

距離画像のジャンプエッジを使った レンジファインダの視方向決定

大槻正樹 佐藤幸男

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

e-mail: ohtsuki@hilbert.elcom.nitech.ac.jp

sato@hilbert.elcom.nitech.ac.jp

あらし 本稿では、形状データの境界を基にレンジファインダの視点移動を行う手法について述べている。境界とは物体表面の形状データの得られた面と得られていない面との境のことである。この境界を注目して形状計測することで、その境界に隣接する未計測の表面の形状データを計測している。そしてそれまでの形状データと統合し、統合された形状データの持つ境界に対して次の視方向を決定している。全表面を計測して計測を終了する条件として形状データ中に境界が存在しなくなることを用いている。境界の表す形状は計測された物体表面形状であると同時に未計測の表面の境界近傍の近似形状を表していると仮定し、できるだけ多くの境界をその法線方向から一度に計測できるように視方向を決定している。この形状データの境界は距離画像からジャンプエッジを抽出することで得ている。実際に視点移動のできるレンジファインダを用いて形状計測実験を行いその計測結果を示すと共に、視点決定に要する計算時間が短いことを示している。

キーワード 視点選択, 距離画像, ジャンプエッジ, レンジファインダ

Viewpoint Selection Using Jump Edges in Range Image

Masaki Otsuki Yukio SATO

Dept. Electrical and Computer Engineering

Nagoya Institute of Technology

Gokiso, Showa-ku Nagoya-shi 466, JAPAN

e-mail: ohtsuki@hilbert.elcom.nitech.ac.jp

sato@hilbert.elcom.nitech.ac.jp

Abstract In this paper, a viewpoint selection method for rangefinder is described. The viewpoint is determined using borderlines of range data. The borderlines mean the boundaries between the measured and unmeasured surfaces. Gazing these borderlines and measuring the 3-D shape, a rangefinder obtains the range data of unmeasured surfaces that is near to the borderlines. The measurement is continued until no borderlines are exist. The shape of these borderlines represents the shape of unmeasured surfaces that are near to the borderlines. In this method, the viewpoint is determined to measure the unmeasured surfaces using the shape of borderlines. These borderlines are detected as jump edges in range image. A result of viewpoint selection and measured range data using active rangefinder is shown. It indicates that the calculation time is short.

key words Range image, Viewpoint selection, Jump edge, Rangefinder

1. はじめに

仮想空間構築のために形状データを入力するとき、三次元モデラなどを用い、人の手によって形状を入力することが多い。しかし詳細なデータを正確に入力しようとすると、それは非常に手間のかかる作業である。実在する物体の形状データを入力するのであれば、モデラなどを用いるよりも、その形状データを計測し、入力できれば、その手間は大幅に削減できるし、また形状データの信頼性も上がることが期待できる。そのような形状入力装置として、レンジファインダは適した計測機器である。

レンジファインダは画像を用いて形状計測を行う。そのために画像として写らないオクルージョン部分の形状データを取得するために、ターンテーブルのような回転体を併用することが多い[1][2]。計測物が単純な形状をしている場合、これは優れた方法であるが、視点と回転軸との間に2面以上表面が存在する物体では、計測できない表面も存在する。その根本的な解決は、視点の移動を回転運動に限定せず、任意の位置から形状計測を行うことであろう。その場合レンジファインダの視点の位置は人間が決定することも可能だが、より手軽な形状入力を実現するには、計測システムが、まだ計測されていない表面形状を得るために自動的に探索することが望ましい。そして最終的に物体全表面の形状データが得られたことを確認し、計測を自動終了する機能が必要であると思われる。本稿はそのようなレンジファインダの視点移動手法について述べる。そして実際に図1(a)に示すレンジファインダ Cubicscope[3]を用い、計測実験を行う。このレンジファインダはレーザスリット光を照射するレーザスキャナとシーンを撮像するCCDカメラから構成されており、時系列空間コード化法に基づいて形状計測を行う。このレンジファインダは図1(b)に示すように5軸のロボットマニピュレータに装着してあり、任意の視点から形状計測を行うことが可能である。

2. 視方向決定アルゴリズムの概要

レンジファインダにより計測される距離画像は、その物体のカメラから観測できる表面のみの形状を表す(図2(a))。それを物体表面と比較してみると、距離画像が表す表面形状は計測物体の表面の部分集合となる。そしてまだ残されている物体表面(未計測表面と呼ぶ)を計測できる位置にレンジファインダを移動して計測することにより、新たな表面を計測することができる。これまでに知られている手法では、この未計測表面の形状を推定することを最初の手続きとし、推定された面に対して視点を決定することが多い[4]-[10]。これらの手法は推定のエラーに伴う不適切な視点を決定してしまう危険性ははらんでおり、また

手法によっては推定を行うために対象物の形状に制限を設ける必要がある[6][10]。そのかわり推定された未計測表面の形状を有効に用いて、例えばより少ない回数での計測を実現することも可能である[6]。しかし近年では高速に形状計測の行えるレンジファインダが開発されてきている[3][11][12]。そのようなレンジファインダを用いることができる場合、計測回数を減らすよりもむしろ視方向を短時間で決定してより多くの計測を行った方が利点が多い。本手法では未計測表面の形状の推定を行わないことで、短時間でレンジファインダの視方向を決定する手法を提案する。

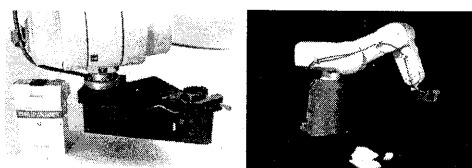


図1 レンジファインダCubicscope

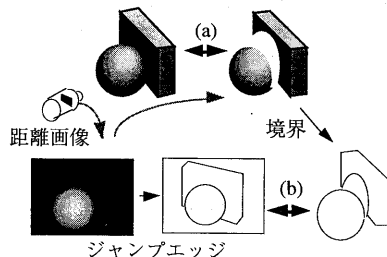


図2 物体表面と表面形状データ

本手法では形状データの境界(図2)を基に視点移動を行う。境界は計測データと未計測表面との境界である。この境界の表す形状は計測された物体表面形状であると同時に、未計測表面の境界近傍の近似形状を表していると言える。なぜならこの境界において両面が接しているからである。そこで境界の形状から境界近傍の形状を計測できるように視方向を決定して計測すれば、未計測表面の形状データを新たに得ることができる。そして新たな形状データとそれまでに計測されている形状データとを統合し、統合された形状データの持つ境界を計測できるように、その次の視点を決定する。物体表面全てが計測されたかどうかは、境界の有無から知ることができる。未計測表面が存在しない場合、形状データとの境界は存在しなくなる。最終的に境界が存在しなくなるまで計測を繰り返す

計測対象物の物体表面を S 、 S をある視点から最初に計測した形状データを $s^{(1)}$ 、その境界を $l^{(1)}$ とする(図3)。更に境界 $l^{(1)}$ を観測するように視点を移動して2度目の計測した形状データを $s^{(2)}$ 、その境界を $l^{(2)}$ とする。この2回

の計測で得られた形状データを三次元空間中で統合した結果を $S^{(2)}$ と書くとする、 $S^{(2)}$ は $s^{(1)}$ と $s^{(2)}$ の和となる。ただし $s^{(1)}=s^{(1)}$ とする。また和集合 $S^{(2)}$ の持つ境界を $L^{(2)}$ とする。ただし $L^{(1)}=l^{(1)}$ とする。境界 $L^{(1)}$ の一部は、2度目の計測結果 $s^{(2)}$ 上に存在する。境界 $L^{(1)}$ から計測データ $s^{(2)}$ 上に存在する部分を除去する手続きを $Delete_edge(s^{(2)}, L^{(1)})$ と書くとする、 $L^{(2)}$ は以下の式で得ることができる。

$$L^{(2)} = Delete_edge(S^{(1)}, l^{(2)}) \cup Delete_edge(s^{(2)}, L^{(1)}) \quad (1).$$

こうして更新された境界 $L^{(2)}$ を観測するように次の視点を決める。形状データ中の境界は、図2(b)に示すように、距離画像中のジャンプエッジと対応する。そこで距離画像に対してフィルタリング処理を施し、ジャンプエッジを予め抽出しておく。

以上の処理をアルゴリズム化すると次のようになる。

```

M_Time=1; /*M_Time : 計測回数*/
do{
  /*Step 1: 形状計測*/
  s(M_Time) = Measurement();
  /*Step 2: 形状データの統合と境界の設定*/
  l(M_Time) = Edge_Detection(s(M_Time));
  if(M_Time==1){
    L(1) = l(1);
    S(1) = s(1);
  }else{
    S(M_Time) = S(M_Time-1) ∪ s(M_Time);
    L(M_Time) = Delete_edge(S(M_Time-1), l(M_Time)) ∪
      Delete_edge(s(M_Time), L(M_Time-1));
  }
  /*Step 3: 全ての境界がなくなれば計測終了*/
  if(L(M_Time) == ∅) exit(0);
  /*Step 4: レンジファインダの視点の決定*/
  Viewpoint_Determination(L(M_Time));
  M_Time++;
  /*Step 5: レンジファインダの視点の移動*/
  Manipulation();
}while(TRUE);

```

Step2: $Edge_Detection(s^{(M_Time)})$ は距離画像からジャンプエッジを抽出する手続きである。またStep 3は計測を終了するための終了条件である。物体表面 S は一般的に境界が存在しない閉曲面である。それに対し計測された形状データは、未計測表面との間に境界が存在する。本手法では境界上の点を注目するように視点移動することで、その付近の形状計測を行い、最終的に境界が存在しなくなるまで計測を繰り返す。次章では、その視点を境界 $L^{(M_Time)}$ から決定する手法(Step 4)を述べる。

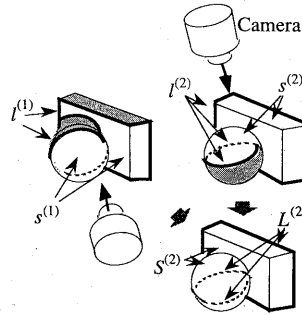


図3 計測による境界の更新

3. 視点・視方向決定手法

3-1 境界に対する最適な視方向の決定

境界 $L^{(M_Time)}$ 上の一点 P を計測するように視点を決定することを考える。本手法では点 P を計測する視点の位置を、点 P を持つ境界の計測データ側と未計測表面側の両方の形状データが、一枚の距離画像で計測できるように決定する。なぜなら本来境界はノイズなどの影響を受けやすい部分であるため、その境界を別々の距離画像で計測すると、境界における形状データの連続性を保証できない。しかし境界の両側を一枚の距離画像で得ることにより、連続性の保たれた形状データを出力することができる。そのような視点を決定するため、本稿では、基本的に境界をその法線方向から計測する。境界において形状データと未計測表面が C^2 連続となっている場合境界の両側で法線の変化が少ない。そのため境界近傍の形状データから法線を計算し、その法線方向から観測することで、境界の両側を均等に観測することが期待できる。しかし境界において C^1 連続となっている場合その両側で法線が大きく変化するため、境界近傍の形状データから計算される法線方向からでは、未計測表面が計測できないことがあり得る。例えば立方体の辺で発生する境界がこれにあたる。そこでこの境界を次の3種類に分類する(図4)。

- A) Limb edge
- B) Occluding edge
- C) Projected edge

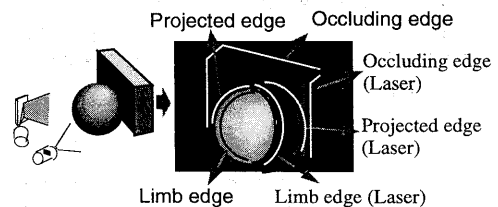


図4 境界の種類

Limb edgeは表面形状が滑らかに変化してカメラから見えなくなるために発生する境界、Occluding edgeは形状が急激に変化して見えなくなるために発生する境界である。またProjected edgeはジャンプエッジの奥側であり、手前にある障害物で隠されたために発生する境界である。その他にレーザ光源によって発生するこれらと同様の境界が存在する。それは、レンジファインダをカメラの光軸について180°回転させて計測するか、あるいはカメラの両側に光源を配置することで、その影響を除去できる。従って本章では光源による境界は考慮に入れないこととする。以下では各境界についてその視方向を決定する。

A) Limb edge

Limb edgeでは表面形状が境界で C^2 連続となっていると予想される。そこで境界近傍の形状データから法線ベクトルを計算する。境界上の点 P の法線ベクトルを N_P と書くとき、次の視方向 V_P を以下のように決定する。

$$V_P = N_P \quad (2)$$

B) Occluding edge

この境界では表面形状が境界上で C^1 連続となっていると予想される。そのため境界近傍の形状データから計算される法線方向からでは、未計測表面が計測できないことがあり得る。そこで点 P を通り点 P を計測した視方向ベクトル V_C と平行な平面 S_{VC} を定義する(図5)。そしてその平面の法線方向を次の視方向 V_P と定める。このベクトルは、エッジの方向ベクトルを E_L とすると、以下のように求められる。

$$V_P = \pm N[V_C \times E_L] \quad (3)$$

\times は外積を、 $N[\]$ はベクトルの正規化を表し、その向きは対象物の外を向くように決定する。その次にこの視方向 V_P から点 P を計測を行う。すると点 P 近傍に新たな形状データが計測される。この計測される形状データ S_N は図6の三つの状態が考えられる。

・状態(i)

点 P を含む境界両側の形状が一枚の距離画像で得られているため、その境界を消去することができる。

・状態(ii)

状態(ii)の場合境界の両側の形状が得られている。そこで更にその次の視方向 V_P' を以下のように決定することにより、境界両側の形状を一枚の距離画像で計測することができる。

$$V_P' = N[N_M + N_N] \quad (4)$$

N_M は計測により得られた形状データ S_M のエッジ近傍における法線ベクトル、 N_N は計測データ側の境界近傍の法線ベクトルである。

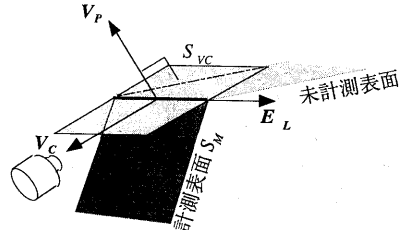


図5 Occluding edgeの視方向の定義

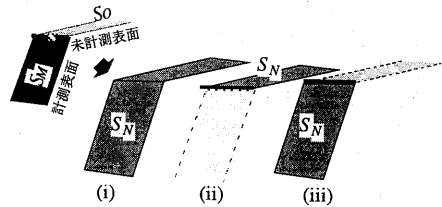


図6 Occluding edgeの計測結果の三つの状態

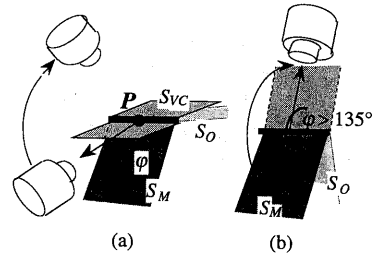


図7 Occluding edgeの視方向の更新

・状態(iii)

状態(iii)の場合、未計測表面 S_O はまだ計測されていない。この表面を計測するには、視方向ベクトルと平行で境界で接する平面 S_{VC} と計測された表面 S_M とのなす角(図7(a)角 ϕ)が大きくなるように、視点を移動すべきである。先の計測の視方向ベクトル V_C と平行で境界で接する平面 S_{VC} と計測表面 S_M とのなす角を ϕ_C 、新たな計測の視方向ベクトル V_D と平行で境界で接する平面 S_{VD} と S_M とのなす角を ϕ_D としたとき、この境界をこの次に計測するための視方向 V_P' を以下のように決定する。

$$V_P' = \begin{cases} N_{VC}, & \phi_C \geq \phi_D \\ N_{VD}, & \phi_C < \phi_D \end{cases} \quad (5)$$

N_{VC} 、 N_{VD} はそれぞれ S_{VC} 、 S_{VD} の法線ベクトルである。

C) Projected edge

この境界は形状の変化によって発生する境界ではない。従ってLimb edgeと同様に、境界近傍の形状データから計算される法線方向から計測することにより、そのエッジを消去できることが期待できる。但しこの場合境界の近傍に障害となる物体表面が存在することが

解っている。もし法線ベクトル N_p 方向から観測してオクルージョンが発生させないのであれば、Limb edgeと同様その方向から計測することが望ましい。しかし、そうでないならば、次の視方向は、できるだけ障害物から離れた方向を選択すべきである。そこでProjected edgeに対する視方向ベクトルは、経験的に以下のように決定する(図8)。

$$V_p = \begin{cases} N_p, & \text{if } N_p \text{ does not cross to} \\ (V_1 + H)/2, & \text{any object surface,} \\ & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6).$$

ここで H は、 N_p と V_1 とで張られる平面と点 P における接平面との交線ベクトルである。

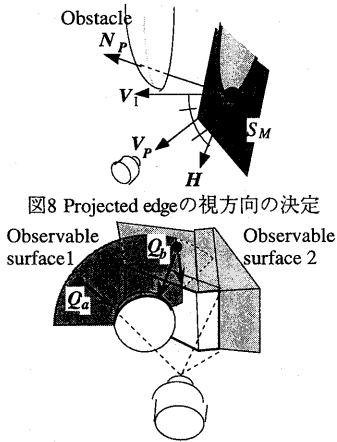


図8 Projected edgeの視方向の決定

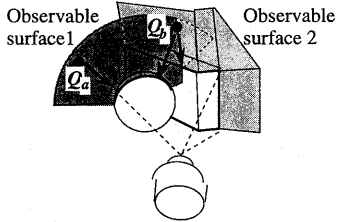


図9 Observable surface

3-2 視点・視方向の決定

前節で説明した視方向から一つ一つの境界を確実に計測していけば、最終的にすべての境界が消去され物体全表面が計測できる。しかしそれでは計測回数が多くなることが予想される。そこでレンジファインダの視点を、境界上の一点を注視しながらできるだけ多くの境界が計測することが期待できる位置に配置する。

距離画像からジャンプエッジを抽出し、前節で説明した視方向を各境界毎に決定する。するとその境界を通り決定された視方向を方向ベクトルとする直線の集合は、境界を通る曲面となる(図9)。この曲面をObservable surfaceと呼ぶことにする。このObservable surfaceは、その面上の点 Q_a から対象物を観測すると、その点を最適な視方向ベクトル上を持つ境界上の点を計測できることを意味する。この曲面は各境界に対して最適な視方向を表す直線の集合であるから、この直線が密集している位置に視点を配置すると、より多くの境界を最適な視方向から観測できる。例えば2枚の曲面が交差する点は、その密度が高い(図9 Q_b)。本手法

ではレンジファインダの視点を、Observable surface上の境界を通る直線が最も密集する位置に配置する。視方向はその視点を通る直線を持つ境界に向ける。

しかし実際の計測においては、このObservable surface上に視点がなければ境界を計測できないわけではない。そこで境界上の点 P に対して、前節で決定された視方向 V_p を中心軸として半径 ψ の円錐状の領域から計測することを許すとすると(図10)、三次元空間中の点 Q から点 P を観測できるかどうかは、以下の式で表すことができる。

$$\phi(P, Q) = \begin{cases} 1, & \text{if } \cos^{-1}\{(V_p \cdot N(Q-P))\} < \psi, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7).$$

但し、オクルージョンが発生していないとする。今点 Q から P をオクルージョンをおこすことなく観測できるかどうかを表す関数を以下のように表す。

$$\kappa(P, Q) = \begin{cases} 1, & \text{if } P \text{ is not occluded from } Q, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8).$$

すると式(7),(8)より、点 Q から対象物を見たとき、観測できる境界の長さは以下ようになる。

$$\Phi(Q) = \int \kappa(P, Q) \phi(P, Q) dP \quad (9).$$

この値を最大とする点から対象物を計測すると、最も多くの境界を一度に観測でき、計測の効率の向上を図ることができる。しかしユークリッド空間全体に対して式(9)を計算することは計算コストの増大を招くおそれがある。そこで本手法では、視点 Q を測地ドーム上に限定する。この測地ドームは対象物を中心とする正20面体の正三角形を細分することで生成し、レンジファインダの視点は、細分された正三角形の重心に置くことにする。床によるマニピュレータの移動の制限を考慮して、北半球のみを用いる。このドーム上の正三角形の重心を Q_j ($j = 1, \dots, m$)としたとき、以下の式を満たす点 Q_v に視点を決定する。

$$Q_v = \{Q_j \mid \max_{j=1, \dots, m} \{\Phi(Q_j)\}\} \quad (10).$$

今境界が微小線分 l_i ($i = 1, \dots, n$)で構成されていると仮定し、その線分の長さを $|l_i|$ と表す。この線分上の点を $P_i(t)$ ($0 < t < |l_i|$)とし、 $|l_i|$ が測地ドームの三角形の辺に対して十分短いとすると、点 Q_j で観測できる l_i の長さは以下のように表される。

$$\Phi_i(Q_j) = \begin{cases} \int_0^{|l_i|} \kappa(P_i(t), Q_j) \phi(P_i(t), Q_j) dt \\ = \begin{cases} |l_i| & \text{if } \phi(P_i(|l_i|/2), Q_j) = 1 \text{ and} \\ & \kappa(P_i(|l_i|/2), Q_j) = 1, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \quad (11).$$

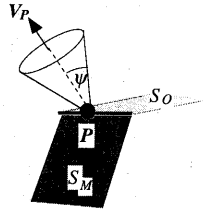


図10 視方向の候補の範囲

そして Q_j から観測できる全境界は次のように表される。

$$\Phi(Q_j) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(Q_j) \quad (12)$$

この式は、各線分 l_i について、その中点を頂点としてその点における視方向ベクトルを中心とする円錐領域に点 Q_j が入っていて、オクルージョンをおこさずに線分 l_i の中点を観測できる場合、その線分の長さを投票することを表す。そして式(10)が示すように、投票された線分の長さの和が最大となる視点から計測を行う。

最後に点 Q_v から対象物を計測するときの視線ベクトルを決定する。本章では視線ベクトルを、 Q_v から観測可能な最も長い線分を観測するように決定する。すなわち視線ベクトル V_v を以下の式で決定する。

$$V_v = N[P_v - Q_v],$$

$$\text{但し } P_v = \{P_i (|l_i|/2) | \max_{i=1, \dots, n} (\Phi_i(Q_v))\} \quad (13)$$

実際にはカメラの視野の制限のために、式(13)の視方向で計測した場合に最も多くの境界が計測できるとは限らない。しかし本稿の最初でも述べたように、本手法は短時間で視方向を決定することを目的としている。そのためカメラの視野の制限による視方向の優先順位の若干のずれは考慮しないこととする。

4. 終了条件

2章で述べたように、物体表面は一般的に境界が存在しない閉曲面である。そこで本手法では、形状データが境界を含まなくなったとき、物体表面全体が計測できたと判断し、計測を終了する。この終了判定は、2章で示したアルゴリズムのStep 3で行う。しかし境界の中には、どのように視点を選んでも計測できないものが存在する。その原因として以下の場合を想定する。

- (1) セルフオクルージョン
- (2) 2面が鋭角に交わった角で生じた境界
- (3) 反射率の変化に伴って生じた境界

(1)は境界が自分自身に遮られて、適した方向からの計測が望めない状況を表す。(2)は図7(b)のように2枚の面が鋭角に交わっているような場合、その両面を一枚の距離画像で計測することが難しい状況を表す。(3)は計

測表面の反射率が低い(黒い)ために形状データが得られない面と形状データの得られた面との境界を表す。黒い面はどのように視点を選んでも計測できないため、その境界は消去できずに残る(図11)。これらの状況が発生している境界は終了条件の判定には用いないことにする。その判定は以下のように行う。

4-1 セルフオクルージョン

式(11)に示したように、境界上の点からオクルージョンを生じずに観測できる測地ドーム上の三角形に対してのみ投票を行う。このことは即ち、どの三角形にも投票を行うことができなかった境界は、オクルージョンのために観測できないことを表す。そこでそのような境界は観測不可能な境界であると判断する。

4-2 2面が鋭角に交わった角で生じた境界

2面が鋭角に接していた場合、境界をより深い角度で計測するように、つまり図7(b)の ϕ が 180° に近くなるように視点移動しなければ、もう一方の面(図7(b) S_O)を観測することができない。この時両面を一枚の距離画像で計測することは難しくなるため、境界を消去することが難しくなる。そこで本手法では、 $\phi > 135^\circ$ となる視点から計測しても S_O の形状データが得られない場合、この境界は計測不可能な境界であると判断する。

4-3 反射率の変化に伴って生じた境界

この状況は前節の状況と非常に似通った特徴を示す。どのように視点を選んでも反射率の低い面は計測できず、常に境界の反射率の高い側のみ計測されるからである。そのために前節と同様に、図11の $\phi > 135^\circ$ となる視点から計測しても S_O の形状データが得られない場合、この境界は計測不可能な境界であると判断する。

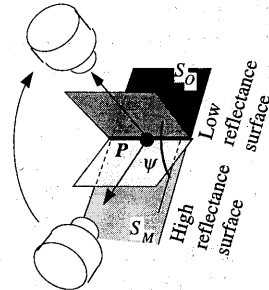


図11 反射率による境界の場合

5. 実験結果

以上のアルゴリズムを用いて実際に計測実験を行った結果を示す。図12は計測対象物とその計測シーンを示している。図12に示すレンジファインダの位置から実際に形状計測を行った結果が図13(a)、それからジャンプエッジを抽出した結果が図13(b)である。このジャンプエッジを抽出した後、Pragerの手法[13]を用いて折

線近似した後、距離画像のノイズの影響を受けた線分を除去して表示してある。それを三次元表示した図が図13(c)である。図13(c)の線分は抽出された境界を示す。

抽出された境界に対して3章で述べた手法でその視方向ベクトルを求めた結果が図14(a), それを基に測地ドームを生成した結果が図14(b)である。ドームの三角形の色は、黒いほど投票が多いことを示す。そして最も投票の多かった位置に実際に視点を移動した結果が図14(c)である。図14(d)に示すように、マニピュレータの姿勢は計算機内でシミュレートされており、もし投票の多かった位置にマニピュレータの姿勢の制限から視点を移動できなかった場合、その次に投票の多かった位置に移動するように設計した。

図14(c),(d)の示す視点から計測を行った結果が図15である。この次の計測は図15中の境界を基に決定される。

最終的に図16(a)に示す11の視方向から計測を行った後、計測を自動終了した。球はその視点を、球から伸びる直線はその視線方向を示す。そして計測された結果が図16(b)である。計測終了時の測地ドームの状態は図16(c)のようであった。測地ドームのマニピュレータと反対部分に、投票された三角形が残っているのは、ここがマニピュレータの移動範囲外にあるためである。計測結果図16(b)の車の進行方向右側で形状データが得られていないのはこのためである。これは移動範囲の広いマニピュレータを用いることで、解決することができる。表1に視方向の決定に要した計算時間を示す。境界を抽出し、計測されている境界を消去する時間(2章のアルゴリズムのStep2)と、それを基に視方向を決定するのにかかる時間(同Step4)とに分けて表示してある。両方で10~20秒の計算時間となっている。計算機にはSGI Indy R5000SC 150MHzを用いた。

6. まとめ

本稿ではレンジファインダを用いて能動的に視点移動をしながら形状計測を行うための視点移動アルゴリズムを提案した。本手法は未計測の表面の形状の推定を行わないことによって、短時間で視点を決定する。

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. Mach. Intell., PAMI-4, 6, pp. 641-646 (1982).
- [2] Y. Suenaga and Y. Watanabe, "A method for the synchronized acquisition of cylindrical range and color data," Trans. IEICE, E74, 10, pp.3407-3415 (1991).
- [3] Y. Sato and M. Otsuki, "Three-Dimensional shape reconstruction by active rangefinder," Proc. CVPR '93, pp.142-147 (1993).

- [4] P. Whaite and F. P. Ferrie, "From uncertainty to visual exploration," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., PAMI-13, 10, pp.1038-1049 (1991).
- [5] P. Whaite and F. P. Ferrie, "Active exploration: Knowing when we're wrong," Proc. ICCV '93 pp.41-48 (1993).
- [6] J. Maver and R. Bajcsy, "Occlusions as a guide for planning the next view," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., PAMI-15, 5, pp.417-433 (1993).
- [7] A. Hoover, D. Goldgof and K. W. Bowyer, "Extracting a valid boundary representation from a segmented range image," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., PAMI-17, 9, pp.920-924 (1995).
- [8] Y. Sakaguchi, H. Kato, K. Sato and S. Inokuchi, "Acquisition of entire data based on function of range data," IEICE Trans., E74, 10, pp.3417-3422 (1991).
- [9] C. I. Connolly, "The determination of next best views," Proc. ICRA '85, pp.422-435 (1985).
- [10] 大槻正樹, 佐藤幸男, "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方法," 情報処理CV97-6, pp.39-44 (1995).
- [11] K. Araki, Y. Sato and S. Partharathy, "High Speed Rangefinder," Proc. SPIE, 850, pp.184-188 (1987).
- [12] 横山敦, 佐藤宏介, 芦ヶ原隆之, 井口征士, "無修正型フォトVLSIセンサを用いた実時間距離画像計測," 信学論D-II, J79-D-II, 9, pp.1492-1500 (1996).
- [13] U. E. Pramer, "An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves," Computer Graphics and Image Processing, Vol.1, pp.244-256 (1972).

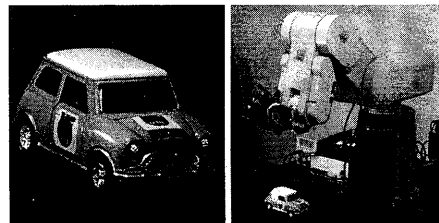


図12 計測対象物

Image No	Edge elimination (sec.)	Viewpoint selection (sec.)	Image No	Edge elimination (sec.)	Viewpoint selection (sec.)
1	-	2.9	7	4.9	11.2
2	3.4	7.2	8	5.8	11.3
3	3.8	10.8	9	5.5	12.8
4	5.3	10.5	10	5.9	14.3
5	3.7	10.4	11	4.9	-
6	4.5	9.3			

表1 視方向決定に要した時間

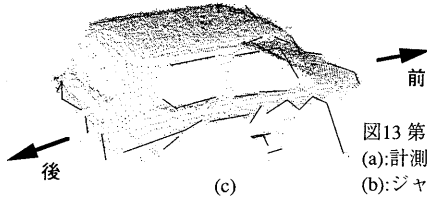
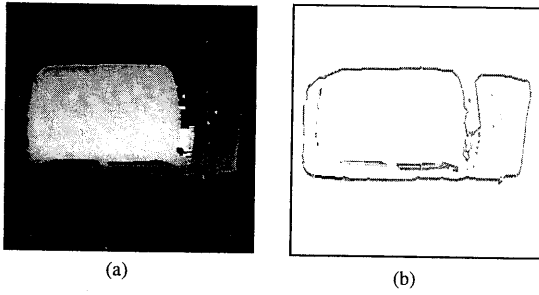


図13 第一回目の計測結果
 (a):計測距離画像
 (b):ジャンプエッジ抽出結果
 (c):(a)の三次元表示結果

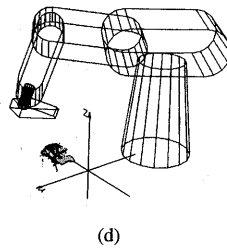
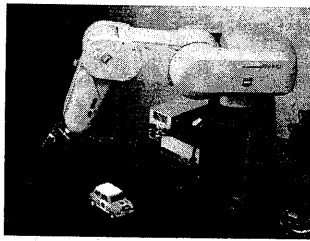
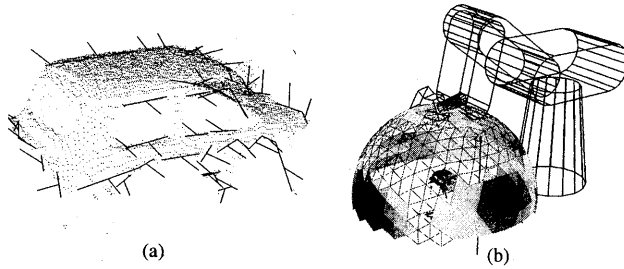


図14 図13に対する視点決定結果

- (a): 図13(c)の境界に対するの視方向決定結果
- (b): 測地ドーム生成結果
- (c): (b)による視点移動結果
- (d): 計算機シミュレーション

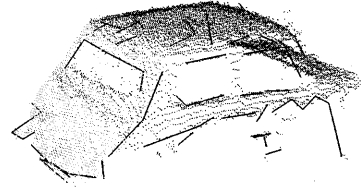


図15 第二回目の計測結果

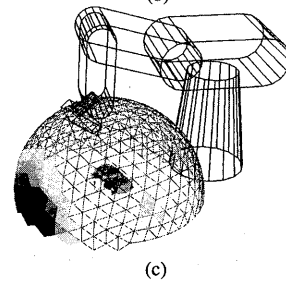
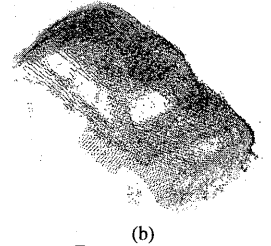
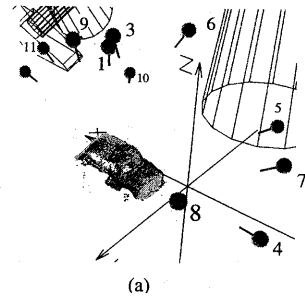


図16 計測結果

- (a): 決定された11の視点及び視方向
- (b): 計測結果
- (c): 計測終了時におけるドームの状態