

光栅投影式3维照相系统中光栅投影仪的标定

王平江 杨海民 金键

(华中科技大学国家数控系统工程技术研究中心, 武汉 430074)

摘要 提出了一种光栅投影式立体照相系统中光栅投影平面的标定方法。将光栅投影到已知目标平面,通过数字摄影得到光栅平面与目标平面相交的光栅图像。根据光栅图像记录的信息,在每条交线上提取两点,作为对应光栅平面拟合用的两点。按一定规律移动目标平面,即可得到每个光栅平面上若干对点。利用最小二乘法分别拟合出每个光栅平面的空间平面方程。

关键词 3维照相 光栅投影 最小二乘法 光栅平面标定 反求工程

中图分类号: TH741.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2007)02-0294-08

Calibration of Projector in 3D Photography Systems Using Grating Projection

WANG Ping-jiang, YANG Hai-min, JIN Jian

(National Numerical Control System Engineering Research Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract In this paper, a method is proposed for projector calibration in 3D photography systems using grating projection. An image with intersection lines between grating planes and a known objective plane can be captured by a digital camera. According to the image a pair of points can be extracted from each of intersection lines. If we move the known objective plane to known positions, we can get more pairs of points belonging to the same plane. At the last, every grating plane equation can be approached with Least Square Fit Algorithm based all corresponding sample 3D points on it.

Keywords 3D photograph, grating projection, least-squares fit, projector calibration, reverse engineering

1 引言

在生活水平日新月异的今天,传统的2维照相技术已经不能满足人们追求真实重现3维世界的梦想。为此,3维立体照相技术应运而生,并逐渐受到人们的青睐。

3维照相原理多种多样^[1,2],但很多离实用还有一段距离。目前3维照相主要以2维数码相机为主体,辅助以一定形式的结构光投影到被测物体上^[3,4],按照三角形测量方法计算出被测物体表面3维点群;再用3维造型软件对点群数据进行处理,形成逼真的立体点云图像^[5]。将3维点云数据输出到

激光内雕刻机,即可在水晶玻璃内雕刻出栩栩如生的3维图像。本文工作的背景即为水晶内雕刻提供人物肖像3维点群数据。

人物肖像3维照相技术可简单地分为双相机式与单相机式。前者结构复杂,硬件成本高,尤其是考虑两个相机图像之间的匹配问题,实现起来非常困难。对于后者,因为只采用一台相机,大大简化了系统的结构,降低了成本,同时避免了两图像之间的匹配问题,相对来说比较容易实现。单相机式的3维测量必须辅之以结构光才能实现。然而结构光参数的标定,一直是实现单相机式3维测量的难题,有关标定方法甚少见于文献。为此,首先简略介绍了光栅投影式3维测量原理,然后详细介绍了光栅空

收稿日期:2005-06-17; 改回日期:2005-12-20

第一作者简介:王平江(1963~),男,副教授,博士。1998年于华中科技大学电子学与通讯博士后工作站出站。主要从事机器视觉、数控技术、红外图像处理等方面的研究工作。E-mail: pj_wang@hust.edu.cn

间平面方程的标定方法。

2 光栅投影式 3 维照相系统简介

2.1 光切法 3 维测量的原理^[6,7]

如图 1 所示,光切法(light sectioning method)的基本原理。测量时将平面光投射到被测物体表面,形成一条明亮的空间曲线;CCD 数码相机以一定的角度摄取包含该空间曲线的图像,由此计算得到被测物体的一条外形轮廓 3 维信息。要得到整个表面上的 3 维数据,必须使光切面按一定间隔扫描物体表面;将这些 2 维截面轮廓组合,才能得到被测物体表面的 3 维轮廓信息。

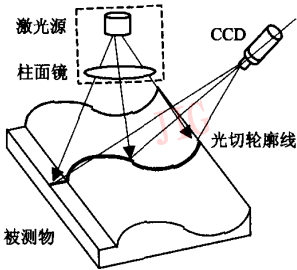


图 1 光切法测量原理示意图

Fig. 1 The principle for the Light Sectioning Method

2.2 光栅投影式 3 维照相系统的原理

如图 1 所示的光切法,是目前最成熟且应用最广泛的 3 维测量方法。但是,若使用激光对人物肖像进行 3 维测量,有两个无法克服的困难,一是光损害问题,因为激光对人眼可造成严重伤害;二是测量时间问题,扫描时间过长(最短需要一分钟左右),在整个测量过程中人不可能凝固在那里等待扫描测量过程的结束,致使得到的 3 维数据有很大的对准误差。

为解决上述问题,根据单平面光切法 3 维测量的基本原理,将光栅投影仪和数码相机组合在一起,构成光栅投影式立体照相系统。投影仪投射出来的每条亮光栅,沿着投影方向构成光切面;这些光切面与被测表面截交,形成经被测表面调谐、携带有被测表面 3 维信息的空间曲线族。对每条空间曲线都采用单光平面的光切法,即可计算得到每条空间曲线上点的 3 维坐标。

如图 2 所示为光栅投影式 3 维照相系统的测量原理图,光栅投影仪产生一组平面结构光,用高解像

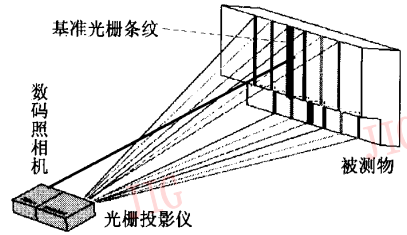


图 2 光栅投影式 3 维照相系统测量原理

Fig. 2 Measuring principle for 3D photography systems using grating projection

度(500 万 ~ 800 万像素)数码相机拍摄光栅截交线。投影仪光源为白炽灯,以避免高能的光对人的伤害问题;投影仪一次投影 150 个光平面,以覆盖整个肖像区域从而避免耗时间的单平面扫描测量;避免因扫描时间过长而产生的数据匹配对准问题,数码相机快速拍摄(快门速度 1/30s ~ 1/60s)经面部 3 维信息调制的光栅图像;一次成像即可得到整个面部的 3 维数据。

由于在光栅底片上明暗狭缝有一定的宽度,如图 3 所示投影产生的光栅,实际为由小变大的楔形体;图中 O 为投影仪物镜的光学主点,箭头方向为投影方向。一般投影光与被测表面有一定的夹角且被测表面对光的散射作用,导致投影光栅与被测表面截交所产生的明暗条纹有一定宽度且宽度不规则。但是,在一定的精度范围内,可以近似地认为每条亮光栅所形成的楔形体的对称中心平面,即为 3 维测量所用的等价光切平面^[8]。

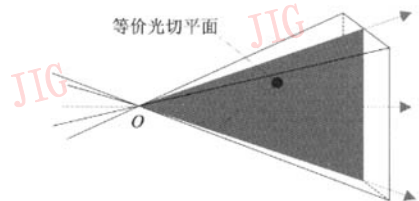


图 3 光栅双楔形体

Fig. 3 The double-wedged grating

一般明条纹的宽度为 10 个像素以上,才能有效地利用图像处理技术^[2,3],方便地得到其中心骨架点集。如果已知图像中某明条纹是光栅投影仪的某光切平面与被测表面截交而产生的,则可根据该中心骨架点集,依次计算骨架上各点所对应的 3 维空间点。

由图像上的点计算所对应的 3 维空间点的方法

可简要叙述如下。设图像上某点 P 在像素坐标系下的坐标值为 $P(i, j)$, 从像素坐标系到像平面物理坐标系的转换矩阵为 T_c , 相机焦距为 f , 像平面的物理坐标系到测量坐标系的转换矩阵为 T_m , 相机主光点在测量坐标系下的坐标值为 $M(X_0, Y_0, Z_0)$; 点 P 所对应的光切平面方程 S_n 为

$$A_n x + B_n y + C_n z + D_n = 0$$

式中, n 为光栅投影平面的编号, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; A_n, B_n, C_n, D_n 为相应光栅平面方程的系数。则点 P 所对应的 3 维空间点的计算步骤为

(1) 将点 $P(i, j)$ 从像平面的像素坐标系变换到像平面的物理坐标系, 设其为点 P_u , 即 $P_u = T_c \times P$;

(2) 将点 P_u 从像平面的物理坐标系变换到测量坐标系, 设其为点 P_m , 即 $P_m = T_m \times P_u$;

(3) 在测量坐标系下计算由点 P_m 出发经过相机主光点 M 的射线 R_m , 设射线的参数为 t , 则 $R_m = P_m + (P_m - M) \times t$;

(4) 计算射线 R_m 与对应的光切平面 S_n 的交点; 该点即为所求的 3 维空间点。

上述 3 维计算中, 矩阵 T_c 、焦距 f 、矩阵 T_m 以及主光点 M 均由相机标定的参数计算得到。而第 n 号光切平面方程 S_n 中的系数, 则由光栅投影仪标定 (指对投影仪投射出来的一系列光栅平面的空间平面方程的系数进行标定) 来确定。

由此可见, 光栅投影式立体照相系统开发中, 相机参数标定和光栅平面参数标定至关重要。这些参数发生任何微小变化时, 都必须重新标定; 它们的精度决定着系统的测量精度。所以相机和投影仪的参数标定是立体照相系统中的关键。由于相机和光栅投影仪参数标定工作涉及内容很多, 故仅针对光栅投影仪的参数标定过程进行详细阐述。

3 光栅投影仪标定的准备工作

3.1 光栅投影仪的工作原理

如图 4 所示为光栅投影仪的工作原理。图中聚光凸透镜 L_1 和 L_2 与投影镜头 L 均同轴; F_1 为投影仪球面反射镜 M 和聚光凸透镜 L_1 的公共焦点, 投影点光源 S 位于 F_1 处, F_2 为聚光凸透镜 L_2 的右焦点, 在镜头 L_2 理想对焦状况下, 投影镜头 L 位于 F_2 处。投影点光源 S 从 F_1 处发出的光线主要分为向后、向前行进的两部分; 向后行进的光线经

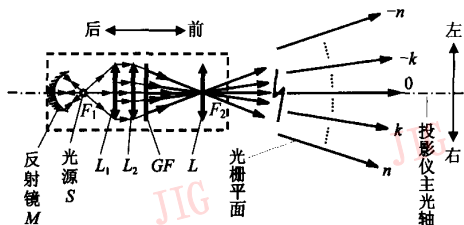


图 4 光栅投影仪原理示意图

Fig. 4 The operating principle of the grating projector

球面反射镜 M 反射后按原路返回, 与向前行进的光线汇合, 一起经过聚光凸透镜 L_1 , 形成平行光线; 平行光线再经凸透镜 L_2 折射, 形成汇聚光线向焦点 F_2 汇聚。当这些汇聚光线遇到处于透镜 L_2 及其右焦点 F_2 之间的光栅胶片 GF 时, 被明暗相间的光栅过滤: 一部分光线被黑色条纹遮挡和吸收, 另一部分光线透过光栅胶片狭缝形成光平面; 光平面再经投影镜头 L (理想对焦状况下) 的中心投影出去, 形成空间光栅楔形体; 具有一定厚度的光栅楔形的对称中心平面, 即为 3 维测量用的光切面。

3.2 光栅投影仪标定原理

求解一个空间平面的方程, 理论上只需平面上任意 3 个点即可。但是被求平面上的理想点是无法取到的, 总会存在一定的误差; 为减少测量误差, 需要采集足够多的点进行拟合计算。

如图 5 所示为光栅投影平面的标定原理。图中 $OXYZ$ 为标定坐标系, 平面 α 为任一光栅所产生的中心光切平面, 箭头方向为光线前进的方向。用平行于 XOY 坐标平面的已知平面 Σ 同平面 α 求交, 得到一条交线, 如 A_0B_0 ; 然后将平面 Σ 沿 Z 轴移动一定距离, 再与平面 α 求交, 得到另一条交线, 如 $A_{-1}B_{-1}$; 依此道理进行下去, 可得到一系列的交线

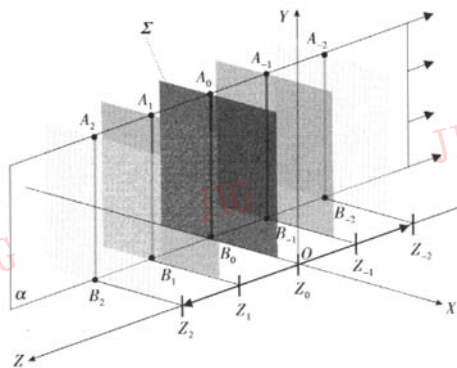


图 5 光栅投影平面的标定原理

Fig. 5 The principle of calibration for a grating plan

$A_i B_i (i \text{ 为 } 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 。在每条交线上提取足够的点,即可以这些点为采样点,使用最小二乘法来拟合平面 α 。

3.3 投影仪标定前的准备工作

3.3.1 测量范围、点群密度与光栅数目

本文研制的光栅投影式立体照相系统,是用一架 810 万像素(分辨率 3264×2448)的数码相机和一台精密光学胶片投影仪组合而成。利用两轴精密数控平台作为数码相机与投影仪标定的控制平台,标定的准备工作包括:光栅胶片、标定板的设计与制作,标定板在数控平台上安装位置的调整与固定以及数码相机同投影仪相对位置的调整与固定。

由于投影仪投射形成的光栅平面(或光切面)是发散的,其清晰成像的范围与距离是有限的;为了满足系统的测量精度,必须设定一个测量范围。根据人体头部尺寸的一般统计规律,并考虑 3 维测量时目标人物坐姿变化等因素,本文确定系统测量范围的宽度、高度和深度分别为 400mm、400mm 和 200mm;分别对应目标人物的左右、上下、前后方向上的尺寸。为了实现上述测量范围,考虑数码相机的分辨率、景深以及光栅投影仪所投影光栅的范围、景深,作者经过大量试验,确定数码相机和投影仪到被测目标的最佳距离为 1450mm 左右。

光栅投影式立体照相系统以人类面部为测量目标,要形象、逼真地记录人类喜怒哀乐等复杂面部表情信息,需要大量的 3 维点群数据;相应地,也就要求数码相片上能够采集到大量的有效像素点(有效像素点是指光切面与被测目标截交线上的点)。显然,采集的有效像素点越密集,反求所得的 3 维图形就越逼真。然而,如果光栅面过于密集,图像处理软件有可能无法准确辨别或区分相邻光栅投影所形成的光切面,反而造成极差的测量结果。所以,对光栅胶片的制作有很高的要求:既要在测量范围内满足测量密度的要求,又要兼顾图像处理软件的局限。

3.3.2 光栅胶片的设计与制作

相机的横向像素个数为 3264,所对应的测量范围为 400mm,则每个像素的分辨率约为 0.12mm。图像处理软件能够方便、准确辨别与区分相邻光切平面之间的暗像素最少为 16 个像素,其所对应的物理尺寸约为 2.0mm。综合考虑上述约束条件,在光栅胶片设计时,需确保明、暗条纹投影产生的楔形体,在测量范围的中心时其厚度不小于 2.0mm,在

数码相机上成像时不低于 16 个像素。那么,在测量范围的中心时光栅的数目最多为 $400/2.0 = 200$ 条。

为此,作者利用精密的印刷电路板激光刻录仪刻制了如图 6 所示的专用光栅胶片。图中胶片中央处有一条较宽的明条纹(宽度约为其他明条纹的 1.5~2 倍,该明条纹称之为基准光栅),作为光栅编码的基准编号(如图 4 中,基准光栅编码为 0;右方编码依次为 1, 2, \dots, k, \dots, n ;左方编码依次为 -1, -2, $\dots, -k, \dots, -n$);其余明、暗条纹宽度均相同。胶片总体尺寸根据投影仪胶片装夹装置的大小而定为 $50 \times 50 \text{mm}^2$,胶片中央有效投影区域尺寸定为 $35 \times 35 \text{mm}^2$ 。胶片材料选用很重要,要考虑透光性、膜材的遮光性、抗高温性以及胶片厚度等因素。

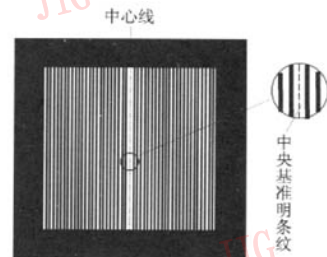


图 6 光栅胶片示意图

Fig. 6 The grating film

3.3.3 标定板的设计与制作

为了按照 3.2 节所叙述的“光栅投影仪标定原理”实现光栅平面方程标定,设计如图 7 所示的标定板,作为已知平面 Σ 。标定板表面的颜色为白色(经过特殊处理,使其为漫反射表面),其宽度和高度均为 500mm;中心处制做一直径 $\varnothing 25 \text{mm}$ 的黑色实心圆 C ;以圆 C 的圆心 O 为原点刻制 X, Y 坐标

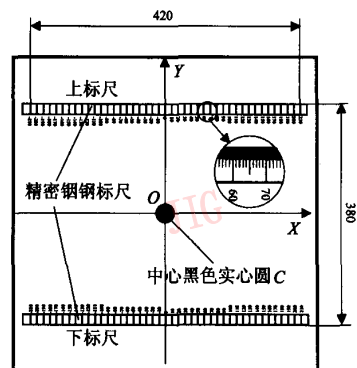


图 7 光栅投影仪标定板

Fig. 7 The calibration board for grating projector

轴;平行于 X 轴对称镶嵌两个相同的精密钢标尺(标尺的刻度面与标定板表面重合),两标尺外沿间距为 380mm;标尺量程为 ± 210 mm,标尺的最小刻度为 0.5mm;两标尺均关于 Y 轴对称,即 Y 轴通过上下两标尺的零刻度线。

3.3.4 标定板、相机及投影仪的调整与固定

标定板、数码相机和光栅投影仪三者相对位置的调整以及它们的固定是投影仪标定中关键性的操作。调整时,如图 8 所示,首先将两轴精密数控工作台面调整到水平位置(数控工作台的运动由一台 PC 机控制);其次将投影仪标定板垂直于数控平台的纵轴,竖直安装在工作台面上,标定板上的 Y 轴竖直向上;再其次将三脚架平稳地放在标定板正面适当距离处(三脚架要求有足够的刚度和抗震性,以减小标定误差),把立体照相机水平固定在三脚架上。当数控平台位于纵轴运动范围的中点时,调整三脚架到标定板的距离,使光栅投影仪镜头 L 的前端面到标定板表面的距离约为 1450mm。在保持三脚架和标定板距离不变的前提下,分别调节光栅投影仪、数码相机的镜头焦距,使投影在标定板上的光栅和成像在数码相机里的光栅均处于最清晰的状态;然后,控制数控平台运动,使标定板从纵轴运动范围中点出发沿纵轴分别向前、向后移动 100mm。在该移动范围内若干位置处,仔细检验投影在标定板上光栅的质量,以及这些光栅在数码相机上的成像质量;精心微调相应的镜头焦距,直至双方都得到清晰的图像质量。注意:完成该操作后,为保证标定参数的长期稳定性,需采取措施将数码相机以及光栅投影仪的变焦、对焦镜头固定。本文采用硅胶粘结的方式,有问题时也便于拆胶。

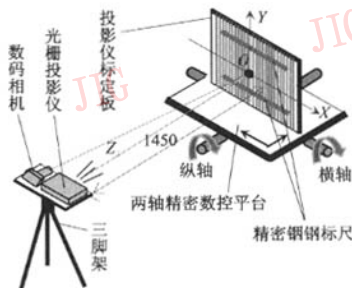


图 8 投影仪标定示意图

Fig. 8 The system for projector calibrating

镜头粘结后,再次调节三脚架相关手柄,使光栅投影仪主光轴和投影仪标定板垂直,保证标定板沿

Z 轴在 ± 100 mm 范围移动时,基准光栅的中心对准标定板上、下标尺的零刻度线(即对准 Y 轴,目测误差不超过 1.0mm);且投影光栅的上、下有效区域关于 X 轴基本对称。当标定板位于坐标系原点 O 时,微调相机的姿态,使相机主光轴与标定板相交于 O 点(即图 7 中圆 C 的中心恰在图像的中心)。若一次调节达不到要求,则需进行多次调节,直至符合要求。判断相机主光轴与标定板是否相交于原点 O 的方法为:拍摄标定板处于原点 O 时的图像;将该图像输入到计算机中,在本文开发的 3 维照相系统软件上,检测圆 C 所成之像(黑色实心圆所成的像为椭圆)的圆心位置;如果该圆心位置同图像的中心位置误差不超过 5 个像素(假设相机主光轴同 CCD 成像平面相交于图像的中心),则认为相机主光轴与标定板相交于原点 O 。

当光栅投影仪、数码相机和投影仪标定板调整完毕,将光栅投影仪、数码相机以及投影仪标定板压紧固定,确保光栅投影仪与数码相机之间、标定板与数控工作台之间的相对位置不再改变。特别需要指出的是,标定完成后,光栅投影仪与数码相机之间的相对位置必须保持不变,光栅投影仪和数码相机的焦距也不能有任何变化,否则必须重新进行标定。

4 光栅投影仪的标定的实现

投影仪参数标定的目的是求出各个光切面的空间平面方程,其过程按以下几个步骤进行。

4.1 标定坐标系的建立和采样图像的提取

数控平台位于纵轴运动范围的中心时,建立如图 8 所示的标定坐标系 $OXYZ$ (标定坐标系亦为测量坐标系);其 X 轴、 Y 轴为标定板上刻制的 X 轴、 Y 轴, Z 轴按右手法则确定。标定坐标系的 X 轴与数控平台的横轴平行,标定坐标系的 Z 轴与数控平台的纵轴平行。

建立好标定坐标系后,即可摄取采样图像。控制数控平台的运动,使其只沿纵轴(Z 轴)移动。标定板顺次运动到 $Z = +100, +50, 0, -50, -100$ 5 个位置(单位: mm),用数码相机顺次拍摄,获得 $Z100$ 、 $Z50$ 、 $Z00$ 、 $Z-50$ 、 $Z-100$ 5 幅带有投影光栅与标定板截交的图像。如图 9 所示,为标定板位于 $Z = 0$ 时的采样图像;图像中心附近最宽的亮条纹为基准光栅。此时基准光栅基本平行且对称分布于标定板上刻制的 Y 轴标志线。

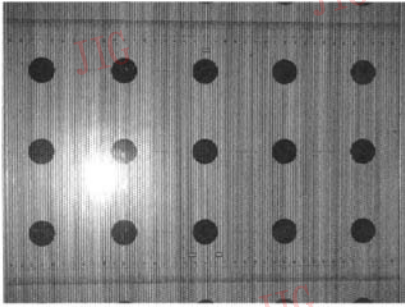


图 9 $Z=0$ 时标定板上的光栅采样图像 Z00

Fig.9 The grating image Z00 on Calibration Board at $Z=0$

4.2 采样图像预处理及采样点的提取

用立体照相系统处理软件分别对 5 幅采样图像进行去噪和亮度均衡处理,然后在标定板精密钢钢尺的有效范围内,根据每条条纹的分布情况,手动交互做出光栅图像上明条纹的中心线(如图 10(a)中所示的垂直方向的长实线),手动操作误差约为 1~2 个像素(对应误差为 0.13~0.25mm)。如图 10(b)所示,制作明条纹中心线时,其上端点须位于上标尺上沿,下端点须位于下标尺下沿,以保证每条明条纹中心线上、下端点的 Y 坐标分别为 +190mm、-190mm。

对每幅光栅图像上的光栅条纹都要进行编码,以确保使用正确的采样点集对光栅平面进行拟合计算。如图 10(b)为基准光栅处的局部放大图,若基准光栅的编码序号为 0,其左右光栅平面编码的方式如图所示,即在每幅光栅图像上,投影光栅中心基

准宽条纹的编码均设定为 0,其右侧光栅条纹的编码按 1,2,3,⋯依次递增;其左侧光栅条纹的编码按 -1, -2, -3,⋯依次递减;最后得到 5 幅带有光栅编码信息的采样图像。图 10 所示即为标定板位于 $Z=-100$ 时的光栅、光栅中心线及光栅编码信息。注意:图 10(a)中规则分布的黑色实心圆是用来对数码相机的内、外参数进行标定的。

在每幅采样图像中,按编码顺序依次提取出明条纹中心线段的上、下两个端点,作为投影仪标定的采样点。很明显,图像拍摄时标定板所处的 Z 坐标即为该幅图像上所有采样点的 Z 坐标值;而每幅采样图像上的所有明条纹中心线段上端点的 Y 坐标为 190mm,下端点的 Y 坐标为 -190mm;所以只需在钢钢标尺上读取每条明条纹上下采样端点的 X 坐标值,即得到采样点的 3 维空间坐标。例如图 10(b)中基准光栅平面右侧 3 号光栅中心线的上、下端点坐标分别为 (9.2, 190, -100)和(9.1, -190, -100)。最后,将提取得到的所有采样点的空间坐标值按照表 1 的格式记录下来。

4.3 光栅平面方程的拟合

从表 1 可以看出,点 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) 是编码为 i 的光栅平面上第 j 号采样点 ($i=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots; j=0, 1, 2, \dots, 9$)。在光栅投影仪标定过程中,对 Z 轴 5 个位置各采集一幅图像,每条光栅从每个 Z 轴位置的图像上提取上下 2 个采样点。在整个标定过程中每个光栅平面对应 10 个采样点。利用这 10 个采样点,即可使用最小二乘法拟合出对应的光栅平面方程。

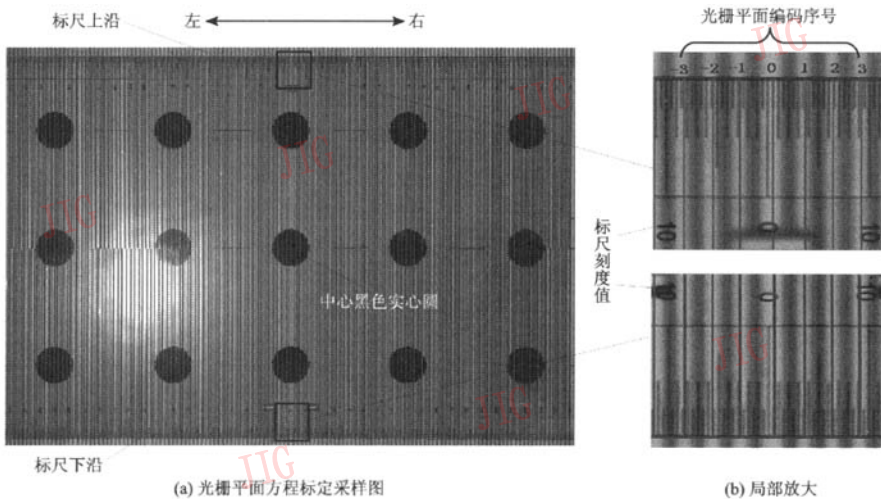


图 10 带有光栅编码信息的采样图像 $Z=-100$

Fig.10 The image with grating index information at $Z=-100$

表 1 光栅平面采样点空间坐标值记录表

Tab. 1 Coordinates form for sampling points on grating planes

| | Z100 | | Z15 | | Z00 | | Z-50 | | Z-100 | |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 上(j=0) | 下(j=1) | 上(j=2) | 下(j=3) | 上(j=4) | 下(j=5) | 上(j=6) | 下(j=7) | 上(j=8) | 下(j=9) |
| 0 | x_{00} | x_{01} | x_{02} | x_{03} | x_{04} | x_{05} | x_{06} | x_{07} | x_{08} | x_{09} |
| | y_{00} | y_{01} | y_{02} | y_{03} | y_{04} | y_{05} | y_{06} | y_{07} | y_{08} | y_{09} |
| | z_{00} | z_{01} | z_{02} | z_{03} | z_{04} | z_{05} | z_{06} | z_{07} | z_{08} | z_{09} |
| 1 | x_{10} | x_{11} | x_{12} | x_{13} | x_{14} | x_{15} | x_{16} | x_{17} | x_{18} | x_{19} |
| | y_{10} | y_{11} | y_{12} | y_{13} | y_{14} | y_{15} | y_{16} | y_{17} | y_{18} | y_{19} |
| | z_{10} | z_{11} | z_{12} | z_{13} | z_{14} | z_{15} | z_{16} | z_{17} | z_{18} | z_{19} |
| 2 | x_{20} | x_{21} | x_{22} | x_{23} | x_{24} | x_{25} | x_{26} | x_{27} | x_{28} | x_{29} |
| | y_{20} | y_{21} | y_{22} | y_{23} | y_{24} | y_{25} | y_{26} | y_{27} | y_{28} | y_{29} |
| | z_{20} | z_{21} | z_{22} | z_{23} | z_{24} | z_{25} | z_{26} | z_{27} | z_{28} | z_{29} |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | |
| -1 | x_{-10} | x_{-11} | x_{-12} | x_{-13} | x_{-14} | x_{-15} | x_{-16} | x_{-17} | x_{-18} | x_{-19} |
| | y_{-10} | y_{-11} | y_{-12} | y_{-13} | y_{-14} | y_{-15} | y_{-16} | y_{-17} | y_{-18} | y_{-19} |
| | z_{-10} | z_{-11} | z_{-12} | z_{-13} | z_{-14} | z_{-15} | z_{-16} | z_{-17} | z_{-18} | z_{-19} |
| -2 | x_{-20} | x_{-21} | x_{-22} | x_{-23} | x_{-24} | x_{-25} | x_{-26} | x_{-27} | x_{-28} | x_{-29} |
| | y_{-20} | y_{-21} | y_{-22} | y_{-23} | y_{-24} | y_{-25} | y_{-26} | y_{-27} | y_{-28} | y_{-29} |
| | z_{-20} | z_{-21} | z_{-22} | z_{-23} | z_{-24} | z_{-25} | z_{-26} | z_{-27} | z_{-28} | z_{-29} |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | |

根据光栅平面性质和采样点特性,建立如下光栅平面方程的模型:

$$ax + by + cz = 1 \tag{1}$$

其中, a, b, c 为光栅平面方程系数。

分别将每个光栅平面对应的采样点的空间坐标值代入式(1)中,则每个光栅平面对应的方程组表示成如下矩阵形式:

$$AX = d \tag{2}$$

如果用下标 i 表示光栅平面的编码,则式(2)中矩阵

$$A = \begin{bmatrix} x_{i1} & y_{i1} & z_{i1} \\ x_{i2} & y_{i2} & z_{i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i9} & y_{i9} & z_{i9} \end{bmatrix}, \text{列向量 } X = [a \quad b \quad c]^T \text{ 为该光}$$

栅平面的法向量,向量

$$d = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T$$

由采样点空间坐标的特性可知,矩阵 A 列满秩,可以解得:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T d$$

其中, $(A^T A)^{-1}$ 表示矩阵 $(A^T A)$ 的逆。

这样分别求出每个光栅平面对应的空间平面方程参数,即完成了光栅投影仪的标定。

5 结 论

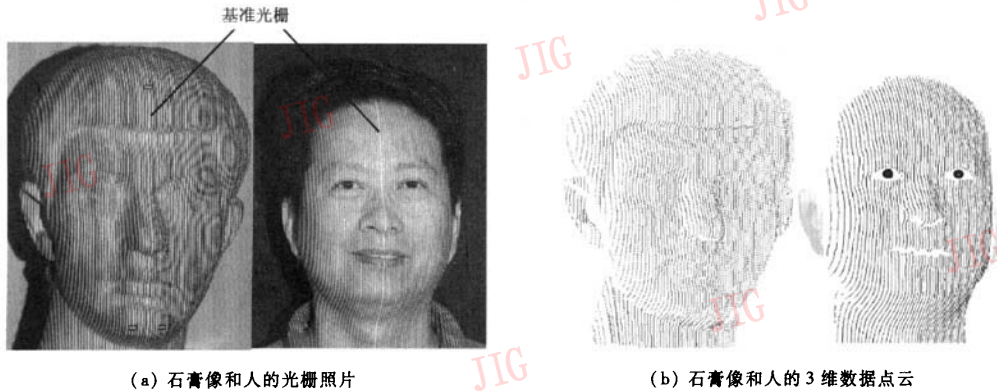
本文标定方法所得的光栅平面参数,应用于光栅投影式 3 维照相系统中,取得令人满意的结果,满足立体照相系统对人物肖像摄影精度的要求。图 11(a)为带有投影光栅的石膏像和人的数码照片,图 11(b)为立体照相系统根据石膏头像和人的数码光栅照片计算出来的石膏头像和人的 3 维数据点云。该数据点云再经过 3 维照相系统软件的适当处理,即可输出可供激光内雕刻机使用的最终的 3 维点云数据。

实验结果表明,本文提出的光栅投影仪标定方法原理简单,实现容易,标定结果可靠有效。但是,目前标定过程中光栅明条纹中心线的提取,依赖于手工操作(这是因为,如图 10 所示,标定板上有为数码相机标定而准备的黑色实心圆,造成中心线的自动提取有一定的困难),操作时间长(一般一次标定花费 3~4 天时间,其中 95% 的时间为中心线的提取操作),操作者长时间做同一动作,精神难免分散,容易产生操作误差,标定精度难以保证。如何实现光栅中心线的自动、高效、精确提取,是本文方法

实用化的关键。

另外,在 3 维点群数据计算阶段,虽然所有光栅中心线的提取是由软件自动完成,但是如图 11(a)所示的基准光栅的指定,是通过人工交互的方式完成。如果曲面不光顺或有阴影存在,致使中心发生断裂或

剧烈扭曲,将使光栅中心线的自动排序产生混乱;中心线序号混乱,将造成光栅与光栅平面方程的错误对应关系;错误匹配将计算出错误的 3 维坐标。因此,如何解决 3 维计算过程中的问题,亦是光栅投影式立体照相系统实用化中应解决的关键技术难题。



(a) 石膏像和人的光栅照片

(b) 石膏像和人的 3 维数据点云

图 11 光栅照片与所测量的 3 维数据点云

Fig. 11 The grating images and their 3D data cloud measured

参考文献 (References)

- 1 Wang Ping-jiang. Research on Integration Technology of Surface Measuring, Modeling and NC Manufacturing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1996. [王平江. 曲面测量、建模及数控加工集成技术研究[D]. 武汉: 华中理工大学, 1996.]
- 2 Yang Dao-shan. Research on Laser-Machine Vision 3D Inspection System [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1999. [阳道善. 激光机器视觉三维检测系统研究[D]. 武汉: 华中理工大学, 1999.]
- 3 Hao Yu-dong, Zhao Yang, Li Da-chen. Review of optical profilometry based on light pattern projection[J]. Optical Technique, 1998, 4(5): 57~60. [郝煜栋, 赵洋, 李达成. 光学投影式三维轮廓测量技术综述[J]. 光学技术, 1998, 4(5): 57~60.]
- 4 Klette R, Schluns K, Koschan A. Computer Vision: Three-dimensional Data from Images[M]. Berlin: Springer, 1998.
- 5 Lavoie P, Ionescu D, Petriu, E 3-D object Model Recovery From 2-D Images Using structured light [A]. In: Proceedings of IMTC/96, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference[C], Brussels, Belgium, 1996, 1: 377~382.
- 6 Franz Pernkopf, Paul O' Leary. Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces [J]. NDT & E International, 2003, 36(8): 609~617.
- 7 Wang Xiao-lin, Chen Wei-ming, Huang Shang-lian. Principle and application of 3D profile testing by light sectioning [J]. Optical Technology, 1997, 3(2): 39~43. [王晓林, 陈伟民, 黄尚廉. 光切法三维轮廓测量的原理及其应用[J]. 光学技术, 1997, 3(2): 39~43.]
- 8 Ju Yan, Wang Tong-qing, Liu Jian-sheng, et al. Principle and system design of foot profile 3-D measuring device based on light-section method[J], Journal of Transducer Technology, 2002, 21(4): 18~21. [居琰, 汪同庆, 刘建胜等. 基于光切法的三维脚型测量仪原理及系统设计[J]. 传感器技术, 2002, 21(4): 18~21.]