

文章编号: 0253-2239(2003)08-1008-5

彩色三维激光扫描测量方法的研究*

许智钦 孙长库 陶 立 郑义忠

(天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 提出了彩色三维激光扫描测量方法,即在单色三维激光扫描测量数据上贴合彩色的数字图像。给出了单色三维测量模型——三维光平面方程测量模型,提出了全新的测量系统参量的快速标定方法,并制作了标定靶标。给出了物体三维数据和颜色信息的贴图技术。利用所研制的装置对招财猫模型进行了实验测量,得到了满意的结果。

关键词: 光学测量; 彩色三维测量; 光平面方程; 激光扫描; 参量标定

中图分类号: O438 文献标识码: A

1 引 言

目前,逆向工程一般采用接触式三坐标探针扫描和非接触式结构光扫描^[1,2]。这些扫描方法只能获取物体的单色三维信息,不易寻找物体的特征点、线、面,而这些特征点、线、面在三维逆向工程中起着关键的作用^[3,4]。基于单色三维测量的研究成果^[5,6],本文提出一种彩色三维激光扫描测量方法,即在单色三维激光扫描测量研究的基础上,加上彩色的数字图像,导出新的彩色三维测量模型——光平面方程式模型,制作了标定靶标。三维彩色扫描系统不仅能提供物体上各被测量点的三维坐标信息,同时还提供了各点的颜色信息,在产品的设计、多媒体、娱乐业、动画业、医学以及古文物的数字化等方面,具有广阔的应用前景。

2 彩色三维激光扫描测量原理

在单色三维测量基础上,运用彩色信息摄取、彩色贴图以及坐标计算等技术,实现了彩色三维激光扫描测量。测量系统主要由线结构激光光源、彩色 CCD 摄像机、马达控制可旋转的滤光镜、控制电路板和计算机组成,如图 1 所示。系统在测量过程中分两步对被测物体摄像。首先,关闭激光光源,打开滤光镜,用彩色 CCD 摄像机拍摄一幅被测物体的彩色照片,这样便记录下了物体的颜色信息,用于后续处理。然后,关闭滤光镜,这时 CCD 摄像机所摄取的是单色信

息。打开激光光源,光平面和被测物体表面相交形成一条起伏变化的亮线。这条亮线成像在 CCD 摄像机的敏感面上,经光电转换变成电信号后,由图像采集器采集并送入计算机。由激光光平面方程原理测量出这条亮线上各点的三维数据。由步进电机带动线结构激光光源做步进转动,使光平面在物体表面上扫描,从而实现整个被测表面的三维测量。采用贴图技术将所摄取的物体的颜色信息匹配到各个被测点的三维数据上,这样就得到物体的彩色三维信息。将物体各个曲面都测量完后,采用曲面拼接技术,便可得到整个被测物体的彩色三维信息。

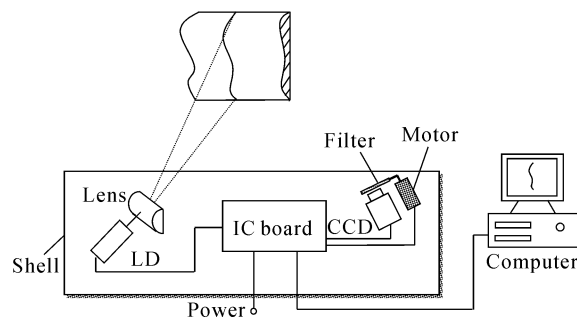


Fig. 1 The principle of color 3-dimensional laser scanning measurement system

3 光平面方程三维测量模型

光平面方程三维测量模型用于建立计算机屏幕二维坐标和空间被测点三维坐标之间的转换关系,由摄像机透视变换模型和光平面方程测量模型两部分组成。

3.1 摄像机透视变换模型

摄像机的透视成像通常可以近似地看作是一个

* 天津市科技攻关培育项目资助课题。

E-mail: sunck@tju.edu.cn

收稿日期: 2002-03-13; 收到修改稿日期: 2002-08-28

针孔成像,图 2 是摄像机透视变换示意图。

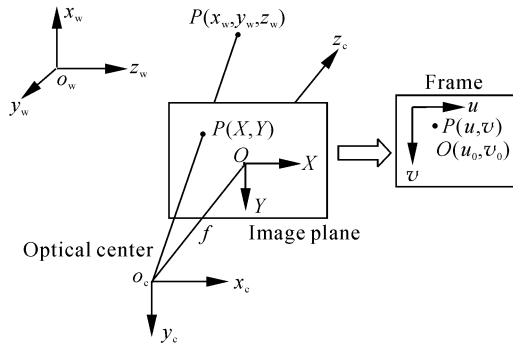


Fig. 2 Sketch of CCD camera model

图中 o_c 点为成像透视中心, o_c-Z_c 为摄像机成像透镜的光轴, 它与摄像机的像平面 (CCD 的感光面) 垂直, O 为光轴与像平面的交点, 它是像平面的光学中心, 但不一定是摄像机 CCD 的几何中心, 因为 CCD 数组可能未对中。 O 和 o_c 间的距离 f 为摄像机的有效焦距。过 O 点作像平面坐标系 $O-XY$, 其 X 轴沿像素横向方向, Y 轴垂直于 X 轴, 使 $O-XY$ 成右手直角坐标系。过 o_c 点作摄像机坐标系 $o_c-x_c y_c z_c$, 使 x_c 轴和 y_c 轴分别平行于 X 轴和 Y 轴。空间一点 $P(x_w, y_w, z_w)$ 在像面上的成像点为 $P(X, Y)$ 。光学中心 O 点在计算机屏幕坐标系下的二维坐标为 $O(u_0, v_0)$ 。像点 $P(X, Y)$ 在计算机屏幕坐标系下的坐标为 $P(u, v)$, 即在帧存体中对应的像素位置。物空间的三维坐标 (x_w, y_w, z_w) 和计算机屏幕的二维坐标 (u, v) 的透视变换模型为^[7]

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}$$

式中 $\lambda \neq 0$, 为比例因子; $m_{11}, m_{12}, \dots, m_{34}$ 为测量系统参量。

(1) 式是摄像机透视变换模型, 它建立了计算机屏幕二维坐标和空间被测点三维坐标的转换关系, 有 12 个参量: $m_{11}, m_{12}, \dots, m_{34}$, 这些参量需要用摄像机标定求出。

3.2 光平面方程测量模型

在测量时, 步进电机带动线结构激光光源转动, 光平面在空间做扫描运动, 在空间便有多多个光平面, 每个光平面间隔角度为 ϕ , 如图 3 所示。若第 k 个光

平面在物空间坐标系中的平面方程为

$$a_k x_w + b_k y_w + c_k z_w + d_k = 0, \quad (2)$$

联立方程(1)和方程(2), 便可建立计算机屏幕坐标 (u, v) 和每个光平面上被测点在测量坐标系下的三维坐标 (x_w, y_w, z_w) 之间的关系^[8]:

$$\begin{bmatrix} um_{31} - m_{11} & um_{32} - m_{12} & um_{33} - m_{13} \\ vm_{31} - m_{21} & vm_{32} - m_{22} & vm_{33} - m_{23} \\ a_k & b_k & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14} - um_{34} \\ m_{24} - vm_{34} \\ -d_k \end{bmatrix}, \quad (3)$$

(3) 式是光平面方程测量模型。每个光平面参量 $a_k, b_k, c_k, d_k, k = 1, 2, \dots, n$ 需由光平面方程式标定求出。

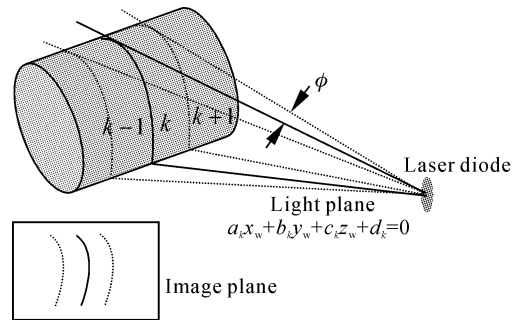


Fig. 3 Light plane equation measurement model

4 测量系统参量标定方法

测量系统参量有摄像机参量和光平面参量两种, 它们分别由摄像机标定和光平面方程标定求出。

4.1 摄像机参量标定

由公式(1)可知, $m_{11}, m_{12}, \dots, m_{34}$ 是要标定的参量, 若已知空间若干个点的三维坐标 $(x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}, i = 1, 2, \dots, n)$, 由式(1)便可求解出这些参量。为确定这 n 个点的空间三维坐标, 选用如图 4 所示的靶标。靶标由两个互相垂直的面组成, 每个面上加工出若干个间距一定的圆孔, 圆孔直径和间距要求有较高的精度 ($\pm 5 \mu\text{m}$), 各个圆孔中心便给出了空间若干个点的三维坐标。将(2)式改写成

$$\left. \begin{aligned} \lambda u_i &= m_{11} x_{wi} + m_{12} y_{wi} + m_{13} z_{wi} + m_{14} \\ \lambda v_i &= m_{21} x_{wi} + m_{22} y_{wi} + m_{23} z_{wi} + m_{24} \\ \lambda &= m_{31} x_{wi} + m_{32} y_{wi} + m_{33} z_{wi} + m_{34} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

式中 (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}) 是空间第 i 个圆孔中心在空间测量坐标系中的坐标; (u_i, v_i) 为第 i 个圆孔中心点对

应的计算机屏幕坐标。如果有 n 个圆孔,可建立 $2n$ 个方程,用最小二乘法求解出摄像机参量。

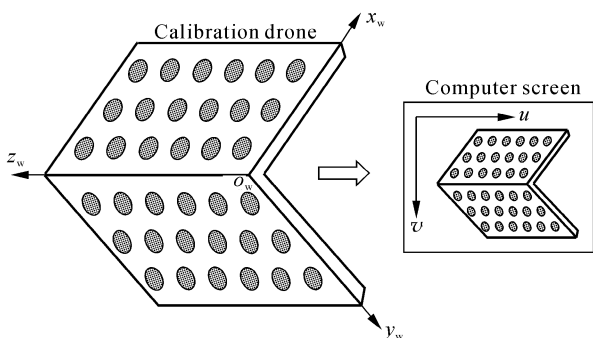


Fig. 4 The principle of CCD camera calibration

4.2 光平面方程参量标定

光平面方程参量 $a_k, b_k, c_k, d_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 的标定原理如图 5 所示,将线结构激光投射到立体标定块上,利用图像处理技术求出位于两标定平面的激光线交点在计算机屏幕上的坐标 (u_i, v_i) 。确定出沿交点两侧各点的屏幕坐标 (u_i, v_i) , 交点一侧的点对应的物空间坐标为 $(x_{wi}, 0, z_{wi})$, 交点另一侧对应的物空间的坐标为 $(0, y_{wi}, z_{wi})$ 。将这些点的计算机屏幕坐标和物空间坐标代入(1)式,由最小二乘法求解出各个点在物空间测量坐标系下的坐标。这样各个点的计算机屏幕坐标和物空间坐标都已知,再将这些坐标值代入光平面方程式测量模型(4)式中,便可求解出光平面参量 $a_k, b_k, c_k, d_k, k = 1, 2, \dots, n$ 。

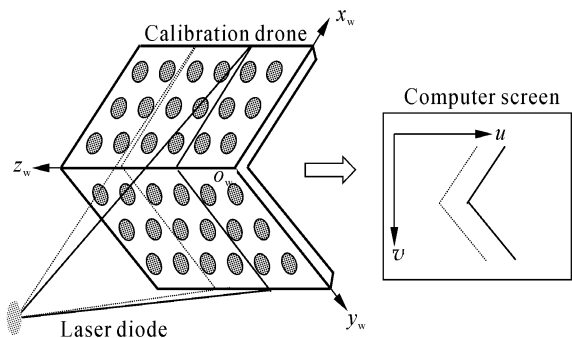


Fig. 5 The principle of laser plane calibration

5 彩色三维贴图技术

下面将扫描系统所测得的单色三维数据与所摄取的颜色信息做贴图。彩色三维贴图技术是指将摄取的颜色信息帖合在三维扫描测量数据上。所以,在设计三维扫描系统时,为了取得物体的彩色贴图信息,选取彩色的 CCD 摄像机,但在激光扫描测量时,镜头前放一个滤光镜,如图 1 所示。系统只获取

激光扫描线投射在物体表面的单色几何信息,利用光平面方程式三维测量模型,可得到物体在空间测量坐标系下的三维坐标 (x, y, z) 。无滤光镜时,彩色 CCD 摄像机摄取二维彩色图像的 (u, v) 坐标。然后利用二维彩色图像的坐标和三维坐标的投影对应关系,用贴图技术将彩色照片上的颜色信息和三维几何信息整合到一起。二维颜色信息和三维坐标的投影对应关系列于表 1。二维彩色图像的坐标与三维几何坐标如图 6 所示。

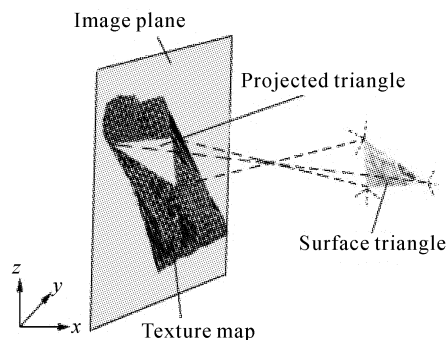


Fig. 6 The principle of merging image

Table 1 Correspondence relation between 2-D color information and 3-D coordinate projects

No.	2-dimension color information	3-dimension coordinate
1	$(u_1, v_1) + \text{RGB}_1$	(x_1, y_1, z_1)
2	$(u_2, v_2) + \text{RGB}_2$	(x_2, y_2, z_2)
3	$(u_3, v_3) + \text{RGB}_3$	(x_3, y_3, z_3)
⋮	⋮	⋮
n	$(u_n, v_n) + \text{RGB}_n$	(x_n, y_n, z_n)

6 实验及结果

非接触式激光扫描三维测量系统的基本结构如图 7 所示,系统主要由一支线结构光的半导体激光光源和一台彩色 CCD 摄像机构成,光源架在旋转盘上。首先要确认各组件的相对位置,设转盘中心到

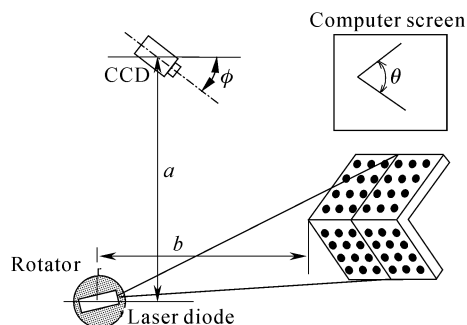


Fig. 7 The structure of the measurement system

摄像机中心的距离为 a , 转盘中心到被测物的距离为 b , 摄像机光轴与垂直线的夹角为 ϕ 。下面通过实验来优化设计系统的结构参量 a 、 b 、 ϕ , 使系统达到最佳的工作状态。

在测量系统前摆放一个两面互相垂直的被测物体, 线结构激光垂直投射在被测物体的两个正交平面上, 由 CCD 摄像机采集图像并送到计算机屏幕上显示, 显示的激光线条图像如图 7 所示。图像上的两条线有一固定夹角, 令其为 θ 。调整参量 a 、 b 、 ϕ 的值, 实验测得不同的 θ 值, 它们列于表 2。

Table 2 Every group parameter value and its correspondence θ

Parameter value			Intersection angle
a /mm	b /mm	ϕ ($^{\circ}$)	θ ($^{\circ}$)
120	70	12	186
185	70	15	177
205	85	18	167
270	125	23	156
330	30	28	146
390	35	30	137
410	81	32	127
500	70	40	117
660	70	58	104

由表 2 可知, 当 $a=120$ mm, $b=70$ mm, $\phi=12^{\circ}$ 时, CCD 摄像机的光轴几乎和被测物垂直, 所以空间中两垂直的激光光线在 CCD 摄像机上所形成夹角为 186° , 两直线近似为一条直线。当 $a=500$ mm, $b=70$ mm, $\phi=40^{\circ}$ 时, 空间中两垂直激光光线在 CCD 上形成 117° 夹角的两直线。依此类推, 用表 1 中的各组结构参量来做实验, 根据实验结果来决定何种参量的结构具有最高的测量精度。

用一平面度较高的平面物体作为被测物体, 并设定起始所在的位置为 0, 然后将面移动一定距离 d , 如图 8 所示。每移动一次用实验系统测量一次平面的位置数据, 并将测量结果记录下来, 用于分析测量误差值。

利用所测量到的数据, 计算不同位置的回归平面, 并求出它与 0 位置平面的距离, 利用所计算出的数据与已知数据比较, 可得到系统的测量误差。图 9 是在不同 θ 角时, 被测平面移动距离 d 和测量误差 δ 的关系曲线。由图中可看出, 当 $\theta=117^{\circ}$ 时测量误差 δ 最小(小于 0.1 mm)。对照表 2, 系统结构的最佳参量确定为: $a=500$ mm, $b=70$ mm, $\phi=40^{\circ}$ 。

根据上述彩色三维激光扫描测量原理, 研制了实验装置, 并对招财猫模型进行了测量。图 10 是根

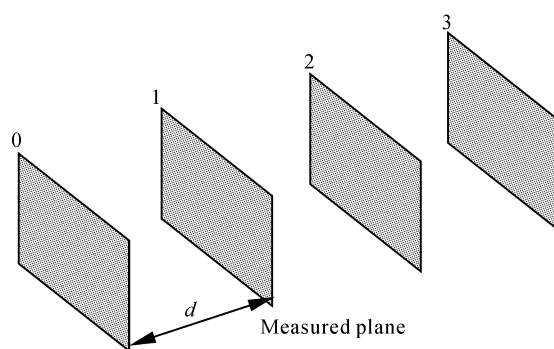


Fig. 8 The measured planes

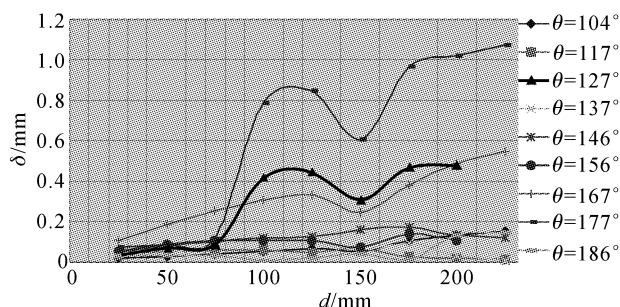


Fig. 9 The curves of measurement error

据测量结果建立的被测物体的网格模型和完整的彩色三维模型。

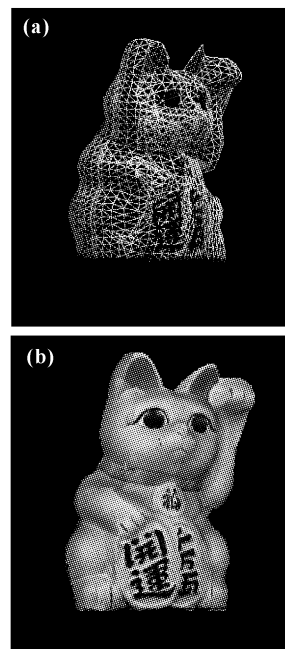


Fig. 10 (a) 3-D grid image and (b) rounded image

结束语 本文在单色三维激光扫描测量的基础上, 利用彩色贴图技术, 可得到被测物体完整的三维彩色数字模型。给出了测量系统参量的快速标定方法——光平面方程标定法, 制作了标定靶标。彩色

三维激光扫描测量技术可广泛应用于产品设计、多媒体、娱乐业、动画业、医学以及古文物的数字化等方面,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Bidanda B, Motavalli S, Harding K. Reverse engineering: an evaluation of prospective non-contact technologies and applications in manufacturing systems. *Computer Integrated Manufacturing*, 1991, **4**(3):145~156
- 2 Commean P K, Smith K E. Geometric design of a multi sensor structured light range digitizer. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(6):1349~1358
- 3 Hausler G, Ritter D. Parallel three-dimensional sensing by color-coded triangulation. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(35): 7164~7169
- 4 Liu Weiyi, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang *et al.*. Three-dimensional surface profilometry using color-coded projection grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(6):687~690 (in Chinese)
- 5 Fan K C. A non-contact automatic measurement for free-form surface profile. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1997, **10**(4):277~285
- 6 Tai Wen-Chih, Chang Ming. Non-contact profilometric measurement of large-form parts. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(9):2730~2735
- 7 Sun Changku, You Qiang. Online machine vision method for measuring the diameter and straightness of seamless steel pipes. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(11):2565~2571
- 8 Sun Changku, Ye Shenghua. *Laser Measuring Technology* (激光测量技术). Tianjin: Tianjin University Publishing Inc., 2001 (in Chinese)

Study on Color Three-Dimensional Laser Scanning Measuring Method

Xu Zhiqin Sun Changku Tao Li Zheng Yizhong

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 13 March 2002; revised 28 August 2002)

Abstract: A method of color three-dimensional laser scanning measurement based on the monochrome three-dimensional measurement and color digital image is presented. A three-dimensional light plane equation measurement model is derived. A novel calibration method to determine the system parameters is proposed, as well as a calibration jig is designed and produced. An auto-merging technique on color information and the three-dimensional measured data is brought out. The satisfying result is obtained by the experimental measurement on a doll cat model with the system.

Key words: optical measurement; color three-dimensional measurement; light plane equation; laser scanning; parameters calibration