

# 利用 CCD 图像的灰度梯度实现物体三维测量

刘章文<sup>1,2</sup> 古天祥<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 电子科技大学自动化工程学院, 成都 610054  
<sup>2</sup> 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

**摘要:** 提出了一种利用 CCD 单目图像的灰度梯度测量三维表面的方法——灰度梯度法。巧妙地运用中间变量, 找到灰度梯度与聚焦像表面梯度之间的映射关系, 将灰度约束方程转变为可求解的一元方程, 从而解出聚焦像表面的深度信息。利用聚焦像表面与物体间的几何光学的约束以及它们之间的空间共轭对称关系, 将该三维表面变换到实际三维尺寸, 以达到三维测量的目的。最后对影响该测量系统的误差进行了分析。该方法克服了传统的光切法因过多冗余图像而使测量效率低的缺点, 且该方法约束条件容易实现。对球体和柱面体的试验误差率分别为 6.0% 和 4.85%, 显示出该方法在一定范围内是有效的。

**关键词:** 光学测量; 灰度梯度法; 聚焦像表面; 光敏像; 三维重构

中图分类号: 文献标识码: A

## 1 引 言

用 CCD 器件测量物体的三维轮廓并实现三维重构是计算机视觉研究的一个重要课题。结构光法<sup>[1]</sup> (又叫光切法) 是其典型应用之一, 该方法由于摄入的图像太多, 处理的信息量太大, 影响了测量速度。直接从单目图像中提取部分三维信息早就被提出来了, 如 Tsai 等<sup>[2]</sup> 提出表面梯度法, Bichsel 等<sup>[3]</sup> 提出下山法, 张海波等<sup>[4]</sup> 提出相移逻辑云纹法, 许东等<sup>[5]</sup> 提出曲面逼近法等, 然这些方法都是定性恢复外形; 孔兵等<sup>[6]</sup> 利用普通光学透镜实现多光束共焦测量法使三维表面实现了定量测试, 但测量尺寸仍然很小。本文提出一种利用几何光学及灰度约束方程的测量方法——灰度梯度法。即通过物体和 CCD 空间上的几何光学投影关系以及灰度图像来恢复三维信息。

## 2 系统测量原理

如图 1 是实现该方法的空间几何关系图。

图中虚线方框为 CCD 摄像机,  $oxyz$  是以透镜中心为原点的图像坐标系,  $OXYZ$  为物坐标系, 为计算方便,  $Z$  轴 (图中未画出) 与  $z$  轴重合,  $x, y$  分别与  $X, Y$  平行, 平行光源采用激光器发射的激光束经

球面镜后再经过一凸透镜而获得。物体经 CCD 透镜后成像在光敏面上, 称之为光敏像 (Sensed image)<sup>[7]</sup>, 即所摄的图像。文献<sup>[7]</sup>中还提到物体成像的另一概念——聚焦像表面 (Focused image surface), 它是物体经透镜投影受几何光学约束的三维立体曲面, 与物体关于透镜在空间上成共轭对称关系。即本测量过程就是: 由 CCD 获得的二维灰度图像, 通过解灰度约束方程, 获得其三维立体聚焦像表面, 后再通过几何光学投影的约束, 变换到实际三维尺寸。若物体按要求角度旋转, 摄入多幅图像, 进行三维组合, 即可重构出整个三维轮廓。

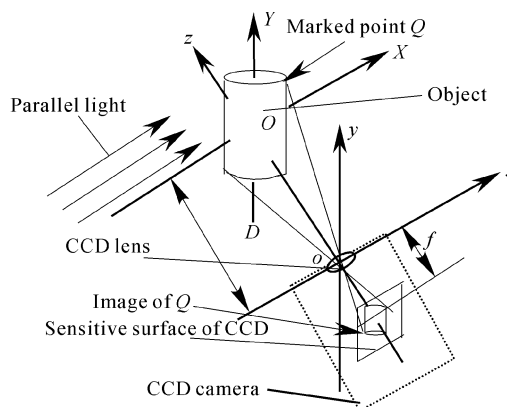


Fig. 1 The spatial relation of CCD image in measuring

## 3 聚焦像表面的三维恢复及其实物映射

为了从单目图像中求出光敏像的深度信息, 物

体表面的反射模型应是漫反射的朗伯(Lambert)表面,且应选择适当的角度以克服照射盲区<sup>[8]</sup>。如图 2 是朗伯表面反射及表面投影模型, $L$  是朗伯表面, $xyz$  是以 CCD 透镜中心为原点的像坐标系。

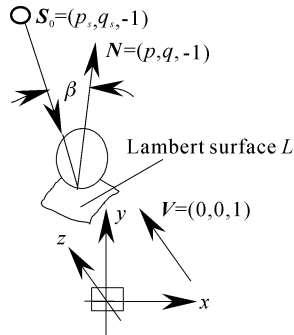


Fig.2 Lambert surface model and its projection  $S_0$  denotes the direction of light,  $V(0,0,1)$  denotes direction of sight, and  $N$  denotes normal of surface

设二维灰度图像为  $I(x, y)$ , 聚焦像表面方程为  $z = z(x, y)$ ,  $(x, y, z)$  处的法向量为  $N = (p, q, -1)$ , 则光照从方向  $S_0 = (p_s, q_s, -1)$  入射时, 在该点各方向的散射光强呈一球面状,  $N$  在该球的一条轴线上, 即  $I_\beta = I_0 \cdot \cos \beta$  ( $\beta$  角意义如图 2 所示),  $I_0$  是入射光光强,  $V(0, 0, 1)$  为摄影方向,  $p, q$  分别为  $x, y$  方向的梯度, 且

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y}, \quad (1)$$

则根据朗伯表面的特性, 即光敏面上感应到的光强与摄像方向无关, 只与该点的梯度有关, 且  $I(x, y) = I_\beta$ , 结合图 2 中矢量  $S_0$  与  $N$  的关系可得

$$|S_0| \cdot |N| \cdot \cos \beta = S_0 \cdot N,$$

即

$$\cos \beta = \frac{S_0 \cdot N}{|S_0| \cdot |N|} = \frac{pp_s + qq_s + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \times \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}},$$

则可推出图像灰度约束方程为(考虑背景)<sup>[5]</sup>

$$I(x, y) = \frac{I_0(pp_s + qq_s + 1)}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \times \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}} + \theta, \quad (2)$$

$\theta$  为背景光的影响(一般可置为 0)。若不加其它约束, (2) 式为病态方程, 存在无数多解。为解(2) 式, 作下面变换: 令

$$\begin{cases} A = p_s / \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}, \\ B = q_s / \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}, \\ H = 1 / \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}, \end{cases} \quad (3)$$

将(1)式作变换:

$$\begin{cases} p = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial I} \times \frac{\partial I}{\partial x} = ra, \\ q = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{\partial z}{\partial I} \times \frac{\partial I}{\partial y} = rb, \end{cases} \quad (4)$$

其中  $r = \partial z / \partial I$  为  $z$  对灰度的梯度, 待求的中间变量。  $\begin{cases} a = \partial I / \partial x \\ b = \partial I / \partial y \end{cases}$  分别为  $x, y$  方向的灰度梯度, 可直接从  $I(x, y)$  图像中由下式求得

$$\begin{cases} a = \frac{I(x_i, y_j) - I(x_{i-1}, y_j)}{x_i - x_{i-1}} = \frac{\Delta I(x_i, y_j)}{t_x}, \\ b = \frac{I(x_i, y_j) - I(x_i, y_{j-1})}{y_j - y_{j-1}} = \frac{\Delta I(x_i, y_j)}{t_y}, \end{cases} \quad (5)$$

式中  $i, j$  为  $x_i, y_j$  对应的像素数,  $x_i = it_x, y_j = jt_y$ , 其中  $t_x, t_y$  分别为 CCD 光敏面上纵横像素点间距, 将(3) 式、(4) 式代入(2) 式得

$$\frac{I_0[(Aa + Bb)r + H]}{\sqrt{r^2(a^2 + b^2) + 1}} = I, \quad (6)$$

(6) 式中只有  $r$  是未知数, 利用(4) 式、(5) 式即可求出  $p, q$  值, 整理(6) 式得

$$Mr^2 + 2Nr + K = 0, \quad (7)$$

其中

$$M = (Aa + Bb)^2 - \frac{(a^2 + b^2)I^2}{I_0^2},$$

$$N = (Aa + Bb)H,$$

$$K = H^2 - \frac{I^2}{I_0^2},$$

解出  $r$  得

$$r = \frac{-N \pm \sqrt{N^2 - MK}}{M}$$

根据试验, 根号外取正值符合要求。对(7) 式的求解, 需作如下说明:

1) 由于求解(6) 式需用源图中的灰度梯度, 故图像必须作灰度圆滑预处理;

2) 如果  $M = 0$ , 则其为一元一次方程, 若  $N$  不为 0, 可直接求解, 若  $N = 0$ , 说明其邻域为水平面, 这时  $p = q = 0$ ;

3) 如果  $N^2 - MK < 0$ , 有虚数解, 此时可取其实际部(应尽量避免这种情况), 光照方向  $S_0$  与摄像机摄像方向  $V$  的夹角在不挡住光线的情况下尽量小即可避免<sup>[8]</sup>;

4) 需要识别物体与背景交接及折面处, 必要时可作曲面延伸处理。

如此求出各点的梯度之后, 根据横向公式

$z(x_i, y_j) = z(x_{i-1}, y_j) + p_{i-1, j} \times t_x$ ,  
或纵向公式

$z(x_i, y_j) = z(x_i, y_{j-1}) + q_{i, j-1} \times t_y$ ,  
或横向纵向相结合

$$z(x_i, y_j) = [z(x_i, y_{j-1}) + q_{i, j-1} \times t_y + z(x_{i-1}, y_j) + p_{i-1, j} \times t_x] / 2$$

从标定点开始,逐点一一对应地就可求出整个像平面的聚焦像表面。物体上标定点,如图 1 中的 Q 点,在空间上是已知的,其物距为  $D$ , Q 点的深度可通过透镜成像公式来求得,即几何光学约束公式<sup>[7]</sup>

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}, \quad (8)$$

式中物距  $u = D$ ,  $f$  为 CCD 透镜焦距,  $v$  为像距,即 Q 点聚焦像表面深度  $z_Q$ 。

聚焦像表面恢复之后,它上面的点  $p(x, y, z)$  与目标物体上的点  $p_0(x_0, y_0, z_0)$  在透镜光学系统中成一映射关系,于是根据图 1 并结合(8)式,以及平面方向的两个坐标与深度方向的透视投影关系<sup>[7]</sup>:

$$\frac{x_0}{z_0} = \frac{x}{z}, \quad \frac{y_0}{z_0} = \frac{y}{z},$$

即可求得目标物体的实际坐标为

$$\begin{cases} x_0 = -\frac{z_0 \cdot x}{z} = -\frac{f \cdot x}{z + f}, \\ y_0 = -\frac{z_0 \cdot y}{z} = -\frac{f \cdot y}{z + f}, \\ z_0 = \frac{f \cdot z}{z + f}, \end{cases} \quad (9)$$

这样,一幅图像的实际三位数据就测量出来了,如果几幅图组合起来进行拼接,整个表面即可测量出来。

### 4 系统误差分析

通过分析,影响本方法误差主要有以下方面:光源的质量及摄像系统光学元件<sup>[9]</sup>的像差;图像光滑预处理及目标识别误差;图像灰度的量化误差;三维重构的拼接误差;朗伯表面的质量(漫反射和镜面反射并存)误差;定标点不集中而产生定标误差等。不管什么误差,反映到图像  $I(x, y)$  上,每一像素产生  $\Delta I(x, y)$ ,  $\Delta x$  和  $\Delta y$ ,而对深度就产生误差  $\Delta z(x, y)$ 。根据纵横相结合的深度公式得

$$\Delta z(x_i, y_j) = \frac{\Delta q_i \times t_y + \Delta p_j \times t_x}{2},$$

因为误差是叠加传递的,故总的误差为

$$\Delta t = \frac{t_y}{2} \sum_{i=1}^{ny} \Delta q_i + \frac{t_x}{2} \sum_{i=1}^{nx} \Delta p_i, \quad (10)$$

上式中  $nx, ny$  为纵横方向目标所占最大像素点数,前一项代表图像中累计误差最大的一列,后一项代表累计误差最大的一行。而对于像中的每一点,由(4)式得

$$\begin{cases} \Delta q = \Delta r \cdot b + r \cdot \Delta b, \\ \Delta p = \Delta r \cdot a + r \cdot \Delta a, \end{cases} \quad (11)$$

再由(5)得

$$\Delta a = \frac{\Delta I}{t_x}, \quad \Delta b = \frac{\Delta I}{t_y}, \quad (12)$$

由(7)式得

$$\Delta r = -\frac{2r \cdot \Delta N + r^2 \cdot \Delta M + \Delta K}{2Mr + N}, \quad (13)$$

式中的  $\Delta M, \Delta N$  及  $\Delta K$  都可根据  $M, N, K$  的表达式的微分式来求得,结合  $r$  的求解及(5)式,(11)式,(12)式,(13)式即可求得每一点由  $\Delta I$  引起的  $\Delta p$  和  $\Delta q$ ,故  $\Delta p$  和  $\Delta q$  应是关于  $a, b, I(x, y)$  及  $\Delta I$  的函数,代入(10)式即求得总误差  $\Delta t$ 。再由(9)式变换到实际误差上  $\Delta t_0 = f \cdot \frac{\Delta t}{f - |z|}$ 。

根据(9)式,对每一像素点,  $z$  在误差范围内变动对(9)式中的  $1/(z + f)$  的影响应该很小(即  $|\Delta z| \ll |f + z|$ ),而只有  $z_0$  的表达式分子中有  $z$ ,  $z$  与灰度直接相关,故灰度误差对  $\Delta x_0$  和  $\Delta y_0$  比对  $\Delta z_0$  的影响要小得多。而  $x$  和  $y$  方向误差主要由光学投影和几何变换产生,与灰度通过(9)式间接相关,所以本文主要讨论深度方向的误差。

### 5 试验结果及结论

图 3 为实现该测量的简易装置图。

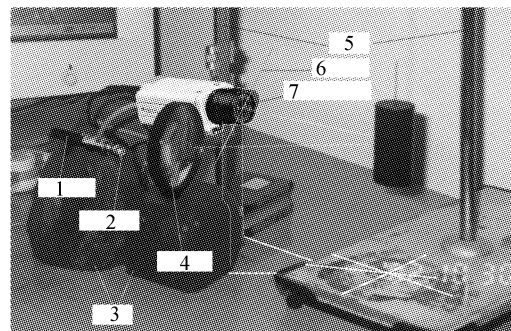


Fig. 3 A simple measuring equipment photo. 1: laser pen; 2: sphere lens; 3: base; 4: lens; 5: kickstand; 6: horizontal line; 7: CCD camera

光源用激光笔通过球面镜和凸透镜而得,与摄像方向成  $10^\circ$  的夹角,因此  $S_0 = (p_s, q_s, -1) = (0, 0.176, -1)$ ,定标点 Q 物距  $D = 300$  mm, CCD

参量为：透镜焦距  $f=8\text{ mm}$ ，光敏面上像素点大小为  $t_x \times t_y = 0.01\text{ mm} \times 0.01\text{ mm}$ 。图 4 与图 5 分别为圆柱面 ( $\Phi 40\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ ) 和球面 ( $\Phi 30\text{ mm}$ ) 的三维测量图，图 4(b) 和图 5(b) 为用两幅单目图分别重构出的三维图(为计算方便，采用了均匀旋转  $90^\circ$  的四幅图进行拼接，而本文中只示出了相对的两幅图的拼接关系，另两幅图拼接类似)。图 4(c) 和图 5(c) 分别为两物体实测相对的两幅图拼接的一个切面，从图中看到，深度失真为：柱体  $\Delta\Phi = 1.94\text{ mm}$ ，

误差率  $1.94/40 = 4.85\%$ ；圆球  $\Delta\Phi = 1.80\text{ mm}$ ，误差率为  $1.80/30 = 6.0\%$ 。

从结果看，单从恢复外形和高效测量这个角度上讲，效果比较理想。但要达到精确测量，必须作大的改进以减少误差，这也是需进一步研究的方向。另外，由于实际物体表面非常复杂，本方法对简单、凸的表面效果较好。而复杂表面，可以采取局部分割的办法，进行组合、拼接、平滑等处理即可实现全部测量。

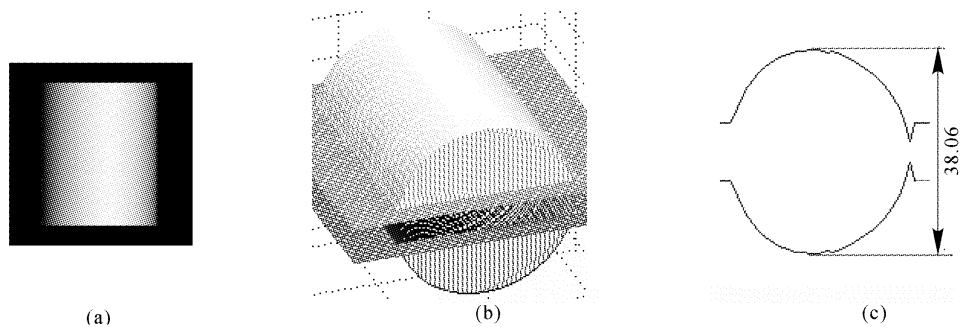


Fig. 4 The measuring figure of cylinder. (a) The original image (pixel array:  $128 \times 128$ ); (b) The 3-D reconstruction with two images; (c) A transverse section dimension

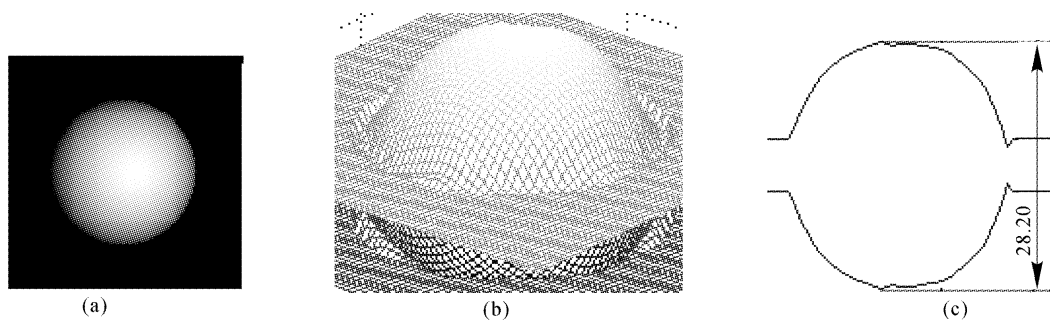


Fig. 5 The measuring figure of sphere. (a) The original image (pixel array:  $128 \times 128$ ); (b) The 3-D reconstruction with two images; (c) A transverse section dimension

由于试验条件的限制，试验精度不够理想，本方法离真正的运用还有很大差距。而本文真正的价值在于提出了利用单目图像的灰度梯度来恢复外形，这对远目标(如地形、地貌)的恢复有参考意义。而对于用单目图像准确测量三维表面，仅从理论上提出了一种实现的方法，真正能否实用还需要更精确的试验来验证。

### 参 考 文 献

- 1 Jalkis J A. Three dimensional inspection using multistriple structured light. *Opt. Engng.*, 1985, **24**(6):966~1002
- 2 Tsai P S, Shah M. Shape from shading using linear approximation. *Image and Vision Computing J.*, 1994, **12**(8):487~498
- 3 Bichsel M, Pentland A P. A simple algorithm for shape from shading. *IEEE Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, Champaign, IL, USA, 1992, 459~465
- 4 Zhang Haibo, Wu Xiaoping. The 3-D shape measurement with phase-shift and logical Moiré method. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(4):408~411 (in Chinese)
- 5 Xu Dong, Xia Liangzheng, Yang Shizhou. Using curved surface approximation to reconstruct 3-D shape from shading. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(5):552~555 (in Chinese)
- 6 Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan *et al.*. Multi-beam confocal system using pinhole array. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(3):263~266 (in Chinese)
- 7 Murali Subbarao, Tae Choi. Accurate recovery of three-dimensional shape from image focus. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, **17**(3):266~274
- 8 Wang Baoguang, He Zhonghai, Chen Lincai *et al.*. Model and performance analysis of structured light sensor. *Acta*

*Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4):481~484 (in Chinese)  
9 Wan Min, Su Yi, Zhang Wei *et al.*. Influences of the

surface error of optical elements on beam quality. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4):495~500 (in Chinese)

## Three-Dimensional Measurement of Object by Using Gray Gradient of CCD Image

Liu Zhangwen<sup>1,2</sup> Gu Tianxiang<sup>1</sup>

1 Institute of Automatic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054  
2 Institute of Applied Electronics, The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900

(Received 28 September 2002; revised 21 April 2003)

**Abstract:** A kind of method of measuring three-dimensional surface, gray gradient method, to use gray gradient of CCD image, is proposed. To use mid-variable skillfully, the mapping relation between gray gradient of CCD image and gradient of focused image surface (FIS) has been found, and the gray restricting equation has been changed into solvable monadic equation to find depth information on the FIS. By the restriction of geometry optics and space conjugate symmetric relation between focused image surface and object, the FIS is changed into trim size, so the aim to measure three-dimensional is turned into reality. Finally, the error factors affecting the system have been analyzed. The method overcomes the defect that traditional light-sectioning method is low efficient because of the tedious number of images, and its restricting conditions are not rigorous. The experiment with sphere and cylinder, error ratio of which is 6.0% and 4.85% respectively, shows the method is effective in the definite range.

**Key words:** optical measurement; gray grads method; focused image surface (FIS); sensed image; three-dimensional reconstruction

## 《光学学报》增页、更改出版日期及征订启事

今年以来,《光学学报》来稿量猛增,为了尽快缩短发表周期,经上级批准,本刊决定从 2004 年 24 卷第 1 期起,将由原来的每期 128 页增至 144 页,出版日期从每月的 17 日提前至每月的 10 日。定价改为每期 25 元,全年为 300 元。国内邮发代号为 4-293。

未能在邮局订阅者,可向本刊编辑部直接订阅。

《第 8 届国际光电子和光通信学术会议论文集》(Proceedings of the 8<sup>th</sup> Optoelectronics and Communication Conference, OECC '2003)(Shanghai, October 13~16, 2003)(全英文)还有少量存书,有意者可向《光学学报》编辑部联系购买。

电话(传真):021-69918011 E-mail: gxxb@mail.shcnc.ac.cn

《光学学报》编辑部  
2003 年 10 月 20 日

## 更 正

本刊 23 卷第 9 期第 1081 页图 2 横坐标的 5 个标值应为 950,100,1050,1100,1150 nm。摘要第 2 行末句应为“波长 1100 nm 的单模激光输出”。