

製品試作の迅速・容易化技術に関する研究

新ラピッドプロトタイピング法の開発(第5報)

近藤幸治

Development of A New Rapid Prototyping method(report5)

Koji Kondo

This paper describes how to get some edge & vertex data of a polyhedron .1st,some simple 3d_measuring data can be changed to a diagram such as plane or sphere or line or circle by Newton's Least-Squares method. 2nd,some planes are jointed to a polyhedron. and it's some edge & vertex data are calculated by original method.

1 はじめに

わが国の機械製造業の3次元化は引き続き進展している。機械設計に3次元CADが普及していることは言うまでもない。加工分野でも光造形に代表されるように3次元データからの直接加工するラピッドプロトタイピング方式が急激に普及しつつある。計測分野でも3次元計測機の普及とともに機器コストも削減され、以前より身近なものとなってきている。

しかし、3次元の計測に関しては、データ処理に問題が残っている。というのは、3次元計測データは2次元と比べて膨大な量のものとなるため、そのままではCADでの利用が難しく、データを抽象化する技術が必要となる。具体的には、立体のエッジや頂点の位置と方向、球の中心と半径の抽出等を行うことにより、計測立体をCAD化することができれば計測からのリバースエンジニアリングが可能となる。

本研究は製品試作の迅速・容易化を目指すものであるが、今回は3次元計測データの抽象化に取り組み、簡単な図形の抽象化に成功したのでここに報告する。

まず、前半で単純図形を最小二乗法で近似する法について述べ、後半で計測した点群データからの自動面張りとも面体抽出法について述べる。そのなかで、面のつながりを表現する方法として、独自の表現法を提案した。

2 計測データの図形近似

2-1 空間上の平面の表現法

図1において、平面をS、その法線単位ベクトルをU、法線とSとの交点をC、原点とC点の距離をLとする。

今、平面S上に任意の点Qがあるとすると次式が成り立つ。
内積 $Q \cdot C = (C + Q') \cdot C$; Q' は点Cから点Qへのベクトル

$$= C \cdot C + Q' \cdot C ; Q' \text{ は } C \text{ と垂直}$$
$$= L^2 \dots$$

式をLで割ると、 $Q \cdot U = L \dots$

さらにLで割ると、 $Q \cdot V = 1 \dots$

$$; V = U / L \dots$$

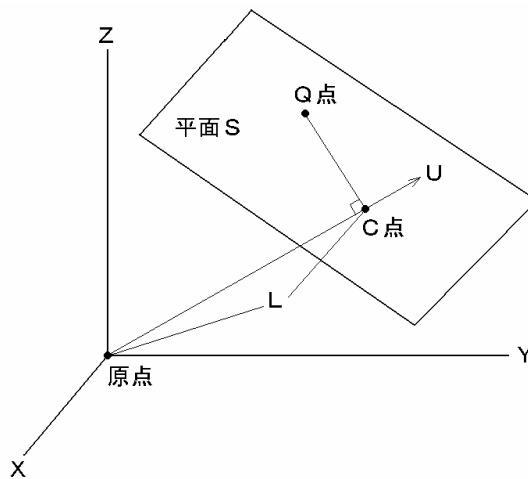


図1 平面の表現法

つまり、任意の平面はベクトルVのみで表現される。以降、Vを固有ベクトルとする。

2 - 2 平面の抽出法(3自由度)

空間上にPという点群があり、任意の要素をP_iとする。この点群に最も近い平面を平面Sとし、これを求めることを考える。図2参照。

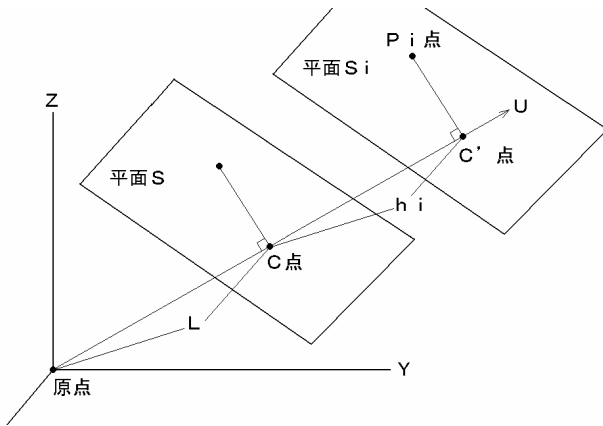


図2 平面の抽出法

点P_iを通り平面Sに平行な平面をS_iとする。平行なので、法線ベクトルUは同一である。平面S_iと原点との距離をL_i、平面Sと平面S_iとの距離をh_iとすると、

$$\begin{aligned} \text{式より、} \quad P_i \cdot U &= L_i \\ &= L + h_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{よって、} \quad h_i &= P_i \cdot U - L \\ &= (P_i \cdot V - 1) \cdot L \dots \end{aligned}$$

最小二乗法により、 $K = \{(h_i)^2\}$ が極小であるとすると、Kを固有ベクトルVの各要素V_jで偏微分した値は0である。

よって、 $\{2 \cdot h_i \cdot P_{ij} \cdot L\} = 0$;ただし、P_{ij}はベクトルP_iのj成分である。

$$\begin{aligned} L \text{は積算の外に出せるので、} \quad 2L \cdot \{h_i \cdot P_{ij}\} &= 0 \\ L \text{が0でない時、} \quad \{h_i \cdot P_{ij}\} &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{より、} \quad \{(P_i \cdot V - 1) \cdot L \cdot P_{ij}\} = 0$$

$$\text{よって、} \quad \{(P_i \cdot V) \cdot P_{ij}\} = \{P_{ij}\} \dots$$

3次元空間の場合、j = 1, 2, 3とおくと、

$$\begin{pmatrix} \{P_{i1} \cdot P_{i1}\} & \{P_{i2} \cdot P_{i1}\} & \{P_{i3} \cdot P_{i1}\} \end{pmatrix} \cdot V = \{P_{i1}\}$$

$$\begin{pmatrix} \{P_{i1} \cdot P_{i2}\} & \{P_{i2} \cdot P_{i2}\} & \{P_{i3} \cdot P_{i2}\} \end{pmatrix} \cdot V = \{P_{i2}\}$$

$$\begin{pmatrix} \{P_{i1} \cdot P_{i3}\} & \{P_{i2} \cdot P_{i3}\} & \{P_{i3} \cdot P_{i3}\} \end{pmatrix} \cdot V = \{P_{i3}\} \dots$$

以上の式は行列で表せるので、ガウスの消去法により固有ベクトルVが求まり、式より、平面Sが求まる。

ただし、以下の場合解が求まらない。

(例外0) P点の数が最低3点ないと平面は決まらない。

(例外1) P点が真の直線上に乗る場合、直線を含む平面

が無数に存在する。

(例外2) P点が原点を通る真の平面上に乗る場合、L=0なのでVが無限大になる。ただしUによる式表現は可能。

2 - 3 平面群の焦点抽出法

n次元の空間上に解平面群があり、この平面群との距離の二乗の和が最も近い点を焦点Pとし、これを求めることを考える。

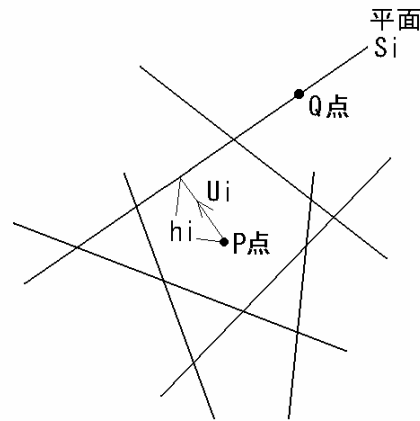


図3 焦点抽出法

任意の平面をS_iとし、その法線単位ベクトルをU_iする。平面S_i上の任意の点をQとし、点Pと平面S_iとの距離をh_iとすると、

$$\text{式より、} \quad (Q - P) \cdot U_i = h_i \dots \dots (\text{点Pを原点とする座標系で式に代入})$$

最小二乗法により、 $K = \{(h_i)^2\}$ が極小であるとすると、KをPの各要素P_jで偏微分した値は0である。

$$\text{よって、} \quad \{2 \cdot h_i \cdot (-U_{ij})\} = 0 \quad ; U_{ij} \text{はベクトル} U_i \text{の} j \text{成分である。}$$

$$\text{よって、} \quad \{(Q - P) \cdot U_i \cdot U_{ij}\} = 0$$

$$\text{よって、} \quad \{Q \cdot U_i \cdot U_{ij}\} = \{P \cdot U_i \cdot U_{ij}\}$$

より、原点と平面S_iとの距離L_iとすると、 $Q \cdot U_i = L_i$ であるので、

$$\{L_i \cdot U_{ij}\} = \{P \cdot U_i \cdot U_{ij}\} \dots$$

3次元空間の場合、j = 1, 2, 3とおくと、

$$\begin{pmatrix} \{U_{i1} \cdot U_{i1}\} & \{U_{i2} \cdot U_{i1}\} & \{U_{i3} \cdot U_{i1}\} \end{pmatrix} \cdot P = \{L_i \cdot U_{i1}\}$$

$$\begin{pmatrix} \{U_{i1} \cdot U_{i2}\} & \{U_{i2} \cdot U_{i2}\} & \{U_{i3} \cdot U_{i2}\} \end{pmatrix} \cdot P = \{L_i \cdot U_{i2}\}$$

$$\begin{pmatrix} \{U_{i1} \cdot U_{i3}\} & \{U_{i2} \cdot U_{i3}\} & \{U_{i3} \cdot U_{i3}\} \end{pmatrix} \cdot P = \{L_i \cdot U_{i3}\} \dots$$

以上の式は行列で表せるので、ガウスの消去法によりベクトルPつまり、焦点の座標が求まる。

2 - 4 球面抽出法 (簡易)

まず、点群の任意の2点が面対象となる平面 S_i を求める。平面 S_i は球面中心近くを通るはずなので、「平面群の焦点抽出法」を使って球面の中心を求める。

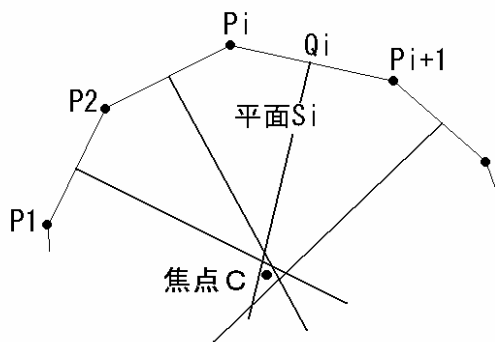


図4 球面抽出法

点群の i 番目の点を P_i とし、 P_i と P_{i+1} の中点を Q_i とする。

点 P_i から P_{i+1} へのベクトルを W_i とする。平面 S_i 上の任意の点を X とすると次式が成り立つ。

$(X - Q_i) \cdot W_i = 0$ よって、 $X \cdot W_i = Q_i \cdot W_i$
両辺を W_i の長さで割ると、 $X \cdot U_i = Q_i \cdot U_i$... ただし、 U_i は W_i に平行で長さ = 1
式は 式の平面の式に相当する。

「平面群の焦点抽出法」の 式に $L_i = Q_i \cdot U_i$ とし
て代入すると、ただし C は焦点。

$$\begin{pmatrix} \{U_{i1} \cdot U_{i1}\} & \{U_{i2} \cdot U_{i1}\} & \{U_{i3} \cdot U_{i1}\} \end{pmatrix} \cdot C = \{L_i \cdot U_{i1}\}$$

$$\begin{pmatrix} \{U_{i1} \cdot U_{i2}\} & \{U_{i2} \cdot U_{i2}\} & \{U_{i3} \cdot U_{i2}\} \end{pmatrix} \cdot C = \{L_i \cdot U_{i2}\}$$

$$\begin{pmatrix} \{U_{i1} \cdot U_{i3}\} & \{U_{i2} \cdot U_{i3}\} & \{U_{i3} \cdot U_{i3}\} \end{pmatrix} \cdot C = \{L_i \cdot U_{i3}\} \dots$$

以上の式は行列で表せるので、ガウスの消去法によりベクトル C つまり、焦点の座標が求まる。

次に、適切な半径を最小二乗法で求める。

最適な半径を r 、 R_i を球の中心 C と P_i 点の距離とする

$$K = \{(R_i - r)^2\}$$

K を r で偏微分した値は 0 になるので、

$$2 \cdot \{(R_i - r) \cdot (-1)\} = 0$$

$$\text{よって、} \{R_i - r\} = 0$$

つまり、 $r = R_i$ の平均...

2 - 5 球面のニュートン・ラプソン法による高精度化

中心点 P 、点群を Q_i とし、 Q_i から点 P へのベクトルを V_i 、 $R_i = |V_i|$ とする。

最小二乗法の定理から、 $K = \{(R_i - r)^2\}$; ただし r は球の半径。

$K / r = 2 \cdot \{(R_i - r) \cdot (-1)\} \dots = 0$ の時、 r は R_i の平均となる。...

つまり、4変数の内、 r は他の変数で表されるので、 P_x 、 P_y 、 P_z の3変数を解けばよいことになる。そこで、 E を以下のとおり定義する。

$$E(1) = K / P_x = 2 \cdot \{(R_i - r) \cdot (R_i - r) / P_x\}$$

$$E(2) = K / P_y = 2 \cdot \{(R_i - r) \cdot (R_i - r) / P_y\}$$

$$E(3) = K / P_z = 2 \cdot \{(R_i - r) \cdot (R_i - r) / P_z\}$$

...

E は点 P が最適であれば 0 となるはずなので、 E を近似誤差とみなす。

E も点 P_x 、 P_y 、 P_z の多変数関数 (非線形) であるので、次式が成り立つ。

$$E = [J] \cdot P \dots [J] \text{ はヤコビ行列} \dots$$

$$J a b = E a / P b \dots$$

、式より、

$$J a b = 2 \cdot \{(R_i - r) \cdot (R_i - r) / P a\} / P b$$

$$= 2 \cdot \{(R_i - r) / P b \cdot (R_i - r) / P a$$

$$+ (R_i - r) \cdot [(R_i - r) / P a] / P b\} \dots$$

から $[J]$ は求まる。

$E = -E$ として 式から P を求めれば $P + P$ が線形近似解となる。

E がゼロに近づくまで繰り返し行えばよい。

実際のシミュレーションでは変数の型に倍精度浮動小数点を用い、 E が改善されなくなるまで繰り返すことで、計算限界まで精度向上を図った。

次に、 $R_i / P a$ の展開について以下に示す。

$$R_i = |V_i| = (V_i \cdot V_i) \dots \text{内積の平方根} \dots$$

$$R_i / P a = (1/2) \cdot (1 / |V_i|) \cdot 2 \cdot V_i \cdot (V_i / P a)$$

$$= (1/R_i) \cdot V_i \cdot (V_i / P a)$$

$$V_i = P - Q_i \text{ より、} (V_i / P_x) = (1, 0, 0)$$

$$(V_i / P_y) = (0, 1, 0)$$

$$(V_i / P_z) = (0, 0, 1)$$

$$\text{よって、} R_i / P a = (1/R_i) \cdot (P a - Q_i a) \dots$$

したがって、式の2重偏微分項は、以下のとおりとなる。

1) $a \neq b$ の時
 $(R_i / P_a) / P_b = (P_a - Q_{ia}) \cdot (-1/R_i^2) \cdot R_i / P_b$
 $= (P_a - Q_{ia}) \cdot (-1/R_i^2) \cdot (1/R_i) \cdot (P_b - Q_{ib})$
 $= (P_a - Q_{ia}) \cdot (P_b - Q_{ib}) / R_i^3 \dots$

2) $a = b$ の時
 $(R_i / P_a) / P_a = (1/R_i) \cdot (P_a - Q_{ia})^2 / R_i^3 \dots$

よって、式は式から求めることができる。
 また、 r は R_i の平均値であるので、同様に求めることができる。

2 - 6 直線抽出法 (法)

点群を XY 平面に投影する。
 Z 軸を中心にだけ座標を回転し、新たに $X'Y'Z'$ 座標系を設け、 $X'Y'$ 平面で Y 方向の分散が最小となるを最小二乗法で求める。
 点群の座標を XYZ 系で $Q_i = (Q_{ix}, Q_{iy}, Q_{iz})$ とすると、
 $\theta = \text{atan}[2 \cdot (X_i \cdot Y_i) / (Y_i \cdot Y_i - X_i \cdot X_i)] / 2$; $X_i = Q_{ix} - (Q_x \text{の平均})$, $Y_i = Q_{iy} - (Q_y \text{の平均})$

Y' 軸を中心にだけ座標を回転し、新たに $X''Y''Z''$ 座標系を設け、 $X''Y''$ 平面で X 方向の分散が最小となるを最小二乗法で求める。

点群の座標を $X'Y'Z'$ 系で $q_i = (q_{ix}, q_{iy}, q_{iz})$ とすると、
 $\phi = \text{atan}[2 \cdot (X_i \cdot Z_i) / (Z_i \cdot Z_i - X_i \cdot X_i)] / 2$; $X_i = q_{ix} - (q_x \text{の平均})$, $Z_i = q_{iz} - (q_z \text{の平均})$

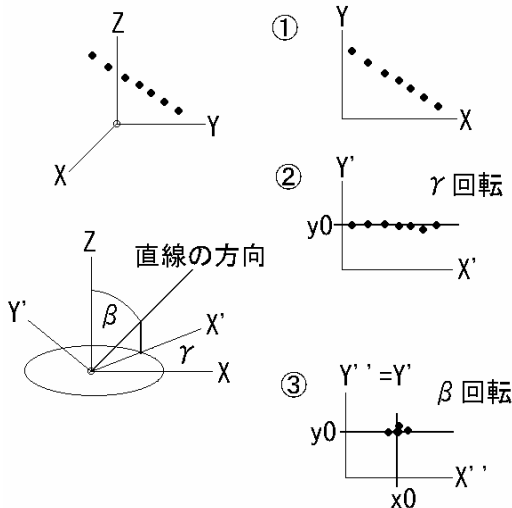


図5 直線の抽出法

通過点を $P_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ 、直線の方法ベクトルを $U = (U_x, U_y, U_z)$ 、 $[T]$ を静止座標系から動座標系への回転行列とすると、次式が成り立つ。

$(X_0, Y_0, Z_0) = (x_0, y_0, 0) [T]$
 $(U_x, U_y, U_z) = (0, 0, 1) [T]$

より、求めた直線の式は以下のとおり。

$(X - X_0) / U_x = (Y - Y_0) / U_y = (Z - Z_0) / U_z$

2 - 7 円弧抽出法 (法)

点群から基準平面 S を抽出する。
 平面 S の固有ベクトルを V とすると、平面 S の法線ベクトル U は V から求まる。
 U を回転後の Z' 軸の基本ベクトルとすると、 $U = (T(3,1), T(3,2), T(3,3))$ 。
 また、 $T(3,1) = \sin \theta$ 、 $T(3,2) = \cos \theta \cdot \sin \phi$ 、 $T(3,3) = \cos \theta \cdot \cos \phi$
 から θ と ϕ が求まる。
 平面 S に点群を投影して円の中心点と半径を求める。
 で求めた円の中心と半径を静止座標系に戻す。

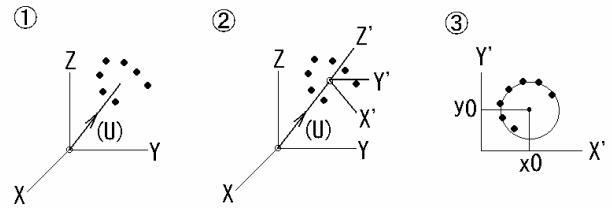


図6 円弧の抽出法

(結果) 直線状の空間図形では、解が求まらない場合がある。

2 - 8 空間平面上の N 次曲線抽出法 ($N = 2$ で説明)

まず、点群から基準平面 S を抽出する。
 平面 S の固有ベクトルを V とすると、平面 S の法線ベクトル U は V から求まる。
 U を回転後の Z' 軸の基本ベクトルとすると、 $U = (T(3,1), T(3,2), T(3,3))$ 。
 また、 $T(3,1) = \sin \theta$ 、 $T(3,2) = \cos \theta \cdot \sin \phi$ 、 $T(3,3) = \cos \theta \cdot \cos \phi$
 から θ と ϕ が求まる。

平面 S に点群を投影して XY 座標を求める。 $f = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ として、
 誤差 $h_i = y_i - f(x_i)$ ただし、 i 番目の点の X 座標を x_i 、 Y 座標を y_i とする。
 $K = h_i^2$ とし、係数 a, b, c に対する偏微分を取

ると0となるはずである。

よって、 $\{h_i \cdot x^2\} = 0$

よって、 $\{y_i \cdot x^2\} = \{f(x_i) \cdot x^2\} \dots \text{ア}$

同様に、 $\{y_i \cdot x\} = \{f(x_i) \cdot x\} \dots \text{イ}$

同様に、 $\{y_i\} = \{f(x_i)\} \dots \text{ウ}$

アイウの3式に $f = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ を代入すると、

$$\{x^4\} \cdot a + \{x^3\} \cdot b + \{x^2\} \cdot c = \{y_i \cdot x^2\}$$

$$\{x^3\} \cdot a + \{x^2\} \cdot b + \{x\} \cdot c = \{y_i \cdot x\}$$

$$\{x^2\} \cdot a + \{x\} \cdot b + \{1\} \cdot c = \{y_i\}$$

上記3式は行列で表されるので、係数 $a b c$ が求まる。

(結果) ・円弧データでも $N = 10$ 次ではほぼ近似できる。
 曲線が折り返し等で重なると、その部分が不正確になる。

Y

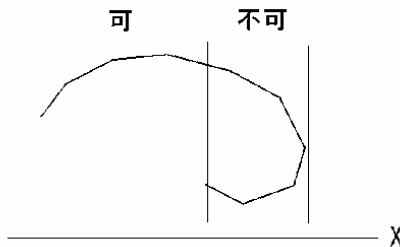


図7 N次曲線の抽出法

3 自動面張り

3次元計測によるランダムな点群データから三角メッシュを自動的に張るルーチンを開発した。以下、その詳細について述べる。

3-1 手順

- ・まず、スタート点(図8のA点)を選ぶ。
- ・スタート点に最も近い点Bを選び、辺ABを作る。
- ・辺ABに最も近い点Cを選び、三角形ABCを作る。
- ・三角形の辺ABに最短の点Dを探索する。

(探索条件)

- ア) 点Dは辺ABから見て点Cの反対側に存在すること。
- イ) 頂角ADBは一定角度(20°程度)以上であること。
- ウ) 辺ABの中点からの距離が最短であること。

最初の三角形からデータ列[A, B, C]を作る。以降これを「輪」と呼ぶ。

D点が見つければ「輪」を更新し、[A, D, B, C]とする。次の辺BCについて同様のことを行う。もし該当する点が無ければ、その辺に対する点は採らない。「輪」のどの辺も該当する点が無ければ、点が残っていても終了する。

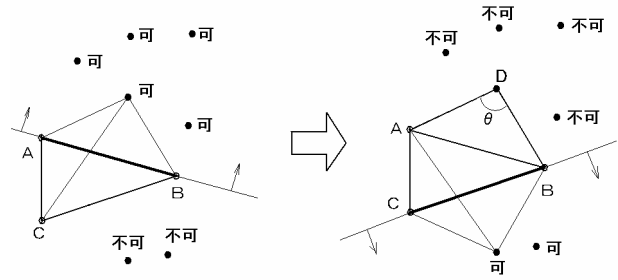


図8 輪の更新

(特例1) 図9において、辺ABの最差点がCであり、輪はACが短絡される。

(特例2) 図9において、辺EFと辺FGの最差点は同じ点Jであり、輪はEFGからEJGに変更される。

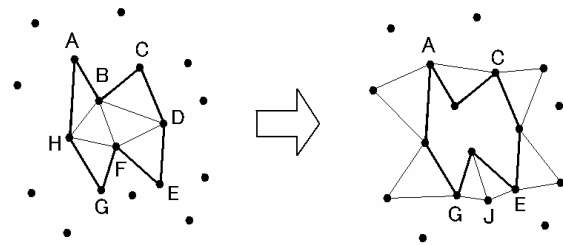


図9 輪の更新の特例

3-2 探索条件(ア)「点Dは線分ABから見て点Cの反対側に存在すること。」の実現方法

図10のように三角形ABC平面上に点Dが存在し、線分ABと線分CDの交点をQとおく。

点Aから点BへのベクトルをV、点Cから点DへのベクトルをWとすると、次式が成り立つ。

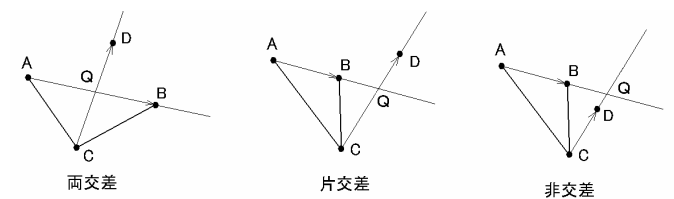


図10 線分同士の交差判定

$$Q = A + k_a \cdot V \quad , \quad Q = C + k_c \cdot W \quad \dots$$

式をxyに分解すると、

$$A_x + k_a \cdot V_x = C_x + k_c \cdot W_x$$

$$A_y + k_a \cdot V_y = C_y + k_c \cdot W_y$$

k_a と k_c でまとめると、

$$k_a \cdot V_x - k_c \cdot W_x = C_x - A_x \dots$$

$$k_a \cdot V_y - k_c \cdot W_y = C_y - A_y \dots$$

式から k_a と k_c が求まる。

(物理的意味)

両交差の時は k_a , k_c とも 0 以上 1 未満となる。

図 1 0 の片交差では k_c が 0 以上 1 未満となる。

つまり、点 D が線分 AB から見て点 C の反対側に存在することは、 k_c が 0 以上 1 未満となる片交差と同義である。

3 - 3 探査条件 (イ)「頂角 ADB は一定角度以上であること。」の意味と方法

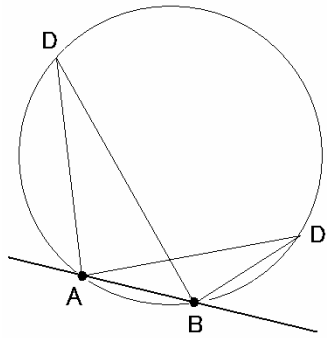


図 1 1 頂角制限

頂角が一定以下ということは、図 1 1 の円の内部に点 D が存在することになる。空間的には、線分 AB を軸に回転してできるドーナツの内部に点 D が存在することとなる。

頂角 = θ とすると、

$$\text{内積}(DA \cdot DB) = |DA| \cdot |DB| \cdot \cos \theta$$

から θ が求まる。

4 多面抽出法

3 で述べた自動面張りを発展させ、計測データを複数の平面からなる多面体として抽出し、そのエッジや頂点のデータを得ることに成功した。

4 - 1 自動面張りを応用した平面抽出

探査条件に「新たな面は基準面と一定角度以下であること。」を追加することにより、点群から平面部分を抽出可能である。図 1 2 の左側は立方体の角を自動面張りした例、右側は同じデータに上記探査条件を付加した例である。エッジの所で面の成長が止まっていることがわかる。

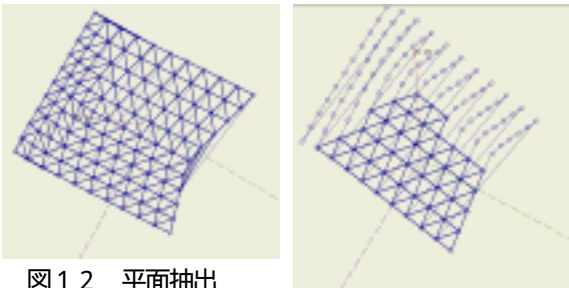


図 1 2 平面抽出

4 - 2 複数平面の探査法 1... 逐次平面抽出法

最初の平面探査の後、輪の 2 点に最も近い点を、新たな「輪」の始点とする。最初の面と同様に探査を行い、平面を成長させる。以上の面探査を点がなくなるまで行うことで、複数の平面が探査可能である。

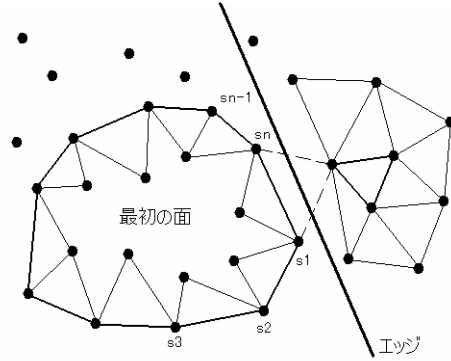


図 1 3 次の面への移行

4 - 3 単一稜線の抽出

2 つの平面の稜線は図 1 4 のように、平面中心 $c_1 \cdot c_2$ と原点を通る平面に垂直となる。

稜線の通過点 p_0 をこの平面上にとれば、 p_0 は c_1 と c_2 を結ぶ最短点となる。

稜線方向ベクトル u_{out} は以下の式から求め、正規化する。

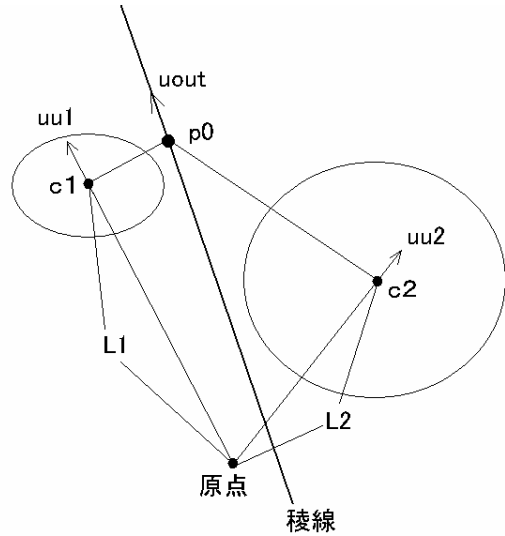


図 1 4 平面と稜線の関係

$$u_{out} \cdot uu_1 = 0$$

$$u_{out} \cdot uu_2 = 0$$

$$u_{out} \cdot (1, 1, 1) = 1$$

p_0 は以下の式から求める。

$$P_0 \cdot uu_1 = L_1$$

$$P_0 \cdot uu_2 = L_2$$

$$P_0 \cdot u_{out} = 0$$

4 - 4 複数稜線の抽出

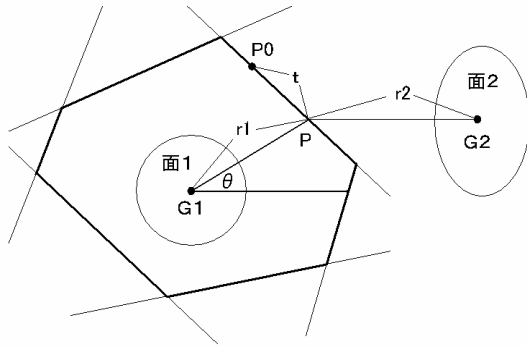


図15 平面データからの稜線抽出

図15のとおり、多面体の平面1の面重心をG1、平面2の面重心をG2とする。平面1と他の全ての面との稜線を抽出する。すると、全ての稜線は平面1上に存在する。

次に各面重心から、その平面に沿って円の半径を伸ばしていくと、最初に出会う面が求まる。

面重心G1から稜線上の任意の点P(px,py)への距離をr1、稜線の通過点P0(x0,y0)からPへの距離をtとすると次式が成り立つ。

$$Px=x0+t*ux=Gx+r1*cos$$

$$Py=y0+t*uy=Gy+r1*sin$$

以上の2式からr1がの関数として求まる。一方、面重心G2と点Pとの距離r2もの関数となるので、面1と面2はr1とr2の大きい方の値の半径で出会うことになる。これを0°から360°まで展開すれば、面1のエリアを求めることができる。

4 - 5 面境界の表現法

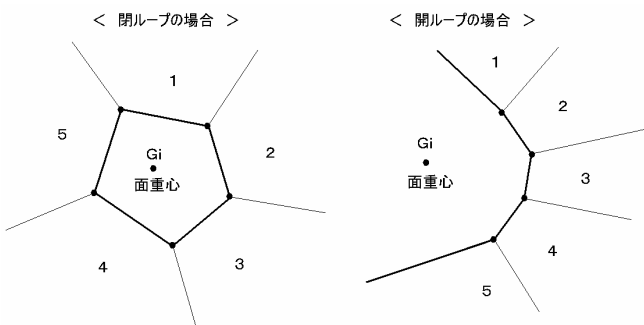


図16 面境界の形状

4 - 4で求めた複数稜線からなる面境界を表現するには、図16の左側のように3面の交点をつなぎ順に結べばよい。ただし、右側のように面重心からある方向に稜線が存在しない場合はエッジが閉ループにならず、

面i・1・2の交点から面2の反対方向へ無限長のエッジが存在し、

面i・4・5の交点から面4の反対方向へ無限長のエッジが存在する。

これらの面のつながりを表現する方法として、以下のリスト表現を提案する。この表現法は現在CADで主流になっている「境界表現法」(1973年ケンブリッジ大学)とは異なる独自のものである。

開ループ [1, 2, 3, 4, 5] ……最初と最後はループの先頭と末尾

閉ループ [1, 2, 3, 4, 5, 1] ……最初と最後の項が同じになるコト

図17にこの手法で全ての境界を表現した例を示す。計測データはサイコロの角部分。

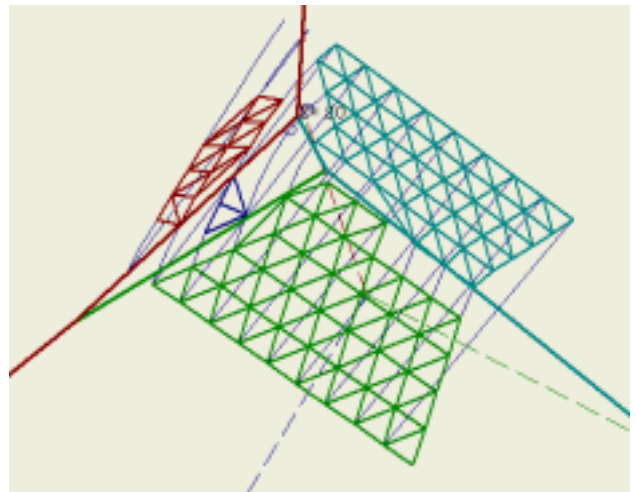


図17 多面抽出と面境界の表示

5 まとめ

本研究は製品試作の迅速・容易化を目指すものであり、今回は3次元計測データの抽象化に取り組み、多面体としての抽象化に成功した。今後、多面体として抽出する方法を発展させ、加工にまでつながるシステムを整備する必要がある。

また、開発したシュミレーションソフトウェアはツール化して整備し、その一部を参考文献のとおり公開した。

<参考文献>

1) 近藤幸治 : 「3次元計測1」
<http://www.vector.co.jp/vpack/filearea/win/education/engineer/index.html>

2) 福井県工業技術センターHP
<http://www.vcnnet.fukui.fukui.jp/~koji-kon/>