

物体三维形状恢复的遗传算法方法

田英利 马颂德

(中国科学院自动化研究所模式识别国家重点实验室, 北京 100080)

摘要 提出了一种新的物体三维形状恢复的遗传算法方法。用固定位置的摄像机在不同位置的球扩展光源下获取图象序列,并用遗传算法对物体表面每一点的法线矢量进行快速搜索。实验结果表明,此方法能有效地恢复扩展光源下物体的三维形状。不仅放宽了对光源和物体表面的限制,而且精度及鲁棒性均有很大提高。

关键词 遗传算法 形状恢复 图象序列

0 引言

形状恢复是计算机视觉中的一个重要问题。二十几年来,针对不同的情况,人们提出了各种各样的形状恢复方法。如由镜面反射恢复物体形状^[1],由影调恢复物体形状(Shape-from-Shading)^[2]和 photometric stereo^[3]方法等。其中 Shape-from-Shading^[3]和 photometric stereo 方法主要解决漫反射物体的形状恢复且基于无穷远点光源的假设。Nayar 等最早提出用扩展光源恢复漫反射物体形状^[4]。最近, Sato 和 Ikeuchi^[5]又提出基于球扩展光源由彩色图象序列来恢复非漫反射表面形状的方法。但是,他们的方法有以下不足:(1) 实验装置极不方便(如图 1 所示)。物体放在大灯罩中心,点光源在灯罩外移动获取图象。

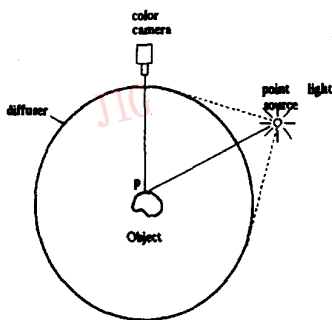


图1 Sato 和 Ikeuchi 方法实验装置简图

(2) 在他们的方法中,只有位于光源运动平面上的物体的法线方向被准确地恢复。确切地说,他们只恢复了物体的 2D 形状。为此,我们发展了一种更实用、更方便的球扩展光源模型。在此基础上,提出了一种新的由 2 个图象序列恢复物体三维形状的遗传算法方法。应用此方法,不仅位于光源运动平面上的物体表面法线能准确地计算,而且,可以获得整个物体的 3D 形状信息。

1 球扩展光源模型

1.1 球扩展光源上任一点在物体上的光照度

在“光源-物体”坐标系中的球扩展光源的几何关系如图 2 所示。

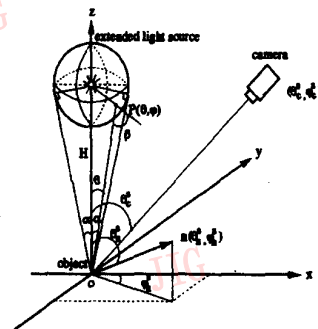


图2 三维坐标系下的球扩展光源模型几何图

球扩展光源的中心位于 Z 轴。物体上任一点的

法线方向为 $\mathbf{n}(\theta_n^s, \varphi_n^s)$ 。摄像机位于方向 $(\theta_c^s, \varphi_c^s)$ 。上标 s 表示在“光源-物体”坐标系中。我们用一个白色球形灯罩罩在一个小灯泡上作为球扩展光源。 r 为球扩展光源的半径, H 为物体与球扩展光源中心之间的距离。 α 为球扩展光源照射到物体的有效角。从图2得知:

$$\alpha = \sin^{-1}(r/H) \quad (1)$$

小灯泡作为点光源,假设其发光强度为 I_0 。则球扩展光源的发光度为:

$$E = \rho I_0 / r^2 \quad (2)$$

其中 ρ 为透射系数。

球扩展光源上任一点 $p(\theta, \varphi)$ 在物体方向上的光亮度为:

$$L(\theta) = E \cos \beta \quad (3)$$

由图2知,物体与光源上点 $p(\theta, \varphi)$ 之间的距离为:

$$D = H \cos \theta - \sqrt{r^2 - H^2 \sin^2 \theta} \quad (4)$$

所以,

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \frac{\sqrt{r^2 - H^2 \sin^2 \theta}}{r} \quad (5)$$

$$L(\theta) = \rho I_0 \frac{\sqrt{r^2 - H^2 \sin^2 \theta}}{r^3} \quad (6)$$

物体被球扩展光源上一点 $p(\theta, \varphi)$ 照射的光照度为:

$$B = \begin{cases} L(\theta) \cos \Delta \theta / D^2, & \Delta \theta < 90^\circ \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\Delta \theta$ 是 op 与物体表面法线 \mathbf{n} 之间的夹角,且

$$\begin{aligned} \cos \Delta \theta &= \sin \theta \cos \varphi \sin \theta_n^s \cos \varphi_n^s + \\ &\sin \theta \sin \varphi \sin \theta_n^s \sin \varphi_n^s + \cos \theta \cos \theta_n^s \end{aligned} \quad (8)$$

1.2 物体表面被整个球扩展光源照射的光照度

扩展光源可以看作是许多点光源的集成,物体表面被整个球扩展光源照射的光照度可以通过光源上每一点的积分运算来获得。所以物体表面的光照度 B' 为:

$$\begin{aligned} B' &= \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} B d\theta d\varphi = \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} [L(\theta) \cos \Delta \theta / D^2] d\theta d\varphi \\ &= C \cos \theta_n^s \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$C = \frac{\pi \rho I_0}{4H^2 r^3 (H^2 - r^2)^2} [2H^3 r^2 \pi + Hr^4 \pi + (4Hr^3 - 2H^3 r - 4r) \sqrt{H^2 - r^2} + (2H^5 - 4H^2) \alpha]$$

如果系统装置确定,则 C 为一常数。

在物体形状恢复方法中,我们通常固定摄像机位置而移动光源来获取图象序列。因此需要把公式(9)转换到“摄像机-物体”坐标系中,此转换可通过旋转“光源-物体”坐标系一定角度来实现。所以,在“摄像机-物体”坐标系中物体表面被扩展球光源照射的亮度为:

$$\begin{aligned} B' &= C \cos \theta_n^s \\ &= C(l_x \sin \theta_n \cos \varphi_n + l_y \sin \theta_n \sin \varphi_n + l_z \cos \theta_n) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, φ_n 和 θ_n 为“摄像机-物体”坐标系中的物体表面法线方向,

$$\begin{aligned} l_x &= \frac{-\sin \theta_c^s \cos \theta_c^s \cos \varphi_c^s}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_c^s \cos^2 \varphi_c^s}} \\ l_y &= \frac{\sin \theta_c^s \sin \varphi_c^s}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_c^s \cos^2 \varphi_c^s}} \\ l_z &= \cos \theta_c^s \end{aligned}$$

2 物体三维信息获取的遗传算法方法

为获取物体三维信息,我们固定摄像机,分别沿以物体为中心的2个赤道面获取2个图象序列。图3为获取2个图象序列的光源轨迹平面示意图。为增加结果的准确性,通常2个光源轨迹平面间的夹角不小于 30° 。从式(10)可知,对象素点 (x, y) ,考虑图象序列中每一幅,其灰度为:

$$\begin{cases} I_1(x, y) \approx I_{\max} \cos(\theta_n^s)_1, \\ I_2(x, y) \approx I_{\max} \cos(\theta_n^s)_2, \\ \dots \\ I_m(x, y) \approx I_{\max} \cos(\theta_n^s)_m, \end{cases} \quad (11)$$

式中 $i=1, 2, \dots, m$ 为2个图象序列中的图象总数, φ_n 和 θ_n 为我们所要求的对应象素点 (x, y) 的法线矢量(即物体形状), I_i 为图象灰度的测量值。

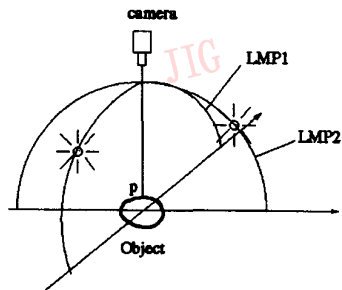


图3 获取2个图象序列的光源轨迹图

物体形状恢复问题可简单描述为:当给定光源方向 (φ_i, θ_i) 和 $I_i, i=1,2,\dots,m$,如何求 φ_n 和 θ_n 以使上述公式误差最小。我们把它简化为一个最小二乘问题,即使 $S(\varphi_n, \theta_n)$ 最小:

$$S(\varphi_n, \theta_n) = \sum_{i=1}^m (I_i - I_{\max} \cos(\theta_i^t))_i^2 \quad (12)$$

由公式(10)可以看出,在“摄像机-物体”坐标系中, $S(\varphi_n, \theta_n)$ 显然是非线性的,而且通常有多个最小值。这样,传统的优化方法如 Newton-Raphsonf 方法则可能只求得局部最优值。为此,我们引入遗传算法来解决这个问题。

2.1 遗传算法的基本原理

遗传算法模仿生物遗传、变异,由低级到高级的进化过程,将进化操作应用到一群对搜索空间编码的基因串中,通过选种、复制、杂交和变异等遗传算子,择优淘劣,最终得到全局最优解。最近几年,遗传算法已成功地应用于解决各种优化问题^[6,7]。下面解释遗传算法中的几个基本概念:

(1) 选种。即从群体中随机选取一对个体作为双亲(如图4(a))以繁殖后代(如图4(b))。通常适应度越高的个体,被赋予更大的选中概率。

```
A = 1110000111 | 0101010
B = 0000000000 | 1111111
```

(a) 两个双亲串

```
A' = 0000000000 | 0101010
B' = 1110000111 | 1111111
```

(b) 两个后代串

图4 遗传算法基因串杂交示意图

(2) 复制。即2个从总个体中选取的基因串的遗传物质被复制到后代中。基因串被选中的概率正比于它们的适应度,从而可以保证适应度高的个体的基因能以较大的概率遗传的后代中。

(3) 杂交的目的是为了产生更优良的个体。由复制产生的2个后代,当随机产生的 $[0, 1]$ 间均匀分布的一随机数小于杂交率时,便进行杂交。杂交过程如图4所示。如双亲A和B长为 l (图中 $l=16$),随机产生一整数 $j \in [1, l]$ (图中 $j=10$),则这2个后代的第 j 个点的左边部分进行杂交。

(4) 变异。即以一定概率选取群体中若干个体,对已选取的每个个体随机选取某一位将其数码反转(由1变为0或由0变为1)。变异保证了生物

的继续进化。有利的变异由于自然选择的作用得以遗传和保留,有害的变异则在遗传中被淘汰。

2.2 物体三维信息获取的遗传算法方法

将遗传算法应用于物体三维信息获取首先需解决2个问题:(1)如何把问题的解进行编码;(2)如何构造合适的适应度函数。在形状恢复的应用中,我们定义遗传算法的适应度函数为:

$$f(\varphi_n, \theta_n) = \frac{1}{1 + S(\varphi_n, \theta_n)} \quad (13)$$

对参数 φ_n 和 θ_n 的编码,与大多数遗传算法类似,我们对每个参数采用二进制编码。若对每个参数的可能取值范围在 $[0, 255]$ 间进行量化,则每个基因串由 8×2 个比特位的二进制串组成。如果参数 φ_n 的最大值和最小值分别为 $\varphi_{n\max}$ 和 $\varphi_{n\min}$,则其在 $[0, 255]$ 间的量化值 i 与其实际值有如下关系:

$$\varphi_n = \varphi_{n\min} + \frac{i}{255}(\varphi_{n\max} - \varphi_{n\min}) \quad (14)$$

在我们的实验中,杂交率取为0.8,变异率为0.08。初始值随机给定。遗传算法在30代后停止迭代。实验结果表明,用遗传算法从图象序列恢复物体形状,每次都能得到正确的结果。遗传算法在物体形状恢复中应用的流程图如下:

begin

对非漫反射物体,首先分离出其镜面反射图象和漫反射图象。我们只用漫反射图象序列来恢复物体形状。其中每幅图象尺寸为 $N \times N$ 个象素。图象序列中共有 m 幅图象。

for $x=0$ to $N-1$, do

for $y=0$ to $N-1$, do

从 m 幅漫反射图象读象素点 (x, y) 的 m 个灰度值 $I_i, i=1,2,\dots,m$ 。

调用遗传算法:

- (1) 设定“父代”人口中个体(串)的总个数,并初始化每一个串;
- (2) 由适应度函数公式计算每条基因串的适应度;
- (3) 应用遗传算子(复制、杂交和变异等)产生新的基因串;
- (4) 删除人口中适应度低的基因串,为新的基因串腾出空间;
- (5) 计算新的基因串的适应度并插入到人口中;
- (6) 如果遗传算法计算到第30代,则停止计算并给出具有最大适应度的基因串,否则,重复第(3)步。

对最大适应度的基因串进行解码得到象素点(x, y)的表面法线矢量。

endbegin

3 实验结果

(1) 模拟图象的实验结果

首先,我们给出一组模拟图象的实验结果。我们用光线追踪法在 SGI 工作站上模拟球扩展光源产生两组图象。其中 φ_1 为 30° , φ_2 为 60° 。每一图象序列获取 13 幅图象。光源位置分别以 10° 步长从 -60° 到 60° 。表 1 为模拟图象的实验结果。

表 1 模拟图象的实验结果(Sato 等方法和我们方法比较)

实际值		本文方法		Sato 方法	
θ_n	φ_n	θ_n	φ_n	Seq 1	Seq2
10°	320°	9.88°	320.09°	3.3°	6.5°
20°	240°	20.12°	240.07°	-16.9°	19.4°
30°	110°	30.00°	109.51°	5.6°	24.6°
40°	90°	40.24°	89.85°	22.8°	36.2°
50°	50°	50.12°	50.54°	48.4°	48.8°
60°	30°	60.00°	29.48°	60.0°	58.4°
30°	20°	30°	19.66°	29.6°	54.9°
60°	0°	60.00°	0°	56.1°	52.2°
30°	0°	30.00°	0°	26.5°	23.7°
80°	30°	80.12°	30.89°	80.4°	78.7°

表中第 1 和第 2 列为物体表面法线的实际值,第 3 和第 4 列为由遗传算法求得的法线,第 5 和第 6 列则为用 Sato 和 Ikeuchi 的方法只从一个图象序列恢复的物体形状。

从表 1 可以看出,Sato 和 Ikeuchi 的方法只能准确恢复位于光源运动平面上点的形状,而本文的方法则可以准确恢复 3D 物体形状。结果显示,本文的方法对非漫反射表面物体也可以准确恢复其形状。

(2) 实际图象的实验结果

实验装置如图 5 所示。球扩展光源由一球形灯罩罩在一个小灯泡外形成且装在一个 SCORBOT-ER IX 机器臂上。机器臂带动光源在包含摄像机光轴的平面内运动获取图象序列。2 个图象序列的 φ 角分别为 0° 和 60° 。每一图象序列的 θ 角分别以 10° 步长从 -90° 到 90° (其中 $-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$) 处由

于放置摄像机,故不获取图象)。表 2 为一个球的实际结果。每一列所表示的意义与表 1 相同。附图则为用遗传算法恢复出的一个鼠标和一个碗的三维形状。

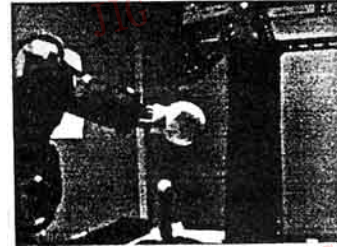


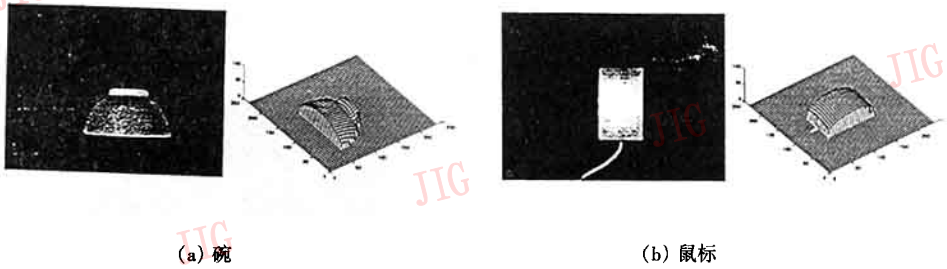
图 5 实际图象的实验装置图

表 2 实际图象的实验结果

实际值		本文方法		Sato's method	
θ_n	φ_n	θ_n	φ_n	Seq1	Seq2
10°	320°	8.68°	323.10°	-2.87°	2.96°
20°	240°	22.12°	237.97°	5.67°	21.62°
30°	150°	28.87°	147.51°	24.76°	8.93°
45°	90°	42.94°	92.85°	16.47°	39.73°
60°	60°	58.27°	62.54°	42.57°	88.31°
80°	30°	82.54°	27.48°	72.94°	73.52°
30°	0°	28.41°	2.82°	28.63°	14.74°
30°	60°	28.52°	61.23°	16.94°	28.54°
60°	30°	57.69°	28.47°	51.96°	52.14°
60°	0°	58.16°	1.94°	58.49°	43.38°
80°	0°	82.81°	2.47°	81.72°	64.25°

4 结论和讨论

本文提出了一种新的物体三维形状恢复的遗传算法方法。我们用固定位置的摄像机在不同位置的球扩展光源下获取图象序列,并用遗传算法对物体表面每一点的法线矢量进行快速搜索。实验结果表明,本方法能有效地恢复扩展光源下物体的三维形状。对非漫反射物体,我们首先分离出其漫反射分量,然后对其漫反射分量应用快速遗传算法获取物体三维形状。与传统的形状恢复方法相比,此方法不仅放宽了对光源和物体表面的限制,而且精度及鲁棒性均有很大提高。如果我们能运用一些其他的约束条件,如物体表面连续性等,可望将本文的方法扩展到更复杂的物体形状恢复。



附图 实际图象实验结果

参考文献

- 1 Healey G, Binford T. Local Shape from Specularity. CVGIP, 42, 1986: 62 ~ 86.
- 2 Horn B K P. Obtaining Shape from Shading Information. Winston P H, ed., The Psychology of Computer Vision, New York: McGraw Hill, 1975: 115 ~ 155.
- 3 Woodham R J. Photometric Stereo: A Reflectance Map Technique for Determining Surface Orientation from Image Intensity. In proc. of SPIE, 1978, 136 ~ 143.
- 4 Nayar S K, Ikeuchi K, Kanade T. Extracting Shape and Reflectance of Hybrid Surfaces by Photometric Sampling. In Proc. of Image Understanding Workshop, 1989: 563 ~ 583.
- 5 Sato Y, Ikeuchi K. Temporal-Color Space Analysis of Reflection. In Proc. of the Conf. of CVPR, 1993: 570 ~ 576.
- 6 Goldberg D E. Optimization, Machine Learning. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1989.
- 7 刘健庄, 等. 基于 Hausdorff 距离和遗传算法的物体匹配方法. 电子学报, 1996, (4): 1 ~ 6.



田英利 1987年毕业于天津大学, 1996年于香港中文大学获博士学位。现为中科院自动化所模式识别国家重点实验室博士后, 研究方向为计算机视觉, 模式识别, 图象处理和计算机图形学。



马颂德 IEEE 高级会员, 1968年毕业于清华大学, 1986年获法国国家博士学位, 现为中科院自动化所所长, 模式识别国家重点实验室主任, 博士生导师, 长期从事计算机视觉, 模式识别和图象处理等方面的研究工作。

A Genetic Algorithm for 3D Shape Recovery

Tian Yingli, Ma Songde

(National Laboratory of Pattern Recognition Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract In this paper, we propose a novel method to recover the 3D shape of objects from two image sequences. At first, for eliminating the limitations of the conventional shape from shading methods, we develop a spherical light source model. Based on this model, a fast genetic algorithm is then used for the shape and reflectance recovery from the diffuse reflection component extracted from a pair of image sequences. An image sequence is acquired with each image taken at a different light position. As a result, the normal of a surface patch which is not in the light source moving plane can also be estimated robustly. Our method is verified by both real and simulated experiments.

Keywords Genetic algorithm, Shape recovery, Image sequences