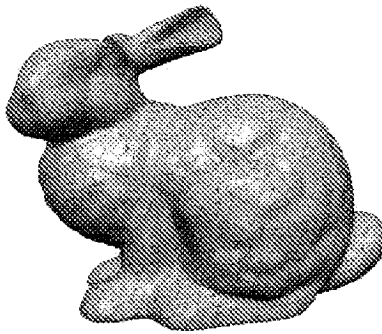
図13

[図14]

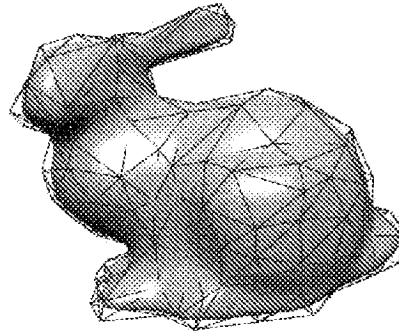
(a)



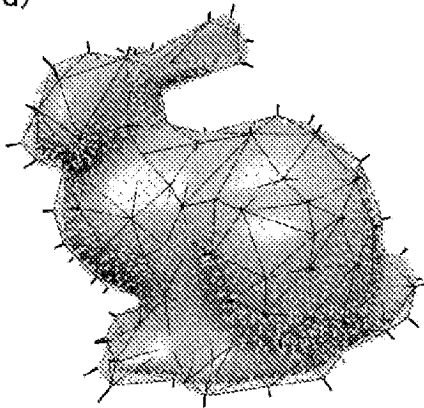
(b)



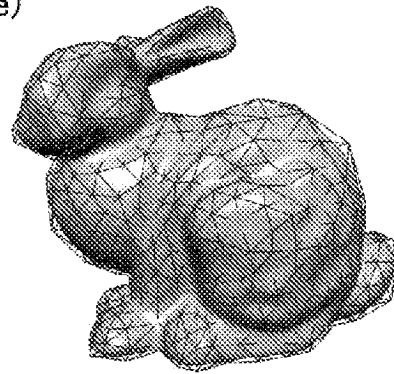
(c)



(d)



(e)



[図14]

[図15]

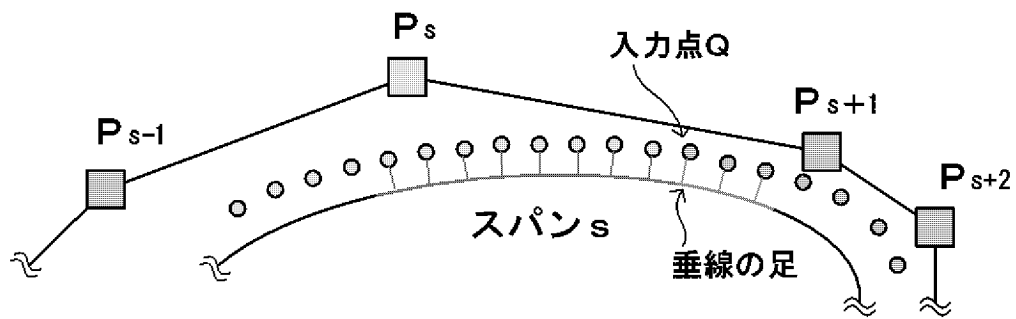


図15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2009/053252

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G06F17/50 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G06F17/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2009
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2009	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2009

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	WO 2007/083602 A1 (Yokohama National University), 26 July, 2007 (26.07.07), Claims; Par. Nos. [0063], [0117] (Family: none)	1-6, 8-10 7
Y A	JP 4-117572 A (Ricoh Co., Ltd.), 17 April, 1992 (17.04.92), Page 3, lower right column, line 14 to page 4, lower right column, line 18 (Family: none)	1-6, 8-10 7

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 08 April, 2009 (08.04.09)	Date of mailing of the international search report 21 April, 2009 (21.04.09)
--	---

Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer
Facsimile No.	Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G06F17/50(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G06F17/50

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2009年
日本国実用新案登録公報	1996-2009年
日本国登録実用新案公報	1994-2009年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
YA	WO 2007/083602 A1 (国立大学法人横浜国立大学) 2007.07.26, 【請求の範囲】, 【0063】, 【0117】 (ファミリーなし)	1-6, 8-10 7
YA	JP 4-117572 A (株式会社リコー) 1992.04.17, 3頁右下欄14行~4頁右下欄18行 (ファミリーなし)	1-6, 8-10 7

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献
 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

08.04.2009

国際調査報告の発送日

21.04.2009

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
 郵便番号100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

田中 幸雄

電話番号 03-3581-1101 内線 3531

5H

9191