

文章编号: 0253-2239(2004)09-1159-5

基于折反射原理的层去反求技术研究*

刘亚雄¹ 段玉刚² 卢秉恒² 李漆尘² 王 珏¹

(¹ 西安交通大学生物医学信息工程教育部重点实验室, 西安 710049
² 西安交通大学机械制造系统工程国家科学重点实验室, 西安 710049)

摘要: 为了克服传统层去反求测量中图像衬比度较低的缺陷, 提出一种新的基于棱镜反射原理的层去反求图像摄取方法。该方法利用棱镜的全发射和折射作用提高图像衬比度, 根据物体反射率的高低可分别采用垂直照明和倾斜照明, 分别可获得高衬比度的亮目标暗背景和暗目标亮背景图像, 为了校正由于折反射引入的几何变形, 推出了相应的数学变换模型。该研究已成功投入实际产品校正的应用中, 研究表明这种新的层去法比起传统的层去法不仅在于图像衬比度高, 而且物体截面图像的轮廓更清晰可靠、无需填充反差材料, 有望在零件及模型的反求测量中发挥较大的作用。

关键词: 应用光学; 反求工程; 层去法; 快速成型

中图分类号: TH741 文献标识码: A

A New Slicing Method Based on The Principle of Refraction and Reflection

Liu Yaxiong¹ Duan Yugang² Lu Bingheng² Li Dichen² Wang Jue¹

(¹ Key Lab of Biomedical Information Engineering of Ministry of Education, Xian Jiaotong University, Xian 710049
² State Key Lab for Manufacturing System Engineering, Xian Jiaotong University, Xian 710049)

(Received 26 September 2003; revised 4 December 2003)

Abstract: To overcome the disadvantage of low contrast in the images taken with the traditional slicing method of reverse engineering, a novel slicing method of reverse engineering based on the principle of refraction and reflection of a prism is proposed to improve the contrast of the cross-sectional images. According to the reflectivity of the object, one of the illuminating methods — straight illuminating or inclined illuminating — is adopted to get the sharp contrast images of bright object in dark background, or dark object in bright background. To adjust geometrical distortions caused by the refraction and reflection of the prism, a mathematical transformation model is set up to correct the image by means of software. This method has been applied to some cases of reverse measuring. The research confirms that this new slicing method has not only the advantage of high contrast, but also the clear and reliable contours of the cross-sectional images, what's more, there is no need of contrasting filling materials. It is hopeful that this method will play a great role in the reverse measuring of mechanical parts and models.

Key words: applied optics; reverse engineering; slicing method; rapid prototyping

1 引 言

反求工程是一种特殊的产品形状设计方法, 它

由两部分技术环节组成: 实体轮廓测量和三维模型重建^[1], 可用于艺术雕塑、文物及人体骨骼的复制。在其中的测量环节中, 除了物理光学测量法外^[2~4], 层去法是一种重要的测量方法, 其基本原理是: 用铣床和 CCD 摄像机逐层对物体截面轮廓进行铣削和测量。在一般的层去反求系统中, 成像系统的光轴

* 国家自然科学基金(30300332, 50235020)资助课题。

E-mail: yaxiongliu@163.com

收稿日期: 2003-09-26; 收到修改稿日期: 2003-12-04

总是垂直于物体截面;在模型周围和内穴中填入色彩和亮度与模型本身差异较大的物质(通常用环氧树脂或蜡)^[5]。这种方法存在以下缺陷:模型与填入物质的边界较模糊,衬比度较低;对环境光源的要求较为苛刻且操作较麻烦,容易发生高光反射。

基于折反射原理的层去反求系统能很好地克服上述缺陷:无需填充物质;对周围环境的光照没有特别的要求;特别是能获得高衬比度的截面图像,为后续的图像处理奠定了基础。

2 基于折反射的层去反求原理

2.1 原理

图 1 所示的是运用折反射原理摄取物体截面形状的原理图。物体的截面轮廓贴在棱镜(固体玻璃或透明液体)的采集面 AC 上,右下侧有一 CCD 摄像头摄取物体的截面图像。

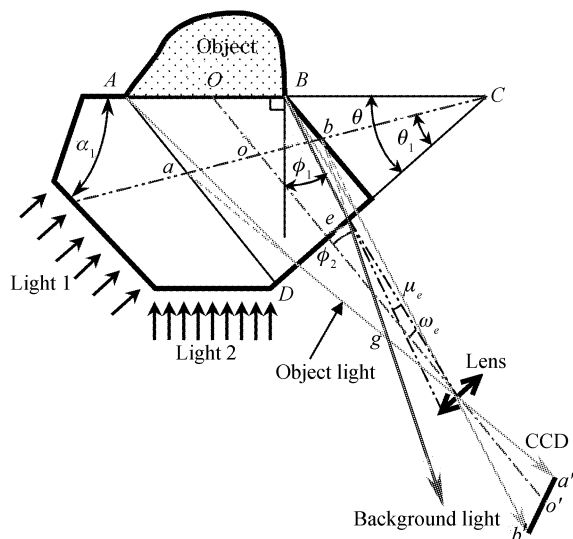


Fig. 1 The principle of a new slicing method based on the principle of the refraction and reflection

当物体本身的反射率较低(根据经验 $<30\%$),即趋向于黑体时,采用图中的光源 1 作为照明光源,又称倾斜照明^[6]。此时光源 1 照射在采集面 AB 区域中的物体截面时,由于物体的反射率较低,故大部分光线被吸收;而采集面与物体不接触的部分由于全反射的作用,光线被全部反射到 CCD 像机内的像面上。为了保证非接触区域的全反射,光源 1 的入射面应为光面,且根据全反射定理应使左侧棱镜顶角

$$\alpha_1 > \arcsin(1/n). \quad (1)$$

这样就形成了反差很大的(截面为黑色,背景为白色)轮廓图像,衬比度与物体的反射率大体相等。

反之,当物体的反射率较高($>30\%$)时,采用光

源 2 作为照明光源,称垂直照明。当光线照射在采集面 AB 区域中的物体截面时,由于物体截面存在着肉眼无法看到的微观不平度而发生漫反射,其中一部分光线进入镜头而形成截面及轮廓的图像;而采集面与物体不接触的部分被光源 2 照射后光线会从 AC 面进入空气,空气中的光线不会进入 CCD 镜头,原因分析如下:

在 AC 面上侧空气中的光线中,哪条光线满足全反射临界状态而可能进入 CCD 镜头? 根据光的可逆性原理,显然沿 AB 运行的光线处于全反射临界状态而可能进入 CCD 镜头,其轨迹为 ABeg。图中 ϕ_1 是全反射时的临界角。根据全反射原理有

$$\phi_1 = \arcsin(1/n), \quad (2)$$

n 为玻璃折射率, eg 与光轴的夹角为 ϕ_2 , 棱镜顶角为 θ , 进一步可推出

$$\phi_2 = \arcsin[n \cdot \sin(\theta - \phi_1)], \quad (3)$$

设采集面上最高点 B 处对应于镜头的视场半角和孔径半角分别为 ω_e 和 u_e , 当

$$\phi_2 > \omega_e + u_e \quad (4)$$

时, AC 上侧空气中的光线就不可能进入 CCD 镜头内的像面上,从而形成了衬比度很高的图像,理论上衬比度为 ∞ , 实际由于杂光的作用会降低很多。

光源 2 的入射面既可以是光面也可以是毛面, 实践证实二者唯一的区别是, 采用毛面可使照明更均匀。

2.2 分析

1. 2.1 影响衬比度的因素

这里定义的衬比度是指物体截面与非截面区域的图像亮度比的对数, 如下式所示。

$$c = \lg(s/b). \quad (5)$$

以下的分析对两种照明方式均适用。

1) 采用倾斜照明的衬比度 $c < 0$ (暗目标亮背景), 且接近于物体的反射率的对数(由于杂光的影响而有所降低); 采用垂直照明的衬比度 $c > 0$ (亮目标暗背景), 实测的结果说明此法优于倾斜照明, 只有当物体接近于黑体时倾斜照明才显出优势。

2) 玻璃的折射率 n 越大, ϕ_2 也越大, 说明增加折射率, 有利于提高图像反差。

3) 增加棱镜顶角 θ , 也可提高衬比度。从(2)式可知 θ 必须大于临界角 ϕ_1 才有可能获得高衬比度图像。当 $\theta \geq 2\phi_1$ 时, $\phi_2 \geq 90^\circ$, 这时光线已不可能从棱镜的 eD 面上出射, 自然不可能进入镜头。但 θ 太大会引入过大的几何变形, 导致局部的分辨率急剧下降。

4) 使镜头适当远离棱镜时, ω_e 和 u_e 均减小, 有利于提高衬比度。

2.2.2 等效物面

虽然实际的物面在 AB 处, 但对镜头来说, 由于棱镜的折射作用, 仿佛物面在 ab 面上, 该面称作等效物面, 它与出射面 eD 的夹角为 θ_1 , 称作等效棱镜角. AB 称作实际物高, ab 称作等效物高。

分别在采集面和等效物面上建立两个坐标系 (X, Y) 和 (x, y) , 坐标原点在 CCD 镜头的光轴 Oo 上, X 和 x 方向垂直于纸面, 令 $Y = OA, y = oa$, 根据图 1 中的几何关系, 容易推出

$$\theta_1 = \arctan[(1/n)\tan\theta], \quad (6)$$

$$y = (\cos\theta/\cos\theta_1) \cdot Y, \quad x = X, \quad (7)$$

从上述二式可知, 折射率越大, θ_1 越小, 更有利于等效物面与光轴趋于垂直, 从而减小成像的几何变形; θ, n 越大, 等效物面高缩小的程度越大, 但在宽度方向上(垂直于纸面)并没有缩小, 即等效物宽与实际物宽相等. 于是得到的图像会变矮, 并且等效物面上各处离镜头的距离不同, 因而放大率也不同, 会使图像发生较大的几何变形. 因此必须通过后续的光学系统或软件予以校正, 本文仅讨论几何变形的软件校正。

3 折反射轮廓变换的数学模型

如图 2 所示, 若等效物面上有一正方形网格图案, 像面上就形成了梯形网格图像, 这就是几何变形. 几何变形与镜头的光学畸变无关, 而是由于等效物面的非垂直轴状态造成的。

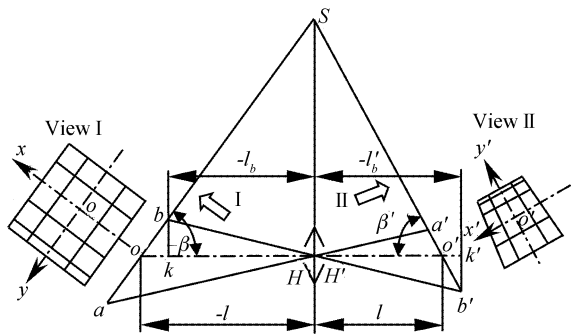


Fig. 2 The mathematical model of the geometrical distortion

3.1 几何变形的物像关系

在等效物面和像面分别建立各自的坐标系, 坐标原点分别是光轴与等效物面和像面的交点 o, o' , 如图 2 所示. 等效物面及像面与光轴的夹角分别为 $-\beta$ 和 β' , 物距和像距分别为 $-l$ 和 l' , 透镜主点(面)为 H 和

H' , 焦距为 f' 。

现在来考察采集面上一点 $B(X, Y)$ 与等效物面上对应点 $b(x, y)$ 及像面上的共轭点 $b'(x', y')$ 三者的坐标变换关系。

根据几何光学成像规律可列出

$$\begin{cases} \frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}, \\ \frac{1}{l'_b} - \frac{1}{l_b} = \frac{1}{f'}, \\ l'_b = l' + (-y' \cos\beta'), \\ -l_b = -l - [-y \cos(-\beta)], \end{cases}$$

推出

$$l \cdot \tan\beta = l' \cdot \tan\beta'. \quad (8)$$

这就是几何变形的物像关系: 主面 HH' 、等效物面和像面共线。

3.2 物像坐标变换

在图 2 中, 根据 $\triangle bkH \sim \triangle b'k'H'$ 可列出

$$\frac{x'}{x} = \frac{l' + (-y' \cos\beta')}{-l - [-y \cos(-\beta)]},$$

$$\frac{-y \sin(-\beta)}{-l - [-y \cos(-\beta)]} = \frac{-y' \sin\beta'}{l' + (-y' \cos\beta')},$$

推出

$$\begin{cases} x' = \frac{l' \sin\beta'}{l \sin\beta - y \sin(\beta' - \beta)} \cdot x, \\ y' = \frac{l' \sin\beta}{l \sin\beta - y \sin(\beta' - \beta)} \cdot y, \end{cases} \quad (9)$$

进一步反推出

$$\begin{cases} x = \frac{l \sin\beta}{l' \sin\beta + y' \sin(\beta' - \beta)} \cdot x', \\ y = \frac{l \sin\beta'}{l' \sin\beta + y' \sin(\beta' - \beta)} \cdot y', \end{cases} \quad (10)$$

(9)式、(10)式就是等效面与像面坐标变换式. 根据(7)式、(9)式和(10)式推出采集面与像面的变换关系式

$$\begin{cases} x' = \frac{l' \sin\beta'}{l \sin\beta + y \sin(\beta' - \beta)} \cdot X, \\ y' = \frac{l' \sin\beta}{l \sin\beta + y \sin(\beta' - \beta)} \cdot \frac{\cos\theta}{\cos\theta_1} \cdot Y, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} X = \frac{l \sin\beta}{l' \sin\beta + y' \sin(\beta' - \beta)} \cdot x', \\ Y = \frac{l \sin\beta'}{l' \sin\beta + y' \sin(\beta' - \beta)} \cdot \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta} \cdot y', \end{cases} \quad (12)$$

令

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \mathbf{b}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \mathbf{b} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{\cos\theta}{\cos\theta_1} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} l' \sin \beta' / [l \sin \beta' + y \sin(\beta' - \beta)] & 0 \\ 0 & l' \sin \beta' / [l \sin \beta' + y \sin(\beta' - \beta)] \end{bmatrix},$$

(11)式转化为

$$\mathbf{b}' = \mathbf{T} \times \mathbf{S} \times \mathbf{B}, \quad (13)$$

(12)式转化为

$$\mathbf{B} = \mathbf{S}^{-1} \times \mathbf{T}^{-1} \times \mathbf{b}', \quad (14)$$

(13)式、(14)两式是采集面与像面之间的坐标变换的矩阵形式。其中 \mathbf{S} 是采集面向等效面变换的矩阵; \mathbf{T} 是等效面向像面变换的矩阵。

将(9)式中的两式相除得

$$\frac{y'}{x'} = \frac{\sin \beta}{\sin \beta'} \cdot \frac{y}{x}, \quad (15)$$

(15)式从另一个方面证明了直线的像仍为直线,据此可使图像校正的算法简化。

4 应 用

4.1 图像提取与处理

图3显示的是一人体颌关节的某一截面的两幅图片,分别按传统的层去法和新的基于折反射原理的层去法摄取。所用的摄取仪的主要参量如下:摄取窗面积 100 mm×100 mm,图像卡像素 512×512,采用面阵 CCD 摄像头。据此可推知摄取分辨率为 130 dpi,或 0.2 mmpd。

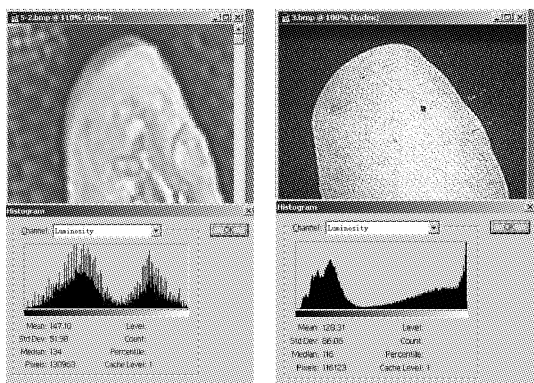


Fig. 3 The comparison between the picture from traditional slicing and that from the new slicing

对图3即使通过直接观察也能看出右侧图片的衬比度较左侧图片的衬比度高。左侧图片的直方图显示出其衬比度仅能达到 0.2,即 $s/c=2$ 。右侧图片的直方图显示出其衬比度可达到 0.7~0.9,即 $s/c=5\sim 8$ 。

对几何变形的矫正计算并不是从灰度图像开始的,这样计算量太大;实际对几何变形的矫正计算是在将灰度图像提取轮廓后,并且将轮廓图像矢量化

后进行的。图4是根据折反射原理摄取的标准模块截面(长方形)未经校正的截面图案(梯形)及其轮廓和校正后的轮廓(长方形)。由此可见,根据棱镜的折反射原理摄取物体横截面图案的方法是可靠的;采用基于上述算法的软件校正是正确的。

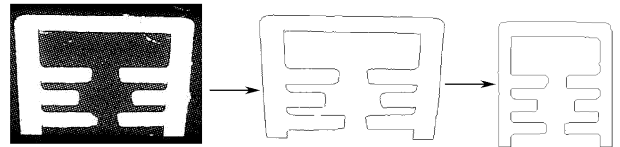


Fig. 4 A picture taken by new method of slicing and its correction

4.2 根据分层数据制作快速成型模型

颌关节剖面轮廓校正之后,轮廓数据被进一步转化为快速成型工艺控制文件,然后在激光成型系统上制作快速成型(RP)模型,从而与原始颌关节的形状进行比较。

图5所示为校正后的颌关节云点及光固化模型,该模型可用来进一步翻制关节替代物。该模型精度达 $\pm 0.1\sim\pm 0.2$ mm,比根据核磁共振图像制作的模型(± 0.5 mm~ ± 1.0 mm)高得多^[7,8],根据传统的层切法制作的模型精度为 $\pm 0.1\sim\pm 0.18$ mm。

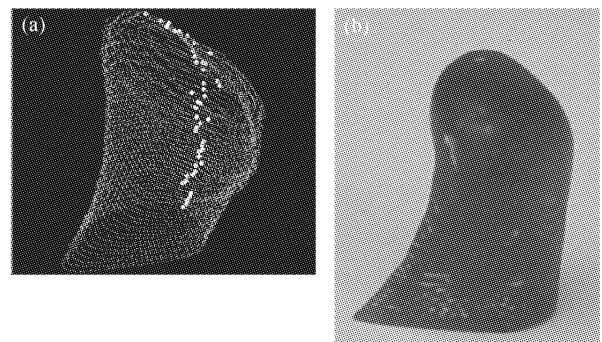


Fig. 5 The cloud data and the RP model of the joint

5 对高衬比层去法的进一步探讨

5.1 高衬比层去法的优劣分析

本文所提出的高衬比度层去法带来的优势是明显的,主要表现为:

1) 图像的衬比度高。虽然提高图像衬比度的方法很多(包括通过软件处理提高图像衬比度),但通过软件处理提高衬比度,并不能提高图像信息的可靠性,对二值化处理没有帮助。本文所述方法,由于采用垂直照明,能大大抑制外界杂光,对环境光的

要求极低,旨在提高原始图像的衬比度,这为后继图像处理(特别是二值化),奠定了有利的条件,保证了图像信息的可靠性,从而也提高了图像的清晰度。

2) 物体截面轮廓清晰稳定。这在图 3 中表现得非常明显。传统的层去法常因为物体与环氧树脂边界模糊造成轮廓不准确,提取轮廓对二值化处理时阈值的选选择较敏感,常由于阈值的波动造成轮廓的误差。

3) 无需灌注填充材料。传统的层去法为了拍摄清晰的轮廓,需要填充与被拍摄物体反差较大的树脂,操作较麻烦。高衬比度层切法在中小零件和模型的反求中极为便利,对大型零件只要夹持方便也是可用的,只有对那些有倒悬部位的零件须灌注树脂起加固作用。

存在的主要缺陷如下:

1) 存在几何变形,校正算法较复杂。这是为了提高衬比度,引入棱镜造成的,但只要按本文所述算法进行计算,并在实测时进行标定,变形是完全可以被校正的。除了软件校正以外,还可以通过光学系统进行校正,如通过反向棱镜或反向光学系统也可以进行校正,但比较便捷的方法还是通过软件加以校正。

2) 棱镜易被划伤。在实际应用中发现,提取刚性物体的截面轮廓时,应特别注意截面的平整与光滑,否则,不仅不能保证截面与棱镜采集面的充分接触,严重时还会造成采集面的划伤与磨损。为了达到保护采集面和使物体截面与采集面充分接触的目的,实际使用中,在采集面上可粘附一层柔性透明薄层物质,厚度可达 0.05~0.2 mm 不等(如塑料薄膜);或在物体截面上涂上一层薄油脂,均能达到充分接触的效果。弹性物体(如橡胶)一般均能很好地与采集面接触,无需采取以上辅助措施。

为了使刚性物体与采集面充分接触和保护采集面,还可从根本上解决问题,即用具有较高折射率、透光性好及低散射的液体来代替固体玻璃。不过,同时具有以上性能的液体并不多;液体容易被污染,导致折射率、透过率等光学性能发生改变;液体还容易蒸发,液面易晃动,使采集面不稳定;物体与液面接触时,由于液面表面张力的作用使物体轮廓图像有所扩张^[9]。在实际应用中必须采取相应预防措施。

结论 本论文所提出的高衬比度层去法,目前尚在完善之中,但已在小型零件和模型的反求中获得了

应用,并表现出了独特的优势。随着该项技术的进一步完善(如液体棱镜的研究),将进一步将其拓展到大型零件和模型的反求中,使其发挥更大的作用。

运用折反射原理于层去反求技术,最大的优势在于它能获得高衬比度的截面图案,这是进行后续图像处理和变换运算的基本条件。对具有不同光吸收特性的物体采取不同的照明方式:对反射率高的物体采用垂直照明,得到亮目标暗背景图像,此法适用于大多数场合;对反射率较低的物体采用倾斜照明,得到暗目标亮背景图像。

基于折反射原理的层去反求方法会引入几何变形,对几何变形既可以通过光学方法校正也可以通过软件方法校正。不管用何种方法,都需知道折反射引起的几何变形的数学模型。

参 考 文 献

- 1 Lee Heeseok, Yoo Cheonsoo. A form driven object-oriented reverse engineering methodology. *Information Systems*, 2001, **40**(2~3): 151~169
- 2 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Analysis of two errors in grating projection profilometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(3): 376~379 (in Chinese)
- 3 Zhang Guoxiong, Lin Yongbing, Li Xinghua *et al.*. Four beam laser tracking interferometer system for three dimensional coordinate measurement. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(9): 1030~1036 (in Chinese)
- 4 Zhao Hong, Song Yuanhe, Li Genqian *et al.*. A novel 360° 3D profilometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(4): 497~500 (in Chinese)
- 5 Qiao Zhiling, Wu Yonghui. *The realization and application of the reverse engineering system based on slicing images, RP and RT Technology* (层去图像法反求工程的实现与应用.RP技术与快速模具制造). Xi'an: The Publishing Company of Science and Technology, 1998. 428~430 (in Chinese)
- 6 Fielding K H. Optical fingerprint identification by binary joint transform correlation. *Opt. Engng.*, 1991, **30**(12): 1958~1961
- 7 Masters T E, Christensen A M, Perez R R. Effects of computerized axial tomography: Technical factors and scanning techniques on the accuracy of anatomical biomodels. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 2000, **28**(3,4): 349~354
- 8 Barker T M, Earwaker W J S L. Accuracy of sterolithographic models of human anatomy. *Australasian Radiol*, 1994, **38**: 106
- 9 Jon Christensen. Reverse engineering of clear solids using refractive index matching. *Rapid Prototyping J.*, 2000, **6**(2): 87~98