

対象の一部分の距離画像からの一般化円筒表現の生成

奥村 政彦 本谷 秀堅 出口 光一郎

東京大学工学部

本研究では対象の距離画像が一枚与えられた際に、その物体形状を一般化円筒モデルの一つ SHGC 表現で記述する手法について述べる。対象物の形状が SHGC 表現で記述可能であると仮定すると、物体表面上の放物的曲線を抽出することで、SHGC の断面曲線、あるいは子午線が抜き出せる。この断面曲線を元にして対象物体の軸を定め、さらに断面曲線の形状や掃引曲線の形などを決定することが出来る。

同じ対象物に対して狭い領域に対する距離画像が得られた際にも、そこから同様に SHGC 表現による記述がされ、その結果から部分形状が同対象物のどの部位にあたるかを推定することが出来る。

Generation of the generalized cylinder representation of the object from its part of range image

Masahiko Okumura, Hidekata Honntani and Koichiro Deguchi

Faculty of Engineering, University of Tokyo,
Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

In this paper, we describe a method to construct SHGC representation for object shape given its range image taken from only one direction. If the object is described as SHGC, its cross section curve or meridian can be extracted by detecting the parabolic curve on the object surface. We can determine the axis of the SHGC from the cross section curve, and the shape parameter along the axis such as the shape of the cross section curve and the sweeping rule curve.

This method can be also applicable for object identification when only a range image of the narrow part of object is given.

1 はじめに

コンピュータビジョンの分野において3次元物体認識の研究は重要なテーマの1つである。これまでも入力画像の対象物に対して、何らかの形状モデルを仮定することで、3次元の物体形状を復元する研究[1, 2]も多数行なわれてきた。しかし、エッジ情報をもとに対象物体の軸を決定するなどの手法では、常に画像内にエッジが見えているとは限らないため、対象の一部分しか見えていない場合には軸が定められないといった問題点も含んでいた。

本研究の目的は1方向からの距離画像が与えられた際に、

- i) 対象物が一般化円筒モデルの1つ、Straight Homogeneous Generalized Cylinder(SHGC)表現で記述可能であると仮定することで物体の軸を定め、断面曲線の形状や掃引曲線の形を決定する
- ii) 同じ対象物に対して、狭い範囲の距離画像のみが与えられている時、その部分形状が対象物のどの部位にあたるのかを推定する

の2つである。

これまで、ガウス曲率、平均曲率に基づいた距離画像の領域分割に関する研究[3]や、完全にSHGC表現によって記述出来るような形状全体の距離画像をもとに形状を復元するという研究[4]は行なわれてきた。

本研究の特色は対象物がSHGC表現で記述できると仮定すれば、その表面の放物的曲線を検出することで、エッジ情報などがなくても、軸を定め、軸回りの形状記述が出来るという点にある。

2 Straight Homogeneous Generalized Cylinder

2.1 SHGC の定義

一般化円筒[5]は物体認識のための3次元物体形状モデルとして導入された概念である。本研究ではその中の一つSHGC表現に注目する。そこで、最初にSHGCを数学的に定義する。まず、軸となる直線(y 軸)を定める。そして図1に示すように、その軸に対して、角度 α 傾けたような断面を決め、その断面上で例

えば1つの角度パラメータ θ で表されるような断面曲線と、軸上で t 進んだ場所で断面曲線を何倍の大きさにするかを決定する掃引曲線 $r(t)$ とを与えることで、1つのSHGCが定義される。

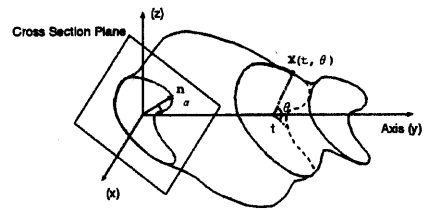
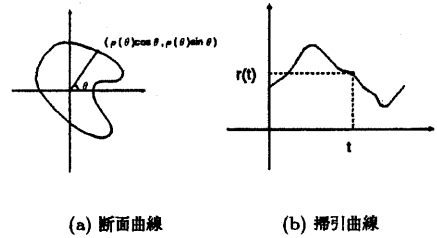


図 1: SHGC の定義

この定義に基づく、SHGC表面上の1点は2つのパラメータ t, θ を用いて次のように表すことが出来る。

$$\mathbf{X}(t, \theta) = \begin{pmatrix} r(t)\rho(\theta)\cos\theta \\ t - r(t)\rho(\theta)\sin\theta\sin\alpha \\ r(t)\rho(\theta)\sin\theta\cos\alpha \end{pmatrix} \quad (1)$$

またこの時、SHGC上で t が一定であるような曲線が断面曲線、 θ が一定であるような曲線が子午線に相当する。

2.2 SHGC の性質

対象物体をSHGC表現で記述するためには、まず軸を定める必要がある。そこで、SHGCの断面曲線、子午線が軸とそれぞれどのような関係をもっているかについて述べる。

性質 1

任意の2本の断面曲線上で、接線の向きが等しい点同士を結んだ直線は必ず軸上の1点で交わる(図2)。

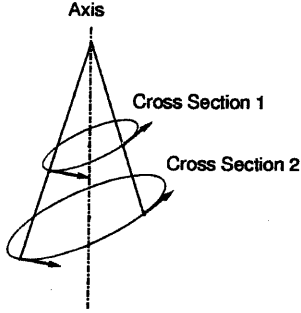


図 2: 断面曲線と軸の関係

性質 2

子午線が乗っている平面は互いに軸で交差する (図 3)。

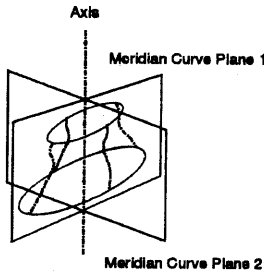


図 3: 子午線と軸の関係

この性質をもとに、距離画像から断面曲線、子午線を抽出することができれば、それを元に軸を復元することが出来る。しかし奥行き情報が並んだだけの距離画像から、特に部分形状しか見えず、エッジ情報などが得られないような状況では、断面曲線や子午線の抽出は難しい問題である。

そこで次章では観測された表面のガウス曲率を導入することで、問題が解決されることを示す。

3 SHGC とガウス曲率

ガウス曲率 [6] は曲面の表面上での最大主曲率 κ_1 と最小主曲率 κ_2 の積であり、部分形状の特徴を定量的に表すものである。ガウス曲率の符号によって表面の部分形状の特徴は図 4 のように分類される。

このガウス曲率が SHGC 表面上でどのようなふるまいをしているかをここに示す。

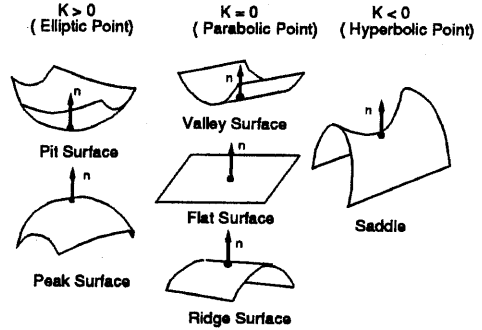


図 4: ガウス曲率の符号と部分形状

SHGC 表現で記述できる物体表面上の 1 点は式 (1) で表されているので、その点におけるガウス曲率 K は t と θ の関数 $\gamma(t, \theta)$ で他の項をまとめてやると、

$$K = \gamma(t, \theta) \times \rho^2(\theta) \times r_{tt}(t) \times (\rho(\theta)\rho_{\theta\theta}(\theta) - 2\rho_{\theta}^2(\theta) - \rho^2(\theta)) \quad (2)$$

のように表される。

さて、断面曲線、掃引曲線の曲率 κ_c , κ_s はそれらが平面曲線であることからそれぞれ

$$\kappa_c = \frac{\rho(\theta)\rho_{\theta\theta}(\theta) - 2\rho_{\theta}^2(\theta) - \rho^2(\theta)}{(\rho_{\theta}^2(\theta) + \rho^2(\theta))^{3/2}} \quad (3)$$

$$\kappa_s = \frac{r_{tt}(t)}{1 + r_t^2(t)^{3/2}} \quad (4)$$

で表される。従って、式 (2) で表される SHGC 上の 1 点におけるガウス曲率は

$$K = \gamma(t, \theta) \times \rho^2(\theta) \times \kappa_s \times \kappa_c \quad (5)$$

のように、その点を通る断面曲線の曲率と掃引曲線の曲率の積を用いて表すことが出来る。

この結果は次の事実を示している。

SHGC 表現で記述される物体表面上においてガウス曲率が 0 であるような点の集合 (放物的曲線) は

- 掃引曲線の曲率が 0 であるような部分に対応した断面曲線
- 断面曲線の曲率が 0 であるような部分に対応した掃引曲線 (子午線)

のどちらかの上に乗る。

そこで、対象表面上のガウス曲率 K が 0 である点を検出することで、対象物体の断面曲線、あるいは掃引曲線を抽出することが出来る。

4 対象物の軸の決定および形状パラメータの決定

4.1 距離画像からガウス曲率の算出

距離画像は画素 (x_w, y_w) における、物体表面上の点のある基準面からの高さ情報 z_{x_w, y_w} を与えるものである。距離画像内の対象物体の表面上の点におけるガウス曲率が正であるのか負であるのかを調べるために、ここでは対象物体に対して各点で 2 次曲面

$$\begin{aligned} z_{x_w, y_w} &= f(x_w, y_w) \\ &= ax_w^2 + bx_w y_w + cy_w^2 + dx_w + ey_w + f(6) \end{aligned}$$

をあてはめる。

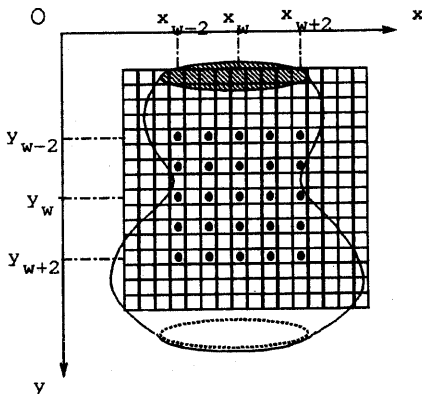


図 5: 対象物体表面の 2 次曲面による当てはめ

図 5 のように、ある画素 (x_w, y_w) の近傍 25 点の値を用いて、二乗誤差が最小になるように、式 (6) で定義した 2 次曲面の係数を求める。

このように当てはめられた 2 次曲面上におけるガウス曲率 $K_{x_w y_w}$ は、

$$\begin{aligned} K_{x_w y_w} &= \frac{f_{x_w x_w} f_{y_w y_w} - f_{x_w y_w}^2}{(1 + f_{x_w}^2 + f_{y_w}^2)^2} \\ &= \frac{4ac - b^2}{\{1 + (2ax_w + by_w + d)^2 + (bx_w + 2cy_w + e)^2\}^2} \end{aligned}$$

で表されるから、その点におけるガウス曲率 K の符合は $4ac - b^2$ の符合 ($K_{x_w=y_w=0}$) と同じになる。

4.2 軸の決定

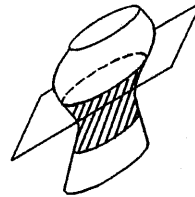
前節で行なったガウス曲率の正負に基づいた領域分割をもとに放物的曲線を抽出し、その曲線がのっている平面を決定する。

その平面は対象物が SHGC 表現で記述されることを仮定すると、必ず断面曲線、あるいは子午線が乗っている平面である。

この平面が断面であった場合に対象物の軸を決定する手法について述べる。

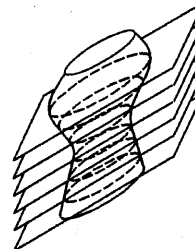
Step 0

下図のようにガウス曲率による領域分割結果から放物的曲線の乗っている平面 (切断面) を決定する。



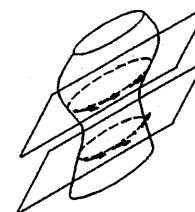
Step 1

まず放物的曲線が乗っている平面と平行なある幅ごとの平面で対象を切断する。その時各平面上に乗っている点集合が断面曲線の集合であると考えて良い。



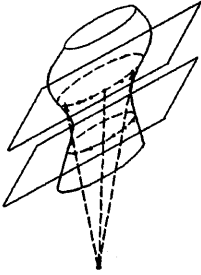
Step 2

次に、各点集合が乗っている平面上で各点における接線方向を求める。



Step 3

断面群の中から任意の2枚の断面を選び、その面上の点で接線方向がほぼ等しい点どうしを結び、その直線どうしの交点を求める。ここで求めた交点は前に述べた SHGC の性質 1 に対応しており、この交点が軸上の点である。



Step 4

各断面の全ての組み合わせから交点を求め、その全ての交点をとおるような直線を二乗誤差が最小になるように当てはめる。これによって対象物の軸を得る。



Step 5

2.2節でも述べた通り、子午線の乗っている平面同士は軸で交差する。そこで、軸を含むような平面 P で対象物を切断する。その時に各断面曲線上の点で、その平面 P に乗っている点と同じ子午線上に乗っている点である。



ここで、もし対象物体形状が SHGC 表現で記述できるのであれば、どの平面で切っても、同じ掃引曲線が導出されるはずである。

5 シミュレーションデータに対する実験

SHGC 表現で記述されるような物体に対する距離画像をつくって、その距離画像に対して実際にガウス曲率の符号にもとづく領域分割を行ない、軸を定め、断面曲線の形状、掃引曲線の形が SHGC を作成するのに用いたものと同じになるかどうかを確かめた。

4.1節に基づいて、領域分割し、その結果をもとに、軸を定め、その軸を元に断面曲線、掃引曲線を導出した結果を図 6~8 に示す。

以下の領域分割画像では黒い領域がガウス曲率が正、白い領域が負の領域を示している。この結果を見ると黒と白の境界である放物的曲線は断面曲線あるいは子午線を示していることが分かる。

また、各図 (d) の掃引曲線の結果グラフで点線の曲線が示しているのはデータを作成する際に用いた掃引曲線である。

● 実験 I (図 6)

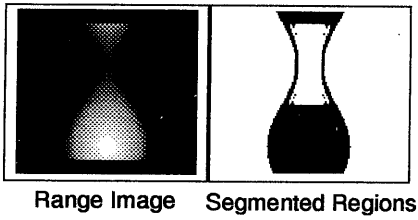
軸と断面曲線が直交するような SHGC を作成した。領域分割の結果から放物的曲線が断面になっていることがわかる。軸もデータを作成する際に用いたものとほぼ重なっており、断面曲線、掃引曲線の相方もデータ作成に用いたものと一致していることがわかる。

● 実験 II (図 7)

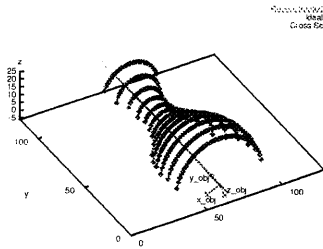
I の場合と異なり、軸と断面曲線が直交していない場合の SHGC を作成した。この対象でも断面曲線、掃引曲線の相方がデータ作成に用いたものと一致しており、本手法が有効であることを示している。

● 実験 III (図 8)

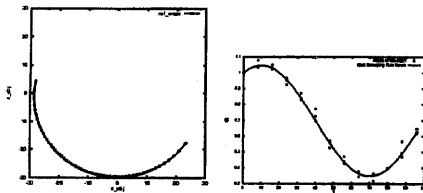
I, II の場合と異なり、軸が対象物の外側を通っている SHGC についてもガウス曲率の符号による領域分割を行ない、軸を定め断面曲線、掃引曲線の形状を導出を行なった。この場合には領域分割結果から断面曲線のみならず、子午線も放物的曲線として表れていることがわかる。これを利用して、子午線ののっている平面どうしの交線から軸を抽出することも可能になる。



(a) 距離画像とそのガウス曲率の符合による領域分割結果



(b) 復元された軸



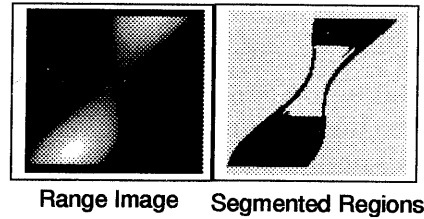
(c) 断面曲線

(d) 掃引曲線

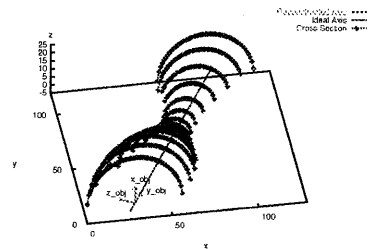
図 6: 実験 I の結果

(断面と軸が直交している SHGC)

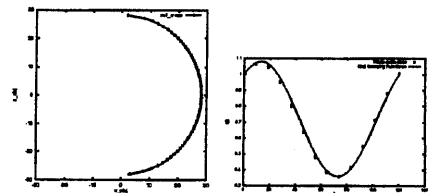
順に距離画像, 領域分割結果, 復元された軸, 導出された断面曲線形状, 掃引曲線の形状を示す



(a) 距離画像とそのガウス曲率の符合による領域分割結果



(b) 復元された軸



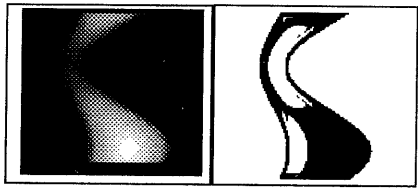
(c) 断面曲線

(d) 掃引曲線

図 7: 実験 II の結果

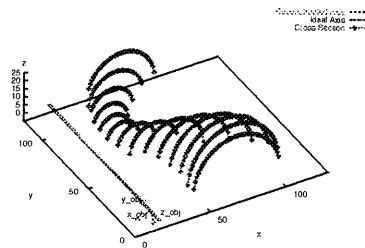
(断面と軸が直交していない SHGC)

順に距離画像, 領域分割結果, 復元された軸, 導出された断面曲線形状, 掃引曲線の形状を示す

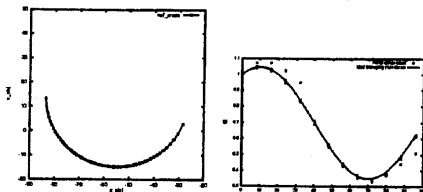


Range Image Segmented Regions

(a) 距離画像とそのガウス曲率の符合による領域分割結果



(b) 復元された軸



(c) 断面曲線

(d) 掃引曲線

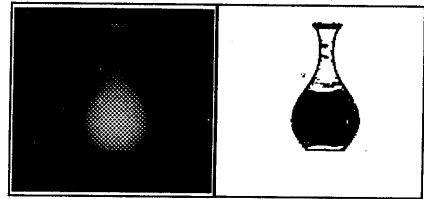
図 8: 実験 III の結果

(軸が対象物の外側を通っているような SHGC) 順に距離画像, 領域分割結果, 復元された軸, 導出された断面曲線形状, 掃引曲線の形状を示す

6 実データに対する実験

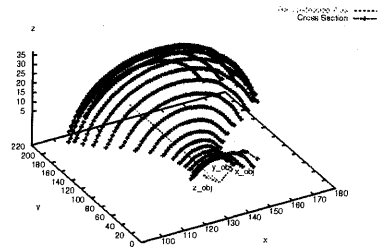
花瓶を Range Finder で実際にとって, 同様に SHGC 表現での記述を試みた. その結果を図 9 に示す. もし花瓶が SHGC 表現で記述できるような物体形状であ

れば, 矛盾なく記述できるはずである. 結果より軸を通るような平面群で切断した際に, その平面に乗っている点の集合はほぼ同一曲線上に集まっている. このことからこの曲線を掃引曲線と考えてよく, またこの花瓶に対して, SHGC を仮定したことに矛盾なく軸まわりでの SHGC 表現による記述が出来たことを示している. この記述をもとに再現した形状が図 10 に示すものである.

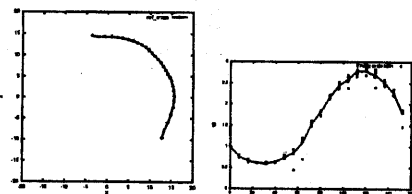


Range Image Segmented Regions

(a) 距離画像とそのガウス曲率の符合による領域分割結果



(b) 復元された軸



(c) 断面曲線

(d) 掃引曲線

図 9: 花瓶を SHGC 表現で記述した結果

距離画像, 領域分割結果, 復元された軸, 導出された断面曲線形状, 掃引曲線の形状

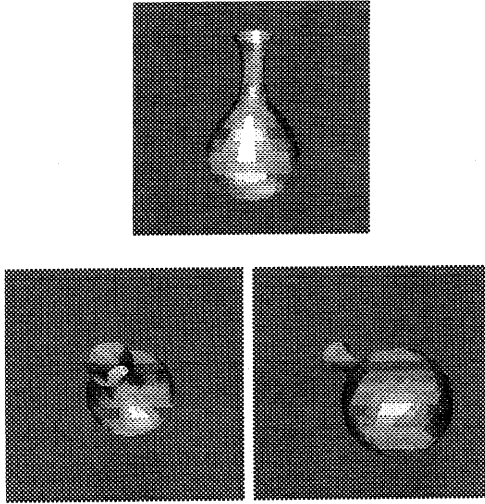


図 10: 復元した花瓶

7 データの得られる領域が狭い場合

実験 I で用いた SHGC の部分的な距離画像 (図 11) が得られているとして、それをもとに前に述べた手法と同様にして軸をさだめ、断面曲線、掃引曲線の形状を求めた (図 12)。その結果、全体が見えている場合と同様に、軸、断面曲線、掃引曲線はデータを作成した際に用いたものとほぼ一致した。この結果より、本手法は得られた距離画像が対象物体のどの部位にあたるかを同定することに応用出来る。

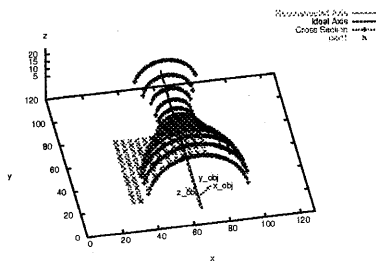


図 11: 狭い範囲での距離画像が得られた時の結果 (復元された軸)

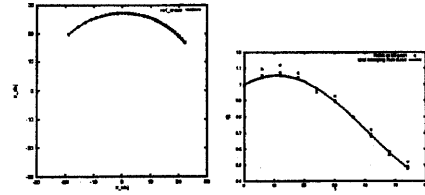


図 12: 狭い範囲での距離画像が得られた時の結果 (断面曲線ならびに掃引曲線)

8 まとめ

本研究では 1 方向からの距離画像をもとに SHGC 表現のあてはめを行ない、形状の記述がほぼ一致することを確認した。さらに部分形状だけからでも軸が定まり、形状の記述をすることが出来た。この結果はオクルージョンなどによって一部分しか見えていないような状況でも放物的曲線さえ検出できれば、形状の記述が出来るという意味で、物体認識の研究へとつながっていくと考えられる。

参考文献

- [1] Faith Ulupinar and Ramakand Nevatia. Shape from contour : Straight homogeneous generalized cylinders and constant cross section generalized cylinders. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17, No. 2, pp. 120-135, 1995.
- [2] Jean Ponce. Straight homogeneous generalized cylinders : Differential geometry and uniqueness results. *International Journal of Computer Vision*, No. 4, pp. 79-100, 1990.
- [3] Paul J. Besl. *Surfaces in Range Image Understanding*. Springer-Verlag, 1988.
- [4] Hillel Rom and Gérard Medioni. Part decomposition and description of 3d shapes. *12th IAPR International Conference Pattern Recognition*, Vol. I, pp. A-629-632, 1994.
- [5] Steven A. Shafer. *Shadows and Silhouettes in Computer Vision*. Kluwer Academic Publishers, 1985.
- [6] Jan J. Koenderink. *Solid Shape*. The MIT Press, 1990.