

視体積交差法を用いた線状構造物の三次元認識

吉田 孝弘^{†1} 嵯峨 智^{†1}
岡谷 貴之^{†1} 出口 光一郎^{†1}

配線作業の自動化にとっては、例えば、つり下げられた配線ケーブルの束（ワイヤーハーネス）の空間的な構造と配置を把握する必要がある。ねじれたり、絡まり合ったりしているケーブルの3次元構造画像を認識するには、ステレオ視のように対応付け問題を扱う必要がなく、画像上での特徴が貧弱である配線ケーブルのような線状構造物であっても、その3次元形状を計測することができる視体積交差法が有利である。ここでは、配線作業をするロボットハンドの先端に取り付けたカメラが対象の周りを周回した多視点からの画像を元にした、線状構造物の視体積交差法による3次元形状について考える。このとき、カメラをどのように周回してどの視点で画像を得ることが、対象の3次元形状を正確にとらえることができるのかが重要である。本研究では、線状構造物の特性に配慮して、統計的な手法による視体積交差法による3次元形状復元の誤差を評価する手法を提案する。すなわち、まず、線状構造物に対しては、その線構造の空間方向の分布から、視体積交差法による3次元形状復元の誤差を見積もることができることを示し、続いて、多視点の画像から、その線構造の空間方向分布を推定する手法を示す。

On the Volumetric Reconstruction of Linear Objects from Multiple Visual Scenes

TAKAHIRO YOSHIDA,^{†1} SATOSHI SAGA,^{†1}
TAKAYUKI OKATANI^{†1} and KOICHIRO DEGUCHI^{†1}

For the automatic wiring installation, it is important to recognise the structure of a spatially pended wire-harness. To reconstruct 3-D structure from multiple images taken at several view points, the so-called the volumetric reconstruction from 2d silhouettes in the visual scenes. We mount a camera at the top of hand of the robot who handles the wire-harness, and take a number of images from several view points. Then, it is also important where to move the camera to good view points to obtain precise reconstruction. We, here, propose the sequence of the methods, that is, firstly, the evaluation of the reconstruction error of a linear object from its spatial distribution of the directions of

linear segments. And, secondly, the estimation of the spatial distribution of the directions from the multiple images.

1. はじめに

本研究では、例えば、自動車の生産ラインにおいても未だに人間の手作業で行われている工程である、配線ケーブル等の線状構造物の組み付け作業の自動化のために、吊下げられたワイヤーケーブルの束（ワイヤーハーネス）の3次元構造を画像認識することを目的としている。配線ケーブル自体は、図1に示すように、複数の分岐やコネクタからなる複雑な形状をし、柔軟性を持つ。ケーブルの配線作業の自動化を妨げる要因は、配線ケーブルの構造が複雑であることに加え、大きな変形をする柔軟物であるということである。製造工程を自動化するため、対象をロボットで実際にハンドリングしていくには、そのハンドリング中でのワイヤーの受け渡しなどのため、配線ケーブルの空中での3次元形状の認識が必要である。

このとき、ロボットが把持する部分のみがわかるだけでは不十分である。全体の状態がわからなければ、ケーブルがねじれたり、絡まり合ったり、周囲の作業員や物に引っかかる等のことが起こり得る。ケーブルが無理な姿勢になり破損・断線するということも考えられる。

本研究では、図2に示すように、ワイヤーハーネスをハンドリングするロボットアームの先端に取り付けたカメラで、ワイヤーハーネスの3次元構造も画像認識することを想定している。カメラ自体が動き、画像上で交差している部分を様々な角度から撮影することによって、配線ケーブルの現実空間における位置関係を判断することができると考えられる。カメラは吊るされたワイヤーの周囲を半ば自由に周回できるので、いわゆる「視体積交差法」^{1),2)}によって3次元構造を復元する。すると、ここで重要なことは、線状構造物の3次元形状を効果的に認識するためのカメラの移動方向を決定することと、そのためには、あるいくつかの方向から撮影した画像からの視体積交差法による復元誤差を見積もることである。

本論文では、線状構造物を対象にした、この視体積交差法による3次元形状復元の誤差の評価法を提案する。以下に、まず、(1)線状構造物に対しては、その線構造の空間方向の分布から、視体積交差法による3次元形状復元の誤差を見積もることができることを示す。続いて、(2)多視点の画像から、上記の線状構造物の空間方向分布を推定する手法を示す。

^{†1} 東北大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University



図 1 配線ケーブル

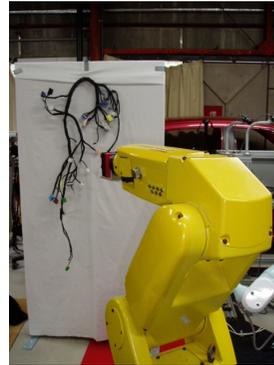


図 2 吊るされた配線ケーブルと能動カメラ

視体積交差法による 3 次元形状復元の誤差や、この誤差を最小化する視点の選択についての考察は、いくつか発表されている³⁾⁻⁶⁾。しかし、本論文で提示しているような統計的なアプローチと、その具体的な定式化、そしてその有効性の検証を行った試みは、未だ無い。

2. 線状構造物に対する視体積交差法とその誤差評価

本章では、線状構造物の視体積交差法による 3 次元形状復元の誤差が、線状構造の方向の分布によって決まることを示す。次章で、この方向の分布を画像から推定する手法を示す。

2.1 線状構造物の視体積交差法

視体積は、「ある視点から撮影して得られる物体の二次元シルエットを実空間に投影して得られる錐体」、すなわち、図 3 に示すように、対象物とカメラ、それにカメラで取り込まれた画像があるとき、図 4 に示すようなカメラの光学中心を頂点とした錐体のことである。

図 5 に示すような、複数の視点に対応する視体積の共通部分は visual hull と呼ばれ、その内部に対象物が存在する。この visual hull は、より多くの視体積を対象物に用いた場合、対象物の概形を表しているものとみなすことができる。視体積交差法では対象のシルエットを用いるためステレオ視のように対応付け問題を扱う必要がなく、画像上での特徴が貧弱である配線ケーブルのような線状構造物であっても、その 3 次元形状を計測することができる。

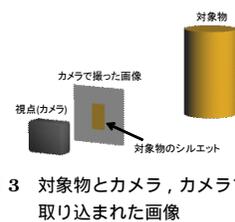


図 3 対象物とカメラ、カメラで取り込まれた画像

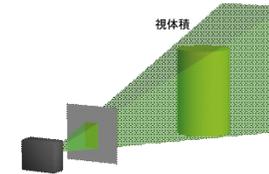


図 4 対象物の視体積

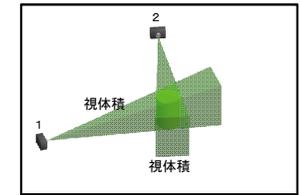


図 5 複数の視点からの視体積の交差 (visual-hull)

2.2 線状構造物の復元誤差

まず、本論文では以下の 2 つの仮定をする。

(1) 対象とする線状構造物は、断面が半径が一定の円であるものとする（太さが一定の円環状をなす）。その半径を、 r とする。

(2) 画像は正射影によって得られるものとする。

そして、この線状の構造物は、図 6 に示す、ごく短い長さ ΔL の円筒切片の集まりで構成されているものとし、その円筒切片の方向を表す球面座標 (θ, ϕ) に対して、分布 $\Phi(\theta, \phi)$ を持つものとする。すなわち、 $\Phi(\theta, \phi) \sin \phi$ は、線状構造物の全長のうち、方向が (θ, ϕ) の単位立体角に含まれる部分の長さの総和を表し、その全長は、

$$L = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \phi d\phi [\Delta L \cdot \Phi(\theta, \phi)] \quad (1)$$

となる。

もちろん、分布 $\Phi(\theta, \phi)$ は、事前には分からない。異なる視点からの何枚かの画像から分布 $\Phi(\theta, \phi)$ を推定する手法については、次章にて提案する。本章では、まず、分布 $\Phi(\theta, \phi)$ が与えられたときに、上記の仮定のもとに、視体積交差法で線状構造物の 3 次元復元誤差が見積もれることを示す。

ここで、球面座標系は、図 7 に示すように、基準となるカメラの画像面が $\theta = 0$ 平面と平行で、光軸が $(\theta = \pi/2, \phi = 0)$ 方向を向くようにとる。

このとき、この基準となる画像面上には、 (θ, ϕ) の方向を持つ、長さ ΔL の円筒切片は、図 8 に示すように投影される。ここで図中の各長さや角度は、

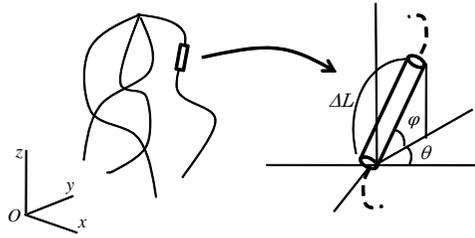


図6 線状構造物を構成する円筒切片

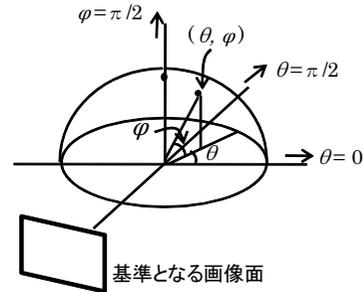


図7 円筒切片の分布を表現する球面座標系

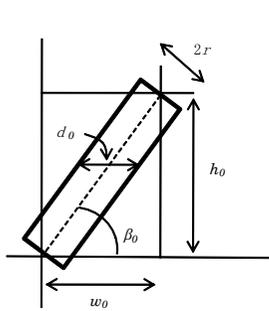


図8 基準となる画像面上への
(θ, φ) 方向の円筒切片の投影

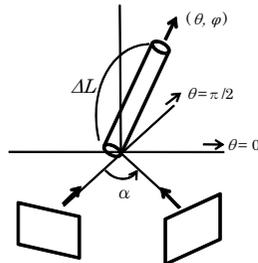


図9 カメラの視点を基準位置から
φ = 0 面内で、反時計回りに
角度 α だけ回転した位置に移
動して画像を得て、この2枚の
画像により視体積交差を行う

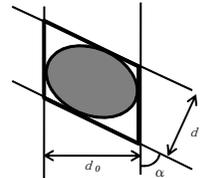


図10 (θ, φ) 方向の円筒切片の基準
画像と角度 だけ回転した位
置からの画像とによる視体積
交差部の水平断面

$$h_0 = \Delta L \sin \phi \quad (2)$$

$$w_0 = \Delta L \cos \phi \cos \theta \quad (3)$$

$$d_0 = 2\sqrt{\frac{\cos^2 \theta}{\tan^2 \phi} + 1} \cdot r \quad (4)$$

$$\tan \beta_0 = \frac{\tan \phi}{\cos \theta} \quad (5)$$

である。

さて、今、カメラの視点を、図9に示すように、基準位置から φ = 0 面内で、反時計回

りに角度 α だけ回転した位置に移動して画像を得て、この2枚の画像により視体積交差を行ったとする。角度 α だけ回転した視点位置による画像上での、(θ, φ) 方向の円筒切片の(2), (4)に相当する長さを、それぞれ、 h_α, d_α とすると、

$$h_\alpha = h_0 \quad (6)$$

$$d_\alpha = 2\sqrt{\frac{\cos^2(\theta - \alpha)}{\tan^2 \phi} + 1} \cdot r \quad (7)$$

である。

このときの交差部分の水平断面を、図10に示す。この交差部の断面積を $S(\theta, \phi; \alpha)$ とすると、

$$\begin{aligned} S(\theta, \phi; \alpha) &= d_0 d_\alpha \frac{1}{\sin \alpha} \\ &= 4r^2 \cdot \frac{\sqrt{(\cos^2 \theta + \tan^2 \phi)(\cos^2(\theta - \alpha) + \tan^2 \phi)}}{\tan \phi} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \end{aligned} \quad (8)$$

であるので、この円筒切片に対して視体積交差によって作り出される体積 $V(\theta, \phi; \alpha)$ は、

$$\begin{aligned} V(\theta, \phi; \alpha) &= S(\theta, \phi; \alpha) \cdot h_0 \\ &= 4r^2 \cdot \Delta L \cdot \frac{\cos \phi \sqrt{(\cos^2 \theta + \tan^2 \phi)(\cos^2(\theta - \alpha) + \tan^2 \phi)}}{\sin \alpha} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。この円筒切片の体積は、

$$V_c = \pi r^2 \cdot \Delta L \quad (10)$$

であるので、その復元誤差 $e_V(\theta, \phi; \alpha)$ は、

$$e_V(\theta, \phi; \alpha) = V(\theta, \phi; \alpha) - V_c \quad (11)$$

で与えられる。したがって、この線状構造物の全体での視体積交差による体積の復元誤差は、

$$E_V(\alpha) = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \phi d\phi [e_V(\theta, \phi; \alpha) \cdot \Phi(\theta, \phi)] \quad (12)$$

で与えられることになる。

3. 線状構造物の空間方向分布の画像からの推定

前章で、線状構造物の切片の空間方向分布から、視体積交差による3次元形状復元におけ

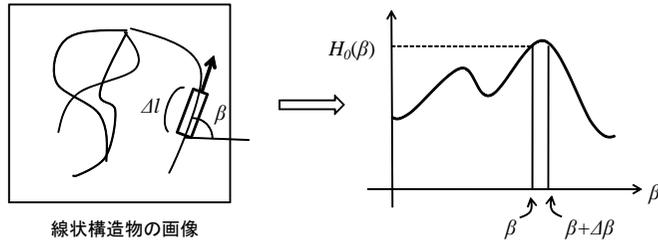


図 11 画像上での方向 β の切片のヒストグラム

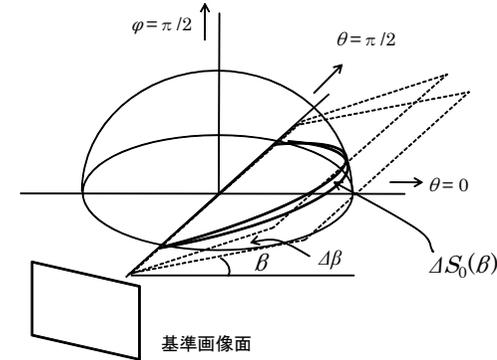


図 12 画像上での方向ヒストグラムの $\beta \sim \beta + \Delta\beta$ に読み取られる切片の空間の方向の入る球面座標上の領域 $S_0(\beta)$

る体積復元誤差が導けることを示した．本章では，この線形構造物の多視点からの画像から，この空間方向分布を推定する手法を述べる．

3.1 線状構造物の画像上での方向ヒストグラム

空間中の方向 (θ, ϕ) を持つ長さ ΔL の円筒切片の基準画像上への投影の，図 11 に示すように画像上での方向を $\beta(\theta, \phi)$ ，長さを $\Delta l(\theta, \phi)$ とすると，同図と (5) より，

$$\tan \beta(\theta, \phi) = \frac{\tan \phi}{\cos \theta} \quad (13)$$

$$\Delta l(\theta, \phi) = \Delta L \sqrt{\cos^2 \phi \cos^2 \theta + \sin^2 \phi} \quad (14)$$

また，図 10 に示したように，角度 α だけ回転した視点から得た画像上での，この切片の方向 β_α ，長さを Δl_α とすると，

$$\tan \beta_\alpha(\theta, \phi) = \frac{\tan \phi}{\cos(\theta - \alpha)} \quad (15)$$

$$\Delta l_\alpha(\theta, \phi) = \Delta L \sqrt{\cos^2 \phi \cos^2(\theta - \alpha) + \sin^2 \phi} \quad (16)$$

となる．

そこで，図 11 に示すように，画像上での方向 β について，その方向を持つ切片のヒストグラムを，画像より読み取る．基準画像上での切片の方向 β についてのヒストグラムを $H_0(\beta)$ ，角度 α だけ回転した視点から得た画像上での切片の方向 β についてのヒストグラムを $H_\alpha(\beta)$ とする．

すると，この画像上での方向ヒストグラムの $\beta \sim \beta + \Delta\beta$ に読み取られる切片の空間の方向は，図 12 に示す球面座標上の領域 $\Delta S_0(\beta)$ 入るものである．

したがって，図 11 に示したヒストグラムについて，次式が成り立つ．

$$H(\beta)\Delta\beta = \int_{\Delta S_0(\beta)} \Delta l(\theta, \phi) \cdot \Phi(\theta, \phi) dS \quad (17)$$

ただし， S は，単位球面上の面積を表す．

いま，図 13 に示すように，基準画像上で傾きが β となる平面上に載る，空間方向が (θ, ϕ) である円筒切片について考える．この 3 つの方向角度 β, θ, ϕ の間には，図より次の関係があることが分かる．

$$\tan \phi = \tan \beta \cos \theta \quad (18)$$

したがって， θ を固定したときに，基準画像上での平面の方向 β を微小角度 $\Delta\beta$ だけ変化させると， ϕ の変化 $\Delta\phi$ は，次のように与えられる．

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{\cos \theta \cos^2 \phi}{\cos^2 \beta} \cdot \Delta\beta \\ &= \frac{\cos \theta}{\cos^2 \beta (1 + \tan^2 \beta \cos^2 \theta)} \cdot \Delta\beta \end{aligned} \quad (19)$$

ゆえに，

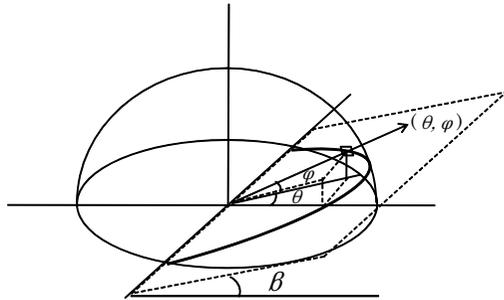


図 13 基準画像上で傾きが β となる平面上に載る，空間方向が (θ, ϕ) である円筒切片

$$\phi_0 = \tan^{-1}(\tan \beta \cos \theta) \quad (20)$$

とおいて，(17) は次のように与えられる．

$$H(\beta)\Delta\beta = \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{\phi_0}^{\phi_0+\Delta\phi} \sin \phi d\phi [\Delta l(\theta, \phi) \cdot \Phi(\theta, \phi)] \quad (21)$$

3.2 画像上の方向ヒストグラムからの空間方向分布の推定

前節で，基準画像上での線状構造物の切片の方向ヒストグラム $H(\beta)$ と空間の円筒切片の方向分布 $\Phi(\theta, \phi)$ との関係をも (21) で与えた．視点の位置を，図 9 に示したように，角度 α だけ回転させて得た画像上での，同様の方向ヒストグラムを， $H_\alpha(\beta)$ とすると， $w(\theta, \phi) = \sin \phi \cdot \Delta l(\theta, \phi)$ と置くことで，

$$H_\alpha(\beta)\Delta\beta = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{\phi_0}^{\phi_0+\Delta\phi} [w(\theta, \phi) \cdot \Phi(\theta - \alpha, \phi)] d\phi d\theta \quad (22)$$

である．

多数の視点 $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_M$ から得たそれぞれの画像上での方向ヒストグラムを，それぞれ $H_{\alpha_0}, H_{\alpha_1}, \dots, H_{\alpha_M}$ とするとき，それらのヒストグラムから， $\Phi(\theta, \phi)$ を再構成することを考える．

原理的には， $\alpha = \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_M$ について，(22) を並べた連立積分方程式を解くことに

よって， $\Phi(\theta, \phi)$ を得ることができるが，その解析解を求めることは，現時点では困難である．そこで，ここでは，離散的・数値的に $\Phi(\theta, \phi)$ を求めることにする．

以下，詳細な式記述は極端に複雑になるので，式を簡略化して解放のあらましのみを述べる．

まず， $\Phi(\theta, \phi)$ を， $\Delta\theta, \Delta\phi$ の間隔で離散化したものを， $\Phi_{ij} = \Phi(\Delta\theta i, \Delta\phi j)$ とおく．ここで，さらに， $\{\Phi_{ij}\}$ を， i, j について辞書オーダーに縦 1 列に並べたベクトルを Φ とする．すると，(22) における $\Phi(\theta - \alpha, \phi)$ は， Φ の θ に当たる成分を順次 $\theta - \alpha$ に (2π を法として) 置き換えたものである．したがって， $\Phi(\theta - \alpha, \phi)$ に対応するベクトル Φ_α は，適切な置換行列 P_α を用いて，

$$\Phi_\alpha = P_\alpha \Phi \quad (23)$$

と表せる．さらに， Φ と同様にして $w(\theta, \phi)$ を離散化した値を並べたベクトルを w とし，また，この w を転置して縦に並べた行列を W とする．すなわち，

$$W = \begin{bmatrix} w^T \\ w^T \\ \vdots \\ w^T \end{bmatrix} \quad (24)$$

そして，(22) 積分は， β と， (θ, ϕ) の組，すなわち， i, j に応じて，適切な成分のみを取り出して足し合わせることにあたる．今， $H_\alpha(\beta)$ も離散化し，ベクトル H_α と表せば，この適切な成分のみを取り出して足し合わせる操作は，やはり，適切な行列 I_α を左から掛けることにあたるので，したがって，(22) は，離散化した式として，

$$H_\alpha = I_\alpha \cdot W \cdot \Phi_\alpha \quad (25)$$

多数の視点 $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_M$ から得たそれぞれの画像上での方向ヒストグラムを離散化したベクトルを，それぞれ， $H_{\alpha_0}, H_{\alpha_1}, \dots, H_{\alpha_M}$ とすれば，以上を総合して，

$$\begin{bmatrix} H_{\alpha_0} \\ H_{\alpha_1} \\ \vdots \\ H_{\alpha_M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\alpha_0} \\ I_{\alpha_1} \\ \vdots \\ I_{\alpha_M} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W \\ W \\ \vdots \\ W \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{\alpha_0} \\ P_{\alpha_1} \\ \vdots \\ P_{\alpha_M} \end{bmatrix} \cdot \Phi \quad (26)$$

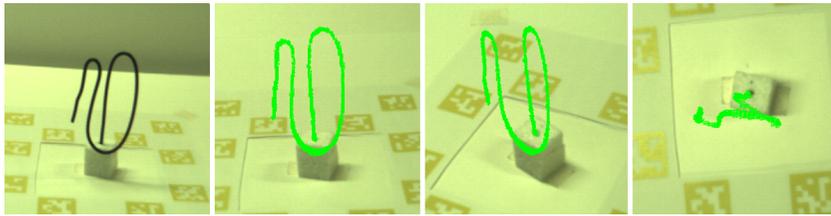


図 14 対象 (左) と視体積交差法によって復元された対象 (右 3 枚)

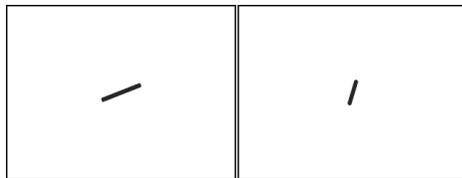


図 15 基準画像として用いた画像 . 左 : $(\theta, \phi) = (2\pi/18, 2\pi/18)$, 右 : $(\theta, \phi) = (8\pi/18, 3\pi/18)$

と書き直すことができる .

この線型方程式 (26) を , 必要であれば , 十分多数の視点から得た $H(\beta)$ によって , 例えば , 最小 2 乗法によって解くことで , 空間分布 $\Phi(\theta, \phi)$ を得る .

4. 実 験

線状構造物に視体積交差法を用いた結果を図 14 に示す .

空間に向き θ, ϕ が既知である棒がある場合の式 (22) を考える . β, θ, ϕ の分布はそれぞれ $\pi/18$ 間隔とする . 式 (22) の左辺を基準画像から求め , 右辺を数値積分し , 比較する . 基準画像から求めることのできる分布は , 対象が棒であるので , ある角度に全ての分布が入り , その他の部分では分布は 0 である . 右辺は分布のある β に対応する部分を数値積分することのできる . $(\theta, \phi) = (2\pi/18, 2\pi/18), (8\pi/18, 3\pi/18)$ の 2 つの棒について比較した結果を表 1 に示す . また , 基準画像として用いた画像を図 15 に示す .

5. おわりに

本論文では , 配線ケーブルのような特徴が貧弱な線上構造物の 3 次元形状の復元に視体積交差法を用いた . また , 線状構造物に対する視体積交差法による 3 次元形状の復元誤差を見

表 1 画像から得られる分布と数値積分によって得られる分布

(θ, ϕ)	基準画像から求めた分布	数値積分による分布
$(2\pi/18, 2\pi/18)$	0.987	0.947
$(8\pi/18, 3\pi/18)$	0.598	0.522

積もることができることを示した . さらに , 多視点の画像から , 線状構造物の空間方向分布を推定する方法を示し , 簡単な例を用いて , その妥当性を検証した . 基準画像から得られた分布と数値積分によって求めた分布に違いがあるが , それは , 画像上で分布を求めるさいの量子化誤差などによるものと考えられる .

今後は , 実際のワイヤーハーネスを用いてその空間分布の推定を目指していきたい .

参 考 文 献

- 1) J.E. Banta, L.R. Wong, CDumont, and M.A. Abidi. A next-best-view system for autonomous 3d object reconstruction. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, Vol.30, pp. 589–598, 2000.
- 2) GregoryG. Slabaugh, W.Bruce Culbertson, Thomas Malzbender, MarkR. Stevens, and RonaldW. Schafer. Methods for volumetric reconstruction of visual scenes. *International Journal of Computer Vision*, Vol.57, pp. 179–199, 2004.
- 3) ALaurentini. How far 3d shapes can be understood from 2d silhouettes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.17, pp. 188–195, 1995.
- 4) W. Niem and M. Steinmetz, Camera Viewpoint Control for the Automatic Reconstruction of 3D Objects, Proc. ICPR1996 (1996)
- 5) ウ小軍, ほか, 平面透視投影を用いた並列視体積交差法, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.SIG6(CVIM2), pp.33-43 (2000)
- 6) 西山学, 松山隆司, 3次元形状モデルを用いたカメラワークプランニング, 情報処理学会 CVIM 研究会報告, 133-7, pp.49-56 (2002)