

## 水平三眼ステレオによる 遮蔽輪郭線からの曲面形状復元

植芝俊夫 富田文明

電子技術総合研究所

あらまし ステレオ法はシーンの3次元情報を獲得する最も一般性のある手法であるが、テクスチャを持たない物体を観測する場合、画像のエッジ点上でしかその座標値を得ることはできない。したがって、表面形状を復元できる物体は、多面体など各面がそれを囲む境界線で一意に決定できるものに限られていた。

本稿では、同一直線上に3台のカメラの投影中心を配した水平三眼ステレオを用いて、画像上に現われた物体輪郭線を見込む3本の視線の相互位置関係より輪郭線近傍での物体の凹凸を判定する方法を提案する。さらに対象物体のクラスを限定すればその断面形状が定量的に復元できることを実験結果と共に示す。

### Shape Reconstruction of a Curved Surface from Profile of the Object Using Trinocular Stereo Vision

Toshio UESHIBA Fumiaki TOMITA

Electrotechnical Laboratory

1-1-4, Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305 Japan

**Abstract** Although stereo vision is one of the most general technique obtaining three-dimensional(3D) information of the scene, 3D coordinates of the objects can be acquired only on the points where sudden change of image intensity occurs. This paper proposes a method for recovering shape of a curved surface with no texture pattern from trinocular stereo images. Profiles of the object on the image are classified based on geometric relationship between lines of sight observed by three cameras alligned on a straight line. Shape of the sections sliced by the epipolar planes can be reconstructed provided that the observed object is restricted to a certain class as well.

## 1. まえがき

ステレオ法は、シーンの3次元情報を受動的に得る方法として最も一般性のあるものである。著者の一人は、原画像をエッジ点の連なりが成す領域境界線で表現し、この境界線を単位としてステレオ画像の対応を求める手法を開発した<sup>(1)</sup>。しかし、このような領域の境界を対応単位とする方法では、対象物体の3次元情報は画像のエッジ点上でしか得ることはできない。したがって、表面形状を復元できる物体は、各面がそれを囲む境界線によって一意に決定できる物体、即ち多面体に限られていた。さらに、観測している物体表面が平面なのか曲面なのかという定性的判断すら困難であった。

単眼視では、テクスチャ等の特徴に乏しい曲面の法線方向をその陰影情報を用いることによって得る手法がよく知られているが<sup>(2)</sup>、光源や物体表面の反射特性に厳しい制約がある。一方、Limらは通常の二眼ステレオより得られた物体の輪郭線像への視線から断面形状を復元する方法を提案している<sup>(3)</sup>。しかし、彼らの手法では輪郭線が真の境界線であるのか曲面上に現われた見かけの境界点であるかの判定は他のエッジとの接続点解析によるとしており、実際にインプリメントはされていない。

本稿では、同一の水平線上に3台のカメラの投影中心を配した水平三眼ステレオを用いて、特徴に乏しい曲面形状をその輪郭線から復元する手法を提案する。まず、同一の境界点を見込む3本の視線の位置関係から観測している輪郭線の種類の判別を行なう方法について述べる。次に、対象物体のクラスを限定すれば、その輪郭線を含む面の三次元形状を定量的に復元できることを示す。また、本手法の実装の際には高精度のカメラキャリブレーション法が必要とされるが、その実現方法についても記す。最後に、実験によって本手法の有効性を確認した結果についても言及する。

## 2. 曲面形状復元の原理

### 2.1 水平三眼ステレオ

水平三眼ステレオとは、3台のカメラの投影中心を同一直線上に設置した撮像系である(図1)。この直線を基線と称す。一方、3次元空間中の任意の点Pに関して、Pと基線を含む平面が決まる。これをエピポーラ面と称す。各カメラに於ては、Pの像はカメラの投影面とエピポーラ面の交線上に観測される。

距離の測定精度を上げるためには、カメラ間距離を広げ、できるだけ異なった方向から対象点を観測する必要がある。そのため、3台のカメラの光軸は互いに平行ではなく、内向きの角度(輻輳角)を持たせて配置されている。

この撮像系によって得られた3枚の画像を境界線表現(B-rep)に変換し、セグメントと呼ばれる線の単位で

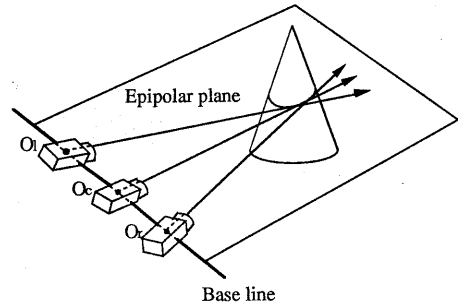
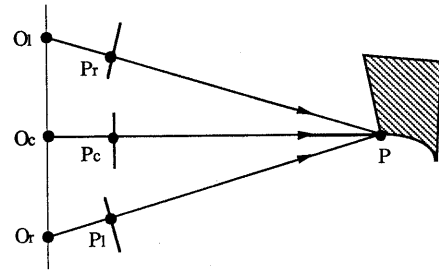
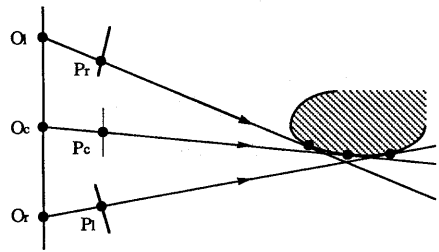


図1 水平三眼ステレオ



(a) 真の境界点



(b) 見かけの境界点

図2 境界点の判別

これらの画像間の要素の対応関係(3枚の画像間に対応するセグメントの3つ組)を得ることができる<sup>(4)</sup>。但し、本手法では点群に直線やパラメトリック曲線を当てはめることなく、セグメントを構成する点の整数座標値をそのまま残している。

### 2.2 境界点の種類判別と面の存在側の決定

基線を含み、3台のカメラの投影面と交差する任意の平面を考える。この平面(エピポーラ面)上に於て3枚の画像の対応点 $P_1, P_2, P_3$ が得られたとすると、これらの点と各カメラの投影中心を通る3本の視線が決定する。 $P_1, P_2, P_3$ が3次元空間中の同一の点Pの像である場合に限り、これらの3本の視線はこの点Pで交わる。この事実を用いることにより、着目している点がどのような種類の点であるかを以下のように判定する

ことができる。

- (1) 3本の視線が1点で交われば、観測している面の法線方向が不連続に変化する真の境界点である。
- (2) 交わらなければ、凸曲面の輪郭線上にある見かけの境界点である。

これらの事情を図2に示す。

(2)の場合はさらに、左カメラと右カメラの視線の交点が中央カメラの視線のどちら側に位置するかによって、曲面が画像上に観測された輪郭線に対して左右どちらの側に存在するのかが知ることができる。即ち、交点に対して中央カメラの視線のある側が面の存在する側である(図3)。

上記の判別法では、(1)と判定された場合でも境界点の付近の形状が凸であることもあり得る。即ち、凸曲面の法線の方向がある場所では不連続に変化してエッジをなす場合である(図4)。これは、たとえ(1)の場合でも必ずしも平面又は凹曲面であることを意味しないということである。それに対し、(2)と判定された場合は、少なくとも境界点の近傍では曲面が凸であることが保証される。

### 2.3 凸曲面の形状復元

上記(2)と判定された場合は、各カメラの視線は対象物体をこのエピポーラ面で切断した切口に関する接線になっている。よって、これらの視線を包絡線とする曲線がこの切口を囲む曲線となる。一般に、複数の接線を与えてもそれらを包絡線とする曲面は一意に決まらないが、対象物体のクラスを「任意の平面で切断した切口が楕円になる立体」に限れば、それらの接線(視線)に楕円を当てはめることによりそのエピポーラ面に於ける断面形状が求められる(図5)。さらに、基線を軸としてエピポーラ面を上下方向に回転走査しながら同様の処理を行えば全てのエピポーラ面での断面形状が求められ、対象物体の全体的な3次元形状が復元できる。

楕円は5つの自由度(長軸および短軸の半径、傾き、中心位置)を有するので、当てはめには5本以上の視線が必要である。画像中での対象曲面の右側、左側両方の境界が見えていれば6本の視線が得られるので、視線と楕円の距離の二乗和が最小になるように最適な楕円が当てはめられる(楕円当てはめの詳細な過程は付録を参照)。

なお、Limらも同様なアプローチで楕円の当てはめを試みているが、二眼ステレオを用いているので視線が4本しか得られず拘束条件が過小なので、真円度を評価関数に加えた上でパラメータを決定している<sup>10)</sup>。

### 3. カメラキャリブレーション誤差の補正

2.2で述べた境界線の種別判別法は、ほとんど同一点で交わる極めて近接した3本の視線の相互位置関係を利用しているため、カメラキャリブレーションの誤

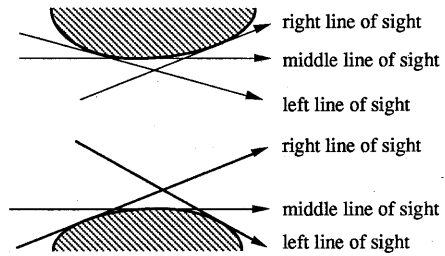


図3 凸曲面の存在する側の決定

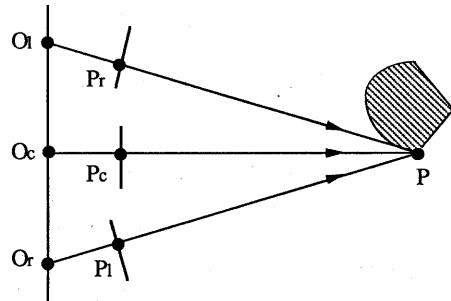


図4 面が凸でも真の境界点となる場合

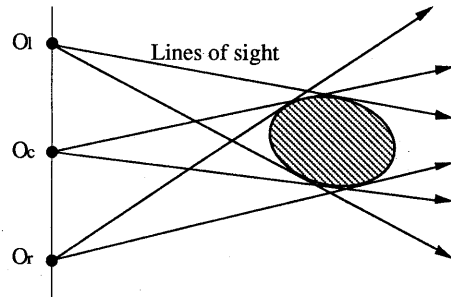


図5 視線への楕円の当てはめ

差に敏感であり、そのままでは実際に適用できない。カメラ間の距離を大きくとれば、3台のカメラから同一輪郭線を見込む視線の向きが大きく変化するので、位置関係の判定は容易になるが、反面、全てのカメラから共通に見えない死角領域が増えるので自ら限界がある。ここでは、この誤差を補正して本手法を実際に適用可能なものにする方法を述べる。

本手法を適用する際には、観測者が任意に定めたワールド座標系に対するカメラの絶対的な位置、姿勢よりも、カメラ相互の相対的位置関係の方が境界点の種類の判別精度および曲面形状の復元精度に大きく影響する。即ち、左右のカメラの対応関係から計算された

3次元空間中の点をキャリブレーションデータに基づいて中央カメラに仮想的に投影した場合、それが実際に観測されるその点の像と一致することが最も重要である。また、視線方向はカメラの位置よりも姿勢によってより大きな影響を受ける。したがって、ここでは左右のカメラの位置、姿勢および中央カメラの位置が正しくキャリブレーションされているものと見なし、それらに対して中央カメラの姿勢に誤差が含まれているものとする。

$x$ 軸を基線とし、基線からの距離を $r$ 、基線と中央カメラの光軸を含む平面からの角度を $\theta$ とした円筒座標系を考える。エピポーラ平面はこの $\theta$ のある値に固定したときの平面と考えることができる(図6)。

中央カメラの正面にある基線に垂直な直線を観測した場合、その円筒座標への射影は $x$ 軸に垂直な真円を成す。カメラキャリブレーションに誤差がなければ、左右のカメラの対応関係から3次的に復元されたこの直線を円筒座標に射影したものがこの真円と一致する。ところが中央カメラの位置、姿勢が誤差を含んでいると、この射影は $x$ 軸に対して見かけ上斜めに円筒に入射しその切口は楕円となる。基線に垂直な直線を観測してもカメラの基線軸まわりの回転誤差は検出できないので、基線に垂直なベクトル

$$n_a = [0 \quad \cos\phi \quad \sin\phi]^t$$

のまわりの角度 $\phi$ の回転をカメラの姿勢誤差とする。すると上記の楕円の法線方向は、

$$e_x \cos\phi + n_a n_x (1 - \cos\phi) + n_a \times e_x \sin\phi \\ = [\cos\phi \quad \sin\phi \sin\phi \quad -\sin\phi \cos\phi]^t \quad (e_x = [1 \quad 0 \quad 0]^t)$$

となり、よって楕円の式は

$$[x \quad r \cos\theta \quad r \sin\theta] \begin{bmatrix} \cos\phi \\ \sin\phi \sin\phi \\ -\sin\phi \cos\phi \end{bmatrix} = \text{const}$$

と表される。したがって、回転角 $\theta$ 、距離 $r$ におけるエピポーラ面上での楕円と真円の距離は

$$\varepsilon = x - \text{const} = [r \cos\theta \quad r \sin\theta] \begin{bmatrix} -\tan\phi \sin\phi \\ \tan\phi \cos\phi \end{bmatrix}$$

となる。この $\varepsilon$ は左右のカメラの視線の交点と中央カメラの視線との距離として実測できる。そこで、直線像の各点毎に $\varepsilon$ を調べ、その二乗和を最小にするような $\phi$ 、 $\theta$ を求めれば中央カメラの姿勢誤差が補正できる。

#### 4. 実験

##### 4.1 実験装置とカメラキャリブレーション

提案した手法の有効性を実験によって確認した。機器として、有効画素数768×493の高解像度カメラ(SONY XC-007)を3台用い、定盤上に固定した。た

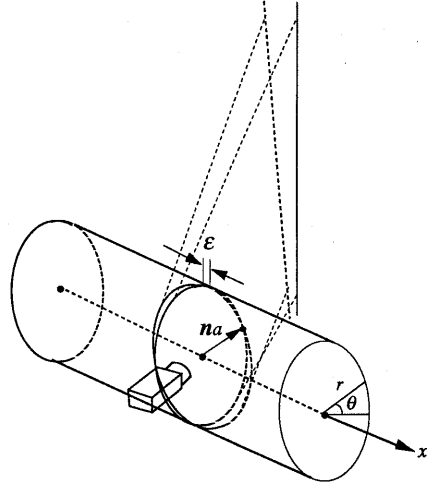


図6 中央カメラの姿勢誤差の補正

だし、3台のカメラ中心を一直線上にそろえるため、右カメラのみは、位置、姿勢が微調整できる光学台に設置した。

まず最初に、平面上の3次元位置が既知の参照点を見せることにより、カメラの位置、姿勢、焦点距離等のパラメータをそれぞれのカメラについて独立に求めた。これは、以前レンジファインダのキャリブレーションの際に開発したカメラキャリブレーション法をそのまま用いた<sup>6)</sup>。左右両端のカメラと中央カメラとの距離はそれぞれ189.3mmと206.3mm、光軸間の成す角(輻輳角)はそれぞれ15.8degと12.9degであった。

次に3で述べたように、基線にはほぼ垂直な角柱のエッジを観測し、左右のカメラの視線の交点と中央カメラの視線との位置ずれから中央カメラの位置を補正した。

##### 4.2 処理手順と視線方向の精密計算

まず、画像全体を3×3のSobel operatorで微分し、その極大点を追跡して境界線画像を得る。次に、その3枚の境界線画像の対応をとって境界線セグメントの3つ組を得る。

本手法では視線の方向を可能な限り精密に得る必要がある。画像の量子化誤差をできるだけ除去するため、以下のようなサブピクセル処理を施した。まず、エッジ点の水平位置は着目している点の両隣を含めた3点でのエッジ強度による重心点として計算した。与えられたエピポーラ面と画像上の輪郭線との交線は、この面の直上、直下にある輪郭点を求め、それらの水平位置を上記の重心演算で精密化した後、これら2点を結ぶ直線とエピポーラ面の交点として計算した。

##### 4.3 円錐形状の復元

図7(a)に示す円錐の画像からその形状を復元するこ

とを試みた。

同図(b)に画像から抽出された境界線、同図(c)に分類された左輪郭線、右輪郭線を示す。さらに、断面に楕円を当てはめて形状復元を行った結果を図8に示す。円錐形状が正しく復元されていることがわかる。基線と円錐軸との距離は約790mmであった。なお、3台のカメラのいずれからでも死角になって見えない部分は点線で示されている。

### 5. むすび

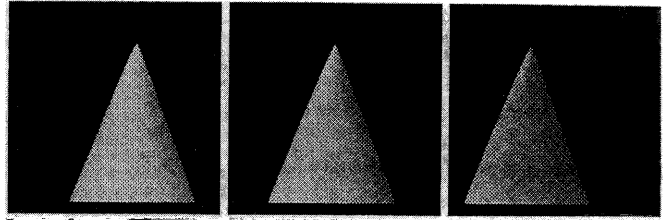
テクスチャ等の特徴に乏しい曲面について、水平三眼ステレオを用いることにより、その境界線の種類を判定し、さらにエピソード面による断面が楕円を成すと仮定してその形状を定量的に復元する方法を提案した。さらに、本手法の実装に際して問題となるカメラキャリブレーションの誤差を補正する方法も同時に示した。また、実験によって本手法の有効性を確認した。

切口が楕円になる立体には、任意の姿勢でおかれた楕円柱および楕円錐、楕円体（球を含む）等が含まれる。また、必ずしも軸が直線にならない筒状物体の中にもその切口を近似的に楕円とみなせるものが多いので、本手法はかなり広いクラスの曲面物体に適用可能である。

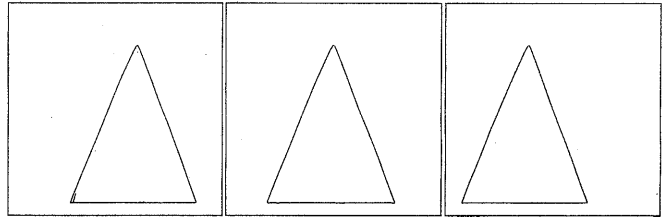
本稿では、中央カメラの姿勢の補正の際に基線まわりの回転誤差を無視した。したがって、垂直に近い輪郭線のみしかその種類を正確に判定できない。一般にステレオ法では水平に近いエッジの測定精度が劣ることは避けられないが、これを考慮することによって判定可能な方向の範囲を広げることが今後の課題である。また、得られた断面形状を一般化円筒表現に変換する方法についても検討したい。

### 参考文献

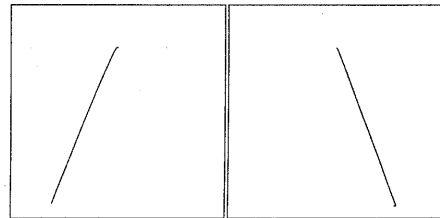
- (1) 富田文明, 高橋裕信: "ステレオ画像の境界線表現に基づく対応", 信学論(D), J71-D, 6, pp.1074-1082, (昭63-06)
- (2) B.K.P.Horn: "Obtaining shape from shading information", The psychology of computer vision, McGraw-Hill, (1975)
- (3) H.S.Lim and T.O.Binford: "Curved surface reconstruction using stereo correspondence", Proc. of Image Understanding Workshop, pp.809-819 (Apr. 1988)
- (4) 杉本和英, 高橋裕信, 富田文明: "水平3眼ステレオ



(a) 原画像



(b) 境界線画像



(c) 左輪郭線と右輪郭線への分類

図7 円錐の輪郭線の分類

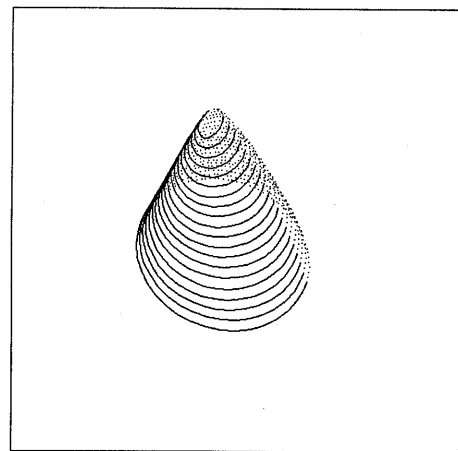


図8 円錐の形状復元

画像のB-repに基づく対応", 情報処理学会第36回全国大会, pp.1773-1774, (昭63-03)

- (5) P.Giblin: "Reconstruction of surfaces from profiles", Proc. of Image Understanding Workshop, pp.900-908 (Feb. 1987)
- (6) 植芝俊夫, 吉見隆, 大島正毅: "光切断法に基づくレンジファインダのための高精度キャリブレーション法", 信学技報, PRU89-62 (平2-10)
- (7) 植芝俊夫, 富田文明: "水平3眼ステレオによるプロフィールからの曲面形状復元", 情報処理学会第37回全国大会, pp.1533-1534, (昭63-09)

付録 視線群への楕円当てはめ

### A. 1 楕円の方程式

あるエピポーラ平面上に於て観測される視線の2次元直線方程式を

$$n_i^T x = d_i \quad (i=1, 2, \dots, N; |n_i| = 1) \quad (A1)$$

とする。但し、 $n_i$ の向きは、当てはめるべき楕円に対し、外向きにとるものとする。また、その楕円の方程式を

$$(x-t)^T A (x-t) = 1 \quad (A2)$$

$$A = RA^T R^T \quad R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad A^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{a^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{b^2} \end{bmatrix}$$

とする。ここで、 $a, b$ は楕円の長軸、短軸の長さ、 $\theta$ は長軸の傾き、 $t$ は楕円の中心位置をそれぞれ表す(付図参照)。

### A. 2 視線と楕円の距離

法線の向きが $n_i$ となる楕円上の点 $x_i$ を考える。一般に、 $x_i$ に於ける法線の向き(楕円の外側を向くものとする)は(A2)の左辺を $x$ で微分して $x = x_i$ としたものに等しいので、適当な正定数 $k$ を用いれば

$$A(x_i - t) = kn_i$$

と表される。また、 $x_i$ は(A2)式を満たすので、これらを連立して $x_i$ について解けば、

$$x_i = \frac{A^{-1}n_i}{\sqrt{n_i^T A^{-1}n_i}} + t$$

を得る。よって、この楕円と(A1)式で表される直線の距離 $l_i$ は

$$l_i = \frac{|n_i^T x_i - d_i|}{\sqrt{n_i^T A^{-1}n_i + n_i^T t - d_i}} \quad (A3)$$

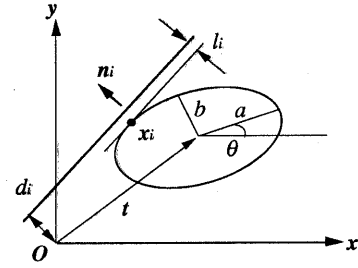
となる。

### A. 3 楕円の当てはめ

(A1)式で表される複数の視線が与えられた時、それらを包絡線とする最適な楕円は、各視線に関する(A3)式の距離の2乗和

$$J = \sum_{i=1}^N \sqrt{n_i^T A^{-1}n_i + n_i^T t - d_i}^2 \quad (A4)$$

を最小にするものとして求められる。また、 $A$ は正値対称行列だから $A^{-1}$ もそうであり、したがって



付図 楕円とその接線

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^2 + a_2^2 & a_2(a_1 + a_3) \\ a_2(a_1 + a_3) & a_2^2 + a_3^2 \end{bmatrix}$$

とおける。(A4)を最小化するために、まず

$$\frac{\partial J}{\partial t} = 0 \quad (A5)$$

となるよう $t$ を決定する。すると、 $t$ は

$$t = \left( \sum_{i=1}^N n_i n_i^T \right)^{-1} \sum_{i=1}^N (d_i - \sqrt{n_i^T A^{-1}n_i}) n_i \quad (A6)$$

と解かれ、未知ベクトル $a = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T$ によって表される。これより、(A4)の評価関数は改めて

$$J(a) = \sum_{i=1}^N \left| \sqrt{n_i^T A^{-1}n_i} + n_i^T \left( \sum_{j=1}^N n_j n_j^T \right)^{-1} \sum_{j=1}^N (d_j - \sqrt{n_j^T A^{-1}n_j}) n_j - d_i \right|^2 \quad (A7)$$

と書かれる。よって、これを最小化するためには、

$$\frac{\partial J(a)}{\partial a} = 0 \quad (A8)$$

なる $a$ を下記のNewton法で逐次的に求める。

$$\begin{cases} \Delta a_{j+1} = \left( \frac{\partial^2 J(a_j)}{\partial a^2} \right)^{-1} \frac{\partial J(a_j)}{\partial a} \\ a_{j+1} = a_j + \Delta a_j \end{cases} \quad (j=0, 1, 2, \dots) \quad (A9)$$

逐次近似法では、真の解に十分近い初期値を与えることが重要である。ここでは、与えられた視線からの距離の二乗和が最小になる真円を初期値とする。真円は未知ベクトル $a$ が $a = [r \ 0 \ r]^T$  ( $r$ : 円の半径)となる場合である。よって、これを(A7)に代入し、 $r$ で微分したものを0とすることにより、 $r$ は

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N d_i - \sum_{i=1}^N n_i^T \left( \sum_{j=1}^N n_j n_j^T \right)^{-1} \sum_{j=1}^N d_j n_j}{N - \sum_{i=1}^N n_i^T \left( \sum_{j=1}^N n_j n_j^T \right)^{-1} \sum_{j=1}^N n_j} \quad (A10)$$

と求められる。これを用いて、(A9)の初期値を

$$a_0 = [r \ 0 \ r]^T$$

と決定する。