GA を用いたステレオ画像からの超二次関数の復元*

清水 毅^{*1}, 小 尾 誠^{*1}

The Recovery of the Superquadrics from the Stereo Image Pair Using Genetic Algorithm

Tsuyoshi SHIMIZU^{*2} and Makoto OBI^{*2} Department of Mechanical System Engineering, Yamanashi University,
4-3-11 Takeda, Kofu-shi, Yamanashi, 400-8511 Japan

This paper presents the study of the model recovery of a 3-D object from the stereo image pair. This 3-D object is represented by superquadrics which are parametric and volumetric models. Superquadric parameters are estimated using genetic algorithm to minimize the texture feature of objects on the right and the left image. The estimation function depends on the shared area on both images and the distance of the density of the shared area. The actual models used in the experiment are the cube, the cylinder (small and big) and the elliptic column. In the experiment, the objects are placed randomly on the table in front of camera, and the resulting recovery success is 44 times out of 100 trials. After tuning of genetic algorithm function, the recovery success increased to 82 times out of 100 trials.

Key Words: Stereo Vision, Recovery, 3 D, Genetic Algorithm, Superquadrics

1. は じ め に

二つのカメラなどによるステレオ画像対から物体を復元する研究は、コンピュータビジョンでは、中心的課題の一つである。三次元点の取得と物体の復元は、物体を取得画像から復元する際、普通分けて考えられる。しかしながら、三次元点の計算過程において、対応点問題の発生や雑音に起因する計算誤差が必ずしも無視できない。この場合、再構成過程で復元される物体は、異なる物体となってしまう。

現在まで、物体を記述する方法として、円筒や多面体などにより表現する方法がある。一方で近年、物体を超二次関数で記述する研究^{(1)~(4)}が行われている。超二次関数とは、二次曲面の一種であり、少ないパラメータで様々な形状を表現することが可能である。現在では、コンピュータグラフィックスにも応用されている⁽⁵⁾。また、物体を超二次関数で表現することは、復元後の類似判定処理⁽⁶⁾等でも有効であると考えられる。

堀田ら⁽⁷⁾は、与えられた三次元測定点データから超二次関数をプリミティブとして扱い、物体を復元している。また、Alokら⁽⁸⁾は、距離画像から超二次関数を部品として扱い、物体を復元している。これらの研究に対して、綱島ら⁽⁹⁾は、一枚の濃淡画像から超二次関

数を復元している。この方法は、カメラと計算機からなる測定装置があれば物体を復元できるため、装置が簡略化できる。しかしながら、失われた一次元を満たすため、物体の反射率が既知であることが要求されている。このため、対象物体の性状が未知である場合、超二次関数を復元することは難しい。

一方、ステレオ画像計測は、失われた一次元を画像枚数を増やすことにより満たす方法である。そこで、本稿では、ステレオ画像対から対象物体を超二次関数として復元する手法を検討する。具体的には、超二次関数のパラメータを求める過程にて、右画像に投影される物体の濃淡情報を左画像に投影される物体の濃淡情報と比較し、これらの差が減少するようにパラメータを決定する。パラメータの決定には、遺伝的アルゴリズムを用いる。遺伝的アルゴリズムは、解の探索領域を限定できるため、超二次関数のような指数パラメータの決定問題等には効果的である。以下で本手法について述べる。

2. 測 定 原 理

2.1 ステレオ画像計測の原理 ステレオ画像計測の原理を簡単に述べる。いま、xyz 座標系に物体が在り、右カメラ及び左カメラがそれぞれ距離 D 離れて配置されているものとする。また、座標系は右カメラ

* 原稿受付 2002 年 6 月 10 日。

^{*1} 正員, 山梨大学工学部(☎ 400-8511 甲府市武田 4-3-11).
E-mail: tsuyoshi@ccn.yamanashi.ac.jp

ϵ_1	0.1	0.1	0.1	1.0	2.0
ϵ_2	0.1	1.0	2.0	1.0	2.0

Fig. 1 Examples of superquadrics

の座標系に取る。このとき、物体上の点 $P(x, y, z)$ は左右画像上 (u, v) にそれぞれ、

$$u_R = f \frac{x}{z}, \quad v_R = f \frac{y}{z} \quad (1)$$

$$u_L = f \frac{x}{z} + f \frac{D}{z}, \quad v_L = f \frac{y}{z} \quad (2)$$

のように写像される。ただし、添え字 L, R はそれぞれ左画像・右画像を表し、 f はカメラの焦点距離を表す。ここで、

$$\Delta = f \frac{D}{z} \quad (3)$$

とすると Δ は視差を表す。ステレオ画像計測では、左右画像にて対応点を決定し、この Δ を求めることにより奥行きを測定する。

2.2 超二次関数 超二次関数は、曲面を表現でき、その表示方法は、楕円曲面に類似している。また、パラメータを変化させることにより様々な形状を表現できることが知られている。超二次関数は

$$\left\{ \left(\frac{x_s}{a_1} \right)^{\frac{2}{\epsilon_1}} + \left(\frac{y_s}{a_2} \right)^{\frac{2}{\epsilon_2}} \right\}^{\frac{\epsilon_1}{2}} + \left(\frac{z_s}{a_3} \right)^{\frac{2}{\epsilon_1}} = 1 \quad (4)$$

と表される。ここで、 a_i ($i = 1, 2, 3$) はスケールパラメータ、 ϵ_i ($i = 1, 2$) は形状パラメータと呼ばれる。図1に超二次関数で表現できる形状の一例を示す。 ϵ_1 および ϵ_2 の値により立方体からダイヤ形状まで表現できることがわかる。三次元物体を超二次関数で表現した場合、式(3)で表される視差は、関数として表されることになる。

2.3 視差関数 物体を先に述べた超二次関数で扱い、生じる視差についてその導出方法を述べる。

まず、超二次関数座表系 $\vec{x}_s = [x_s, y_s, z_s]^T$ とワールド座表系 $\vec{x} = [x, y, z]^T$ との関係は、回転行列を R 、移動ベクトルを $\vec{r}$ として

$$\vec{x}_s = R(\vec{x} - \vec{r}) \quad (5)$$

と表せる。式(5)を式(4)に代入し、さらに、式(1)を代入することにより、式(4)は $u_R, v_R, z, a_1, a_2, a_3, \epsilon_1, \epsilon_2, R, \vec{r}$ の関数となる。そこで、この関数を

$$f(u_R, v_R, z, a_1, a_2, a_3, \epsilon_1, \epsilon_2, R, \vec{r}) - 1 = 0 \quad (6)$$

Fig. 2 The flow of GA(Genetic Algorithm)

と置く。視差 Δ は、式(6)を満たす z を求めることで、式(3)より求まる。

3. 遺伝的アルゴリズム

3.1 遺伝的アルゴリズムの原理 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下、GA と呼ぶ。) とは、生命体の遺伝と進化を工学的にモデル化し、最適解を得るアルゴリズムである。その原理を簡単に述べる。

GA では、染色体中の DNA を 1, 0 のビット列で表し、これを *string* と呼ぶ。各個体は適応度により評価され、淘汰・交叉・突然変異を繰り返すことにより適応度の高い個体が残る。図2に GA の流れ図を示す。処理方法を本研究とあわせて述べる。

- ① まず、初期化として遺伝子の異なる様々な個体を発生させる。
- ② 次に各個体の適応度を計算し、適応度順に並び替え、どの個体を残すかの選択をする。この時、選択の方法はいくつかあるが、本研究ではエリート保存方式を用いる。エリート保存方式は、適応度の高い個体から次世代に残すという方法であり、アルゴリズムが簡単という利点がある。
- ③ 選択後、交叉を行う。交叉とは、別々の個体の遺伝子の入れ替えを行うことを言う。交叉方法および交叉位置には、様々な方法が考えられるが、本研究では、適応度が最上位の個体と最下位の個体、第二位の個体と下から二位の個体といったように

Fig. 3 Calculation of the fitness function

Table 1 The definition of a string

PARAMETER	P_{a1}	P_{a2}	P_{a3}	P_{e1}	P_{e2}	P_{r1}	P_{r2}	P_{r3}	P_{tx}	P_{ty}	P_{tz}
[BIT]	7	7	7	6	6	9	7	7	6	6	6

交叉させる。交叉位置はランダムに設定する。

- ④ 次に遺伝子に突然変異を起こさせる。これは、遺伝子のある部分の値を変え、集団のばらつきを大きくする。これにより、より良い適応度を持つ個体の発生を期待する。

以上の手順を繰り返すことにより最適解が探索される。

3.2 超二次関数パラメータの記述

3.2.1 コーディング コーディングとは、string を意味のあるビット列に設計することをいう。現在のところ、コーディングには、定まった手法は無く設計者に委ねられている。本研究での GA により解を得るパラメータは

スケールパラメータ : a_1, a_2, a_3

形状パラメータ : $\varepsilon_1, \varepsilon_2$

回転角 : θ, ϕ, ψ

移動量 : $\Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_z$

である。なお、式(5)の移動ベクトルは

$$\vec{a} = [g_x + \Delta t_x \quad g_y + \Delta t_y \quad g_z + \Delta t_z]^T$$

とし、 $G(g_x, g_y, g_z)$ は、左右画像に映る物体の重心から計算した対象物体の重心である。本実験での string とビット数の関係を表 1 に示す。各パラメータは表 1 のように配置され、対応するビット列を切り出す。切

り出されたビット列は、十進数に変換され、次のように超二次関数パラメータに変換される。

- (i) スケールパラメータ : 物体の大きさを径の最大が 200 までと想定し、次式のように決定する。

$$a_i : 100 \times p_{ai} / (2^7 - 1) + 10 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

- (ii) 形状パラメータ : 形状パラメータは、0.1~2.0 となるように設計する。このとき、形状パラメータは、形状の変化量が偏らないため指数関数により表した方が良いとの指摘がある⁽⁹⁾ため、次式のように決定する。

$$\varepsilon_i : 0.1 \times \left(\frac{2}{0.1} \right)^{\frac{p_{ei}}{(2^6 - 1)}} \quad (i = 1, 2) \quad (8)$$

- (iii) 回転角 : 超二次関数は、対象な形状であるため、オイラーの角における z 軸周りの回転を $0 \sim 2\pi$ 、その他の回転角を $0 \sim 0.45\pi$ とする。

$$\theta : 2 \times \pi \times p_{r1} / (2^9 - 1) \quad (i = 1, 2, 3)$$

$$(\phi, \psi) : 0.45 \times \pi \times p_{ri} / (2^7 - 1) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

- (iv) 移動量 : 移動量は、xyz 軸ともに -25~25 までの間を取るものとする。

$$\Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_z : 25 \times \{2 \times p_k / (2^6 - 1) - 1\} \quad (k = t_x, t_y, t_z) \quad (10)$$

3.2.2 適応度の決定 本手法での適応度の決定方法について述べる。図 3 に、ステレオカメラにて物

体を捉えている様子を示す。また、図3右側の図は、右画像面の拡大図を示している。左右カメラの間隔は距離 D であり、焦点距離は f である。撮影された物体は、左右画像に写像され、収束過程のある状態での超二次関数は、左右カメラの前方に復元されている。

まず、復元された超二次関数を画像面に写像し、実際に撮影されている物体と重なる部分、重ならない部分の面積をそれぞれ、

重なる部分 : $areaP_k$

重ならない部分 : $areaM_k$

と定義する。ただし、これらは左右画像についてそれぞれ存在するので、 $k = L, R$ とする。

次に、左右画像間に対応する点の濃度分布の差を求める。復元された超二次関数は、三次元座標を持つため、左右画像間に対応点を与える。すなわち、右画像上のある点 u_R と対応する点 u_L は、2.1 で述べたように Δ が視差関数として与えられ、このとき $u_L = u_R + \Delta$ である。よって復元された超二次関数と画像上の物体との重なる部分における濃度分布の差の二乗和 s は、左右画像の濃度分布をそれぞれ、 I_L, I_R とすれば、

$$s = \sum_{object} [I_L(u_R + \Delta) - I_R(u_R)]^2 \quad (11)$$

と表せる。GA では、適応度が增大する方向に収束することを考え、 $areaP_k, areaM_k$ ($k = L, R$), s を用いて適応度 $fitness$ を、

$$fitness = \left[\frac{areaP_R - areaM_R}{R_{area}} + \frac{areaP_L - areaM_L}{L_{area}} \right] \times (255.0/\sqrt{s}) \quad (12)$$

と定義する。ここで、 R_{area}, L_{area} は左右画像上に写る物体の面積を表す。

3.3 復元成功の判定 復元された超二次関数がどの程度の状態ならば、復元に成功したかという判断基準について述べる。

まず、復元された物体とモデルとの重心が一致しているものとする。モデルとなる物体の超二次関数式は、あらかじめ数式化されており、復元された物体の可視部分のみの三次元点をモデル側の超二次関数式に代入し判定する。式(4)は、

$$\left[\left\{ \left(\frac{x_s}{a_1} \right)^{\frac{2}{\epsilon_1}} + \left(\frac{y_s}{a_2} \right)^{\frac{2}{\epsilon_2}} \right\}^{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} + \left(\frac{z_s}{a_3} \right)^{\frac{2}{\epsilon_1}} - 1 \right]^2 = 0 \quad (13)$$

と変形できる。この時、左辺を $S(x_s, y_s, z_s)$ と置くと、可視部分の三次元点 (x, y, z) を超二次関数座標系に変換し、式(13)に代入すると、モデルと完全に一致した

Fig. 4 Experimental setup

Fig. 5 Dimensions of objects (cylinder, shape and cube)

場合、 $S(x, y, z) = 0$ となる。そこで、 S の最大値、および分散をそれぞれ S_{max}, S_{dist} としてこれらを用いて判定する。

4. 実験

4.1 実験装置 実験は、図4に示すような装置で行う。CCD カメラは、移動ステージ上に配置され、距離 D 移動することでステレオ画像を得る。また、物体表面には、テクスチャを明確にするため、プロジェクタにより格子模様を照射する。各実験装置の仕様は

CCD カメラ : CK3800 (38 万画素, メイジテクノ)

レンズ : 固定焦点型 ($f = 12mm$)

画像処理ボード : MTATCL (マイクロテクニカ)

プロジェクタ : CPJ-D500 (SONY)

である。まず、CCD カメラにより撮影した画像にノイズ除去、ラベリングを施し、物体を抽出する。この操作を左右画像に行い、左右画像から抽出された物体を用いて3章で述べた方法により超二次関数パラメー

Fig. 6 Examples of the recovery success

Fig. 7 Examples of the recovery failure

Table 2 Parameters of superquadrics (success)

	a_1, a_2, a_3	ϵ_1, ϵ_2	Depth	S_{max}	S_{dist}
(a)	30.5, 28.9, 51.7	0.33, 1.30	610.5	0.81	0.04
(b)	32.8, 32.8, 60.2	0.31, 1.24	574.7	0.27	0.01
(c)	46.2, 59.6, 66.7	0.17, 0.93	629.7	1.07	0.08
(d)	49.4, 50.2, 47.8	0.19, 0.19	548.9	1.18	0.08

Table 3 Parameters of superquadrics (failure)

	a_1, a_2, a_3	ϵ_1, ϵ_2	Depth	S_{max}	S_{dist}
(a)	50.9, 25.0, 58.0	1.03, 0.85	597.5	4.75	1.26
(b)	68.2, 34.4, 78.5	1.19, 0.98	592.7	10.10	10.80
(c)	110.0, 84.8, 106.9	1.82, 1.73	632.1	6.40	1.25
(d)	97.4, 110.0, 91.1	1.91, 1.73	604.1	3.79	1.23

タを求める。

4.2 実験 実験に使用する物体形状を図5に示す。寸法はそれぞれ

- 円柱 (S) : $D1=D2=53, H=100$ ([mm])
- 円柱 (L) : $D1=D2=66, H=120$ ([mm])
- 楕円柱 : $D1=91, D2=110, H=147$ ([mm])
- 立方体 : $L=W=H=104$ ([mm])

である。以下これを対象物体 a~d と呼ぶ。物体を置く位置は、カメラ前方 600mm(60cm) とする。実験は、対象物体 a~d それぞれについて姿勢・位置を無作為に配置し、それぞれ 25 回ずつ計 100 回行う。また、GA

Fig. 8 A diagram of fitness

における個体数は、string ビット数と同じ 74 とした。

4.3 実験結果 実験結果を図6・7および表2・3に示す。図6および表2は成功例であり、図7および表3は失敗例である。また、収束状況を図8に示す。

まず、成功例について、図6および表2から対象物体 a~d の復元が良好に行われていることがわかる。このとき、復元成功判定基準 S_{max} , S_{dist} は失敗例に比べ小さい値となっていることが分かる。同様に失敗例についてであるが、図7の(a)~(d)それぞれについて見た目にも成功しているとは考えられず、復元結果表3にある ϵ_1 , ϵ_2 もモデルの形状を表しているとは言えない。また、復元成功判定基準 S_{max} , S_{dist} も大きな値となり、モデルと形状的に離れていることが分かる。

以上、結果例について述べたが S_{max} , S_{dist} を整理

Fig. 9 The relation between the number of strings and the ratio of success

し、成功率を調べたところ、100回の試行では44%であった。

次に、繰り返し回数について述べる。GAでは繰り返しを「世代」と呼ぶ。図8は収束状況を示し、世代が進むにつれて適応度は増加していることがわかる。本実験では、個体数=stringビット数としたが、対象物体a~dのどの場合も、ほぼ300世代ほどで適応度の増加が減少していることが分かる。

4.4 考察 物体復元の失敗を調べたところ、違う形状への収束、軸の入れ替わりがあり、特に、物体を傾けて配置した場合に多く見られた。これは、発生させる個体の数すなわちstringの数とstringのビット数によると考えられる。一般的には、個体数は、数十以上発生させる。本研究では、stringのビット数と同じ個体数を発生させた。また、物体を傾けた場合、姿勢は、回転を表すパラメータ $\theta\phi\psi$ の分解能による。すなわち、 θ , ϕ , ψ をコーディングする際のビット数が、姿勢に影響してしまい、本来、復元した物体とモデルとの姿勢が一番近い状態に収束するべきところ、異なる姿勢の場合の適応度が高くなり、異形状・軸の入れ替わりが起きたものと考えられる。しかしながら、分解能が高すぎても、局所解しか得られないなどの問題が出ると考えられる。

そこで、個体数および各パラメータをstringに変換する際のビット数についてチューニングを行う。まず、stringのビット数を74のまま、個体数を変化させた。その結果を図9に示す。この図から個体数を増やすことにより成功率が上がることをわかる。このとき、最高で81%(個体数114)の成功率となり大幅に改善された。次に、個体数114のままstringのビット数を増やした。stringのビット数は、細かい回転角を復元できるように

$$(P_1, P_2, P_3) = (10, 8, 8) \quad ([\text{bit}])$$

とした。また、大きさについても

$$(P_1, P_2, P_3) = (8, 8, 8) \quad ([\text{bit}])$$

とした。その結果、成功率は82%となった。

まとめ

本研究にて得られたことをまとめると、以下のようになる。

1. ステレオ画像から、GAを用いて物体を超二次関数として復元する手法について述べた。
2. 適応度に、左右画像に写る物体面積、復元された物体の投影面積、左右画像での濃淡値の差を用いることを提案した。
3. 復元成功の基準を定め、実際に基本的な形状にて実験した結果、44%であった。
4. stringのビット数および発生数を調整することにより、82%の成功率となることを確認した。

文献

- (1) FRANC SOLINA, RUZENA BAJCSY: *Recovery of Parametric Models from Range Images*, IEEE Trans. PAMI, Vol.12, No.2(1990), pp.131-147.
- (2) 堀越, 笠原: 超2次関数による3次元インデクシング, 電子情報通信学会論文誌 D-II Vol.J73-D-II, No.10, pp.1716-1724(1990).
- (3) D. Terzopoulos, D. Metaxas: *Dynamic 3D Models with Local and Global Deformations: Deformable Superquadrics* Proc.3rd Int. Conf. on Comput. Cision, Osaka, pp.606-615(1990).
- (4) Erik R. van Drop, Paul P. L. Regteij: *Fitting undeformed superquadrics to range data: improving model recovery and classification*, Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition(USA), Vol. 1998, pp.396-401(1998).
- (5) 青木: たとえば、コンピュータグラフィックス講義, コロナ社, 1997.
- (6) L. H. Chen, Y. T. Liu, H. Y. Lio: *Similarity measure for superquadrics* IEEE Proc.-Vis. Image Signal Process, Vol. 144, No.4, pp.237-243(1997).
- (7) 堀田, 北村, Hann, 村井: 超2次関数とCSG表現を用いた3次元物体の形状記述の基礎検討電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J82-D-II, No.4, pp.790-797(1999).
- (8) A. Gupta, R. Bajcsy: *Surface and Volumetric Segmentation of Range Images Using Biquadrics and Superquadrics*, Proc. 11th ICPR, Hague, pp. 158-162(1992).
- (9) 網島, 斎藤: 遺伝的アルゴリズムを用いた超2次関数のパラメータ推定, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J79(1996), pp.795-802.