

# 未計測領域の平面当てはめによる 三次元計測のための視方向決定法

大槻正樹 佐藤幸男  
ohtsuki@hilbert.elcom.nitech.ac.jp  
名古屋工業大学電気情報工学科

〒466 名古屋市昭和区御器所

小型レンジファインダを用いて全周形状を計測するために、視方向を決定する手法について述べる。まず、物体表面上に注目点を配置する。注目点は形状データの欠損領域に置く。物体表面は連続で交わりのない曲面をなす。この条件から計測領域の間に互いに交わりを持たず連続な三角平面を配置し、面上に注視点を置く。注視点位置を決定するために、注視点を中心とする測地ドームを設置する。形状データを障害物と見なして、測地ドーム上に視線を遮られずに注視点を観測できる領域を表現する。本稿では形状データにボクセルを使用する。本手法を確かめるため、実存の計測システムを計算機内で構成し、シミュレーション実験を行っている。

## EYE POINT SHIFTING ALGORITHM FOR 3-D SHAPE MEASUREMENT BY PLANE FITTING ON OCCLUDED AREA

Masaki Otsuki and Yukio Sato

Dept. Electrical and Computer Engineering  
Nagoya Institute of Technology  
Gokiso, Showa-ku Nagoya-shi 466, JAPAN

Eye point shifting algorithm for measuring 3-D whole shape using rangefinder is described. This algorithm puts the gazed point on the object surface. This point is put on the unmeasured area. Object surface is continuous and has no crosses. Using these conditions, continuous and no cross triangle patches are arranged between some measured areas. Gazed point is put on one of the planes. A geodesic dome is generated around the gazed point to decide the eye point. Some areas proposed for eye points are expressed on the geodesic dome. This algorithm is simulated on the computer in which our active rangefinder system is constructed.

## 1 はじめに

三次元物体形状を非接触で計測する機器としてレンジファインダがある。これはシーンに特定のパターンを持つ光を照射し、その画像から三次元物体形状復元する機器であり、画像として得られないオクルージョン部分を計測するために、一般に(1)複数のレンジファインダを配置したり、(2)ターンテーブル等により計測物やレンジファインダに回転運動を与える[1][2]、(3)あるいはロボットマニピュレータなどを用いて視点移動を伴う計測[3]-[5]を行うことが多い。複雑な形状を持つ対象物を安定して計測するには(3)の手段が望ましいが、そのためにはレンジファインダの視点移動問題が伴う。この視点位置は、より高度なシステムでは自動的に決定されることが望ましい。本稿では5軸のロボットマニピュレータに小型のレンジファインダを搭載した計測システムを用い[5]、その視点位置を自動的に決定する手法について報告する。

レンジファインダの視点決定問題は古くから行われている研究である。例えば計測空間中のオクルージョン領域をOctreeで表現し、もっとも大きなノードを注目する方法やオクルージョン領域とデータのない領域との境界を注目する方法[6]がある。文献[4]は後者の手法を応用したものである。これらの手法はオクルージョン領域の計算に計測領域とレンジファインダの視点とで張られる錐曲面を用いるため非常に不安定であるという欠点がある。また文献[7]では、距離画像中に含まれるオクルージョンをカメラによるタイプとスリット光源によるタイプの二種類に分類し、それぞれを除去するよう視点を移動する。これらはいずれもレンジファインダが注目すべきベクトルを決定する手法であり、視点位置の決定法まで報告した物ではない。

本報告では視方向の決定を(1)対象物表面上の注目する点の決定と(2)観測する視点の決定の二つに分ける。注目点は以下のように決定する。まず複数方向から計測したレンジデータをボクセル空間中で統合する。統合されたレンジデータは物体表面の部分集合をなす。まだ計測されていない物体表面上の領域（以下欠損領域）は計測領域以外の部分となり、未計測と計測領域は互いに交わらない連続な曲面となる。この条件を用いて欠損領域に連続で交わりを持たない複数の三角形平面を配置する[8]。配置された面は欠損領域の近似面を表す。そこで近似面を大きい順に計測していく、最終的に欠損領域がなくなるかレンジファインダの

ジオメトリの条件下計測不可能な面の集合となれば計測を終了する。各注目点に対する視点位置の決定は、注目点を中心として一定の厚みを持つ中空球内に視点を配置する問題として処理する。既に計測されている形状データは、次の視点を決定する際の視線を遮る障害物と考えることができる。そこで中空球中を、障害物に遮られずに注目点を観測できる領域とできない内領域に分け、観測できる領域内にレンジファインダを配置するように視点を決定する。

本手法を確かめるため文献5の計測システムを計算機内に構築し、シミュレーション実験を行った。

## 2 計測システム

図1にレンジファインダCubicscope[5]を示す。このレンジファインダは時系列空間コード化法に基づくレーザレンジファインダである。図2はCubicscopeを構成する各装置の配置図である。CCDカメラの画面横軸方向約110mmの所に回転ミラーが設置してある。画面縦軸に平行なレーザスリット光をこのミラーで画面横軸方向に走査し、その画像をカメラで撮影する。レーザの走査角はカメラの光軸方向に対し約40°、カメラの画角は横方向に約40°で、カメラから150mm～300mmの範囲を計測するよう調整してある。このレンジファインダを5軸の自由度を持つ多関節型マニピュレータに搭載し、視点移動を伴う計測を行う。各レンジデータはマニピュレータの制御パラメータにより共通のボクセル空間に投影・統合される。

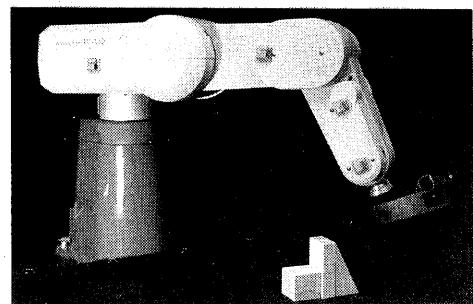


図1. レンジファインダCubicscope.

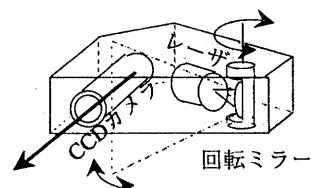


図2. レンジファインダの構造.

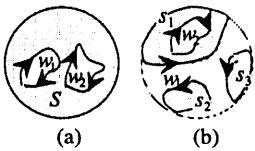


図3. 球面における欠損領域

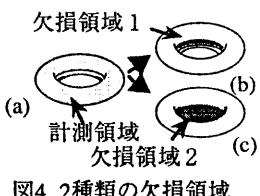


図4. 2種類の欠損領域.

### 3 注目点の決定

一章で述べた通り本稿では計測領域から未計測の領域を、交差しない連続な三角平面として推定し、各三角平面を注目するように視点を移動させる。本章ではまず三次元ユークリッド空間における欠損領域の定義を述べた後、ボクセル空間における欠損領域を定義する。その後欠損領域を三角形平面群で表現する手法を述べ、最後に三角形平面群のうち計測に適さない平面について述べる。

#### 3-1 欠損領域

三次元ユークリッド空間  $\mathbf{R}^3$  中に存在する物体を  $V$  とすると、 $V$  の外部は  $\mathbf{R}^3 - V$  と表すことができる。 $\bar{V}$  は  $V$  の閉包を表す。この時  $V$  の表面  $S$  は式(1)のように表される。

$$S = \bar{V} \cap \mathbf{R}^3 - V \quad (1)$$

この時  $S$  は境界が無く重複点のない閉曲面となる。レンジファインダで計測された形状データ  $S'$  は表面形状を表すため、 $S$  の部分集合として表され、一般に複数の計測領域  $s_i (i=1, \dots, n)$  の和として表される。

$$S = \bigcup_i s_i \subseteq S' \quad (2)$$

まだ計測されていない欠損領域  $W$  は  $S - \bar{S}'$  と表すことができ、同様に

$$W = \bigcup_j w_j (j=1, \dots, m) \quad (3)$$

と表すことができる。 $w_j$  はまだ計測されていない一つの領域を表す

計測領域  $S'$  と欠損領域  $W$  の境界を  $\partial S$  と表すと、 $\partial S$  は式(1)と同様に

$$\partial S = \bar{S}' \cap \mathbf{R}^3 - S \quad (4)$$

と表すことができる。対象物  $V$  が球と位相同型でありかつ形状データ  $S'$  が単一の領域のみで構成されていた場合、図3(a)に示すように、欠損領域  $W$  は以下の式で表される閉曲線群  $\partial S$  に取り囲まれた曲面となる。

$$\partial S = \bigcup_k \partial s_k \quad (5)$$

但し  $\partial s_k = \bar{s}' \cap \overline{w_k}$

また  $S'$  が複数の領域で構成されていた場合、 $W$  は図3(b)に示すように計測領域  $s_i$  と  $s_j (i \neq j)$  に挟まれた領域、あるいは上の場合と同様に単一の計測領域に囲まれた領域と表すことができる。

次に対象物  $V$  が球と位相同型でない、例えば  $V$  がトーラス状の形状を持っており、かつ形状データ  $S'$  が単一の領域のみで構成されていた場合を考える。例えば図4(a)のような形状データが与えられていた場合、 $V$  がトーラス形状を持つか持たないかで b, c の二通りの欠損領域を考えることができる。この判断を与えられた  $S'$  の形状のみから下すことは難しい。そこで今回は  $V$  は球と位相同型の形状を持つと仮定する物とする。

#### 3-2 ボクセル空間における欠損領域

三次元ユークリッド空間  $\mathbf{R}^3$  において物体表面を構成する Jordan 曲面と同様に、三次元離散空間  $\mathbf{Z}^3$  でも離散空間中の物体  $Vd$  の内部・外部を分離する曲面、離散 Jordan 曲面 [9] が定義できる。従って3-1で定義した式(1)-(5)と同様に物体表面  $Sd$ 、計測領域  $Sd'$ 、欠損領域  $Wd$ 、計測領域の境界  $\partial Sd$  を定義することができる。この定義の場合  $Sd$  は厚さを、 $\partial Sd$  は幅を持たない図形となるが、本研究では簡便化のため  $Sd$  は  $Vd$  の最外周を構成する厚さ1のボクセル群であり  $Sd \subset Vd$ 、同様に  $\partial Sd$  を  $Sd'$  の最外周を構成するボクセルであり、 $\partial Sd \subset Sd'$  と定義する。

#### 3-3 欠損領域の面表現

ボクセルデータを対象としているため、前述の  $\partial Sd$  は多角形となる。そのため  $Sd'$  が単数領域であった場合、 $Wd$  は各多角形  $\partial Sd_j$  で囲まれた領域の集合であることが解る。領域  $Wd$  は物体表面  $Sd$  の部分集合であるので、互いに面が重なったり分離したりすることはない。本稿ではこの条件を用いて多角形  $\partial Sd_j$  の内部を  $\partial Sd_j$  の各辺を辺とする三角形に分割することにより領域  $w_j$  の近似面  $w'_j$  を生成する。多角形  $\partial Sd_j$  が平面上に存在した場合、これは多角形の三角形分割問題、すなわち多角形の内部に弦を引いて多角形を三角形に分割する問題 [10] としてよく知られた問題である。本稿ではこの問題を  $\mathbf{R}^3$

中の同一平面にない多角形に適応する。分割された各三角平面を  $\partial w_{j,k}$  とすると  $\partial Sd_j$  に囲まれた領域  $wd_j$  は以下のように表される。

$$wd_j = \bigcup_k \partial w_{j,k} \quad (6)$$

また全欠損領域  $Wd$  は式(3)から以下のような。

$$Wd = \bigcup_j \bigcup_k \partial w_{j,k} \quad (7)$$

多角形  $\partial Sd_j$  を交わりや分離なく分割する答えは複数存在する。例えば図5(a)のような多角形の内部に面を張る場合、図5(b),(c)の二種類の答えが存在する。 $Sd'$  及び  $Wd$  は共に計測物体表面の一部であり、b,cどちらが適切な結果であるかは多角形の周囲の計測データにより決定される。計測物体が自然物である場合、その表面は比較的滑らかな曲面で覆われている物が多い。そこで本稿では隣り合う三角形の法線のなす角(図6θ)及び張られる三角形とその三角形と接する  $Sd'$  の法線とのなす角(図6θ)について以下の式を最小とするように面を張る。

$$\Theta = \sum \theta_a + \sum \theta_b \quad (8)$$

一般にこの処理は多項式時間で実行することは出来ないが、動的計画法を使用する事により、その処理を多項式時間で終了させることができる。三角形近似については文献[8]に詳しく述べているので、そちらを参照されたい。

#### 3-4 計測に適さない三角平面

以上で述べた手法により、欠損領域  $Wd$  は三角平面の集合  $\bigcup \partial w_{j,k}$  として与えることができ、各  $\partial w_{j,k}$  を順に、最終的に欠損領域が存在しなくなるまで計測を行う。しかし  $\partial w_{j,k}$  は以下の理由から計測できない領域(計測不可領域)である可能性がある。

(1)反射率が低くレーザ光を反射しない。

(2)実際の物体平面から大きく離れている。

ある三角平面  $\partial w_{j,k}$  が計測不可領域であるかどうかを、既に得られている形状データのみから推測することは難しい。しかしこの三角平面が前計測までのある視点から計測した際のカメラとレーザの視野の中に存在した場合、この三角面上には物体表面は計測できないことが判る。第  $m$  回目の計測のカメラとレーザの視野領域のうち、障害物、つまり既に計測されている形状データで遮られることなく観測できた領域をそれぞれ  $Camera_m$ ,  $Laser_m$  とすると(図7),  $R^3$  中で物体表面が存在しないことが判っている領域  $NoData$  は以下の式で表される。

$$NoData = \bigcup_m Camera_m \cap Laser_m \quad (9)$$

従って注視候補領域となる三角平面  $\partial w$  は以下のように表される。

$$\partial w = \{ \partial w_{j,k} \mid \partial w_{j,k} \cap NoData = \emptyset \} \quad (10)$$

計算機中で  $Camera_m$  は次のように記述する。  $m$  回目の計測におけるカメラの視点位置を  $Cp_m$  とするときカメラから観測される領域は、  $Cp_m$  とその撮像面とで作られる四角錐と相似な高さが∞の图形となる。この四角錐の中に計測されたボクセルが存在した場合、図8に示すように四角錐を4分割し、奥行きバッファリングを行う。この時  $Camera_m$  は障害物を含まない小四角錐  $Camera'_m$  の集合として階層的に表される。 $Laser_m$  についても同様に行うことにより、  $NoData$  は以下のように表される。

$$NoData = \bigcup_m \{ (\bigcup Camera'_m) \cap (\bigcup Laser'_m) \} \quad (11)$$

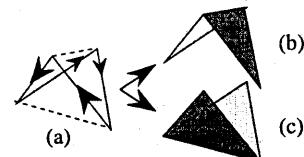


図5. 2種類の三角形分割

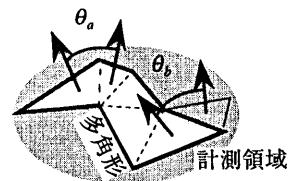


図6. 分割面の法線間のなす角

$\theta_a$ : 分割面同士のなす角  
 $\theta_b$ : 分割面と隣接計測面のなす角

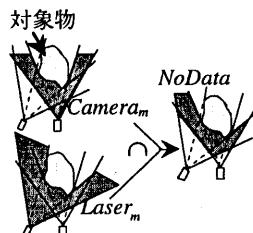


図7.  $Camera_m$  と  $Laser_m$

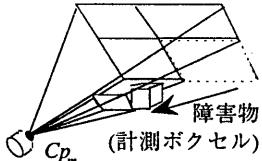


図8.視野の奥行きバッファリング

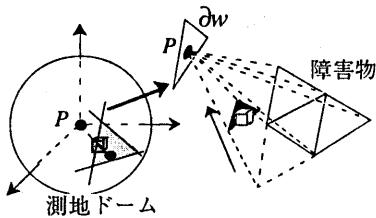
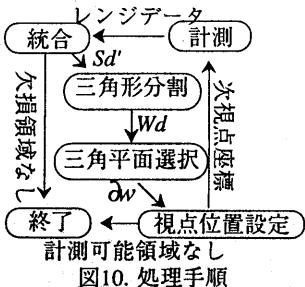


図9.測地ドームの奥行きバッファリング



#### 4 視点の決定

本章では、前章で述べた手法で得られた注視候補領域  $\partial w$  に対し、レンジファインダの視点位置を決定する手法を述べる。ある視点位置から  $\partial w$  上の点  $P$  を観測したとき、実際に計測が成功する条件として、本稿では次の三項目を考慮する。

- (1)  $P$  とカメラ及びレーザの間に障害物がない。
- (2)  $P$  がカメラ及びレーザの視野に入っている。
- (3) マニピュレータが移動可能である。

レンジファインダを  $\mathbb{R}^3$  中に配置したときのカメラとレーザの視点位置を  $C_p, L_p$ 、 $\partial w$  上の点  $P$  を障害物に遮られずに観測できる  $\mathbb{R}^3$  中の領域を  $View\_P$  とすると、条件(1)から  $L_p, C_p$  は以下の式を満たす。

$$\begin{aligned} C_p &\subset View\_P \\ L_p &\subset View\_P \end{aligned} \quad (12)$$

本稿では  $View\_P$  を表現するのに点  $P$ を中心として一定の厚みを持つ中空球を配置する。レンジファインダの計測距離は、二章で述べた通り 150mm から 300mm の範囲である。そこで視点位置の候補領域  $K$  は以下の式の中空球領域に限定できる。

$$150 \leq \|K - P\| \leq 300 \quad (13)$$

$\|\cdot\|$  は 2 点間のユークリッド距離を表す。

次に中空球中で障害物に遮られずに注目点を観測できる領域を得るために、点  $P$ を中心とする測地ドームを設置する。測地ドームに点  $P$ を中心とする正20面体を配置すると、三次元空間  $\mathbb{R}^3$  は  $P$  を頂点として高さが  $\infty$  の20個の三角錐の集合と表される。

この三角錐の中に計測されたボクセルが存在した場合、図9に示すように三角錐を4分割し、奥行きバッファリングを行う。この時視点候補領域  $M$  は障害物を含まない小三角錐の集合として階層的に表現される。 $View\_P$  はこの三角錐の集合領域と式(13)で表される中空球との積領域となる(式14)。

$$View\_P = K \cap M \quad (14)$$

オクルージョン回避の安定性を考えると、視点はオクルージョンが起きる領域からできるだけ遠い方が望ましい。何故ならオクルージョン領域の近傍では、微少な視点の移動で点  $P$  を観測できなくなるからである。本手法では  $View\_P$  を構成する各三角錐には障害物が存在しない。従ってより大きな三角錐から計測すれば、オクルージョン回避しやすい。そこで  $View\_P$  を構成する三角錐群のうち上層にある物を順に選択し、同じ層に複数の三角錐があった場合、点  $P$  を含む注視候補領域の法線方向に近い三角錐を優先的に選択する。選択された三角錐の重心位置に条件(3)と式(13)を考慮して、カメラの光軸が  $P$  を向くように  $C_p$  を配置する。次にカメラの光軸を中心に回転させ、式(12) (13) 及び条件(2)を満たすように  $L_p$  を配置する。

#### 5 実験及び結果

本手法の処理の流れを図10に示す。まずボクセル空間で統合されたレンジデータから欠損領域を三角平面群で推定する。欠損領域が存在しなければ終了する。次に推定された平面群から計測に適した三角平面のみを選択する。選択された三角平面一つ一つについて、測地ドームを設定し、四章の三つの条件に基づき視点位置を決定する。全三角平面がこれら三つの条件を満たさなかった場合、これ以上計測は不可能であるとして終了する。計測可能な場合、視点移動後再計測し、最初に戻る。

この手法を確かめるため、計算機内に文献5のシステムを構築しシミュレーション実験を行った。図11(a)に示す対象物を図11(b)のように配置する。図12(a)はこれを図12(b)の視方向から計測し統合した結果である。この結果を初期形状データとして視方向決定を開始する。図13(a)は欠損領域を三角

平面で推定した結果、図13(b)は注視候補領域として選択された三角平面を、図13(c)は生成された測地ドームを示す。図14は8回の計測の後に最終的に得られた計測結果である。

## 6まとめ

本稿ではマニピュレータに搭載された小型レンジファインダを用いて視点移動を伴う形状計測を行うための、視点位置の決定手法を報告した。

## 参考文献

- [1] Y. Sato, H. Kitagawa and H. Fujita: "Shape measurement of curved objects using multiple slit-ray projections," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. 4, No. 6, November 1982.
- [2] Y. Suenaga and Y. Watanabe: "A synchronized cylindrical data scanner and its application to 3D face data acquisition," IAPR-MVA'90, Tokyo, November 1990.
- [3] M. Rioux, F. Blais, J. A. Berardin and P. Boulanger: "Range Imaging Sensors Development at NRC Laboratories," Proc. IEEE Workshop on Interpretation of 3D Scenes, pp154-160 (1989).
- [4] Y. Sakaguchi, H. Kato, K. Sato and S. Inokuchi: "Acquisition of Entire Surface Data Based on Function of Range Data," IEICE Trans., Vol.E 74, No.10, pp.3417-3422 (1991).
- [5] Y. Sato and M. Otsuki: "Three-Dimensional Shape Reconstruction by Active Rangefinder," Proc. Computer Vision and Pattern Recognition '93, pp142-147 (1993).
- [6] C. I. Connolly, "The Detection of Next Best Views," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat. 1985, pp.432-435.
- [7] J. Maver and R. Bajcsy, "Occlusions as a Guide for Planning the Next View," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. 15, No. 5, pp.417-433 (1993).
- [8] 大槻正樹, 佐藤幸男, "DPを用いた平面当てはめによる欠損ボクセルデータの補間," 信学技法 PRU95-130, pp55-60 (1995-9).
- [9] 劍持雪子, 井宮淳, 市川薰: "離散Jordan曲面," 情処研報 Vol. 93, No. 87, pp1-8 (1993).
- [10] 浅野哲夫: "計算幾何学," 朝倉書店 (1990).

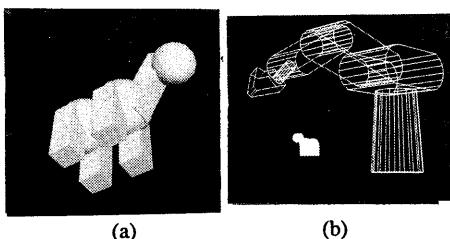


図11. 計測対象物

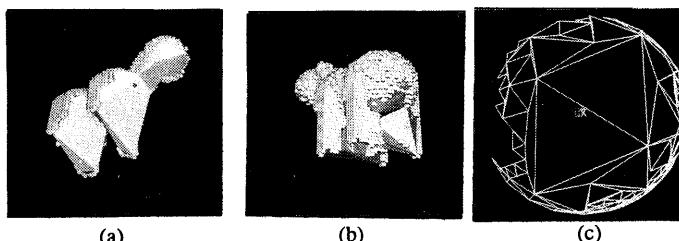


図13. 処理経過

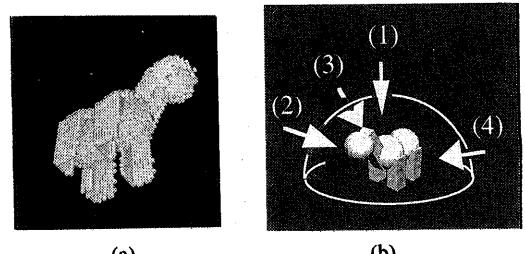


図12. 初期計測結果

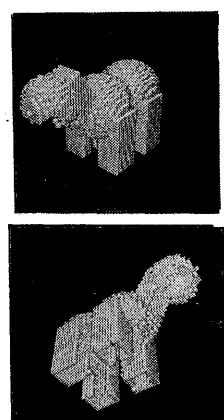


図14. 計測結果