

文章编号 1004-924X(2010)01-0257-09

随机模式投影双目测量系统中的单目测量

石春琴,张丽艳,韦 虎,刘胜兰

(南京航空航天大学 江苏省微细与精密制造技术工程研究中心,江苏 南京 210016)

摘要:为克服基于随机模式投影的双目立体测量系统中的局部高光和自身遮挡,提出了一种由单摄像机-投影器构成两个单目测量单元的测量方法。首先,给出了一个标定算法,该算法只需从不同角度拍摄随机光场在普通白板上的图像(称为标定图像),就可以标定纯随机模板上每一点经投影镜头发出的光线,无需标定投影镜头畸变,且精度不受投影镜头畸变的影响。然后,将随机光场照射下的被测物体图像与标定图像进行亚像素精度的像点匹配,根据三角测量原理获取物体表面的三维点云数据。最后,采用标准平面和圆柱面对该方法进行测量精度验证,并给出了具体的测量实例。实验结果表明,标准试件拟合面的平均偏差 <0.02 mm,测量不确定度 <0.05 mm (3σ)。综合两个单目测量单元进行测量,能有效避免因高光和遮挡等原因引起的点云数据缺失。

关键词:双目立体测量;摄像机-投影器;标定;随机光场;三维测量

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

Monocular measurement in binocular measurement system with instantaneous random illumination

SHI Chun-qin, ZHANG Li-yan, WEI Hu, LIU Sheng-lan

(*Jiangsu Engineering Research Center of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)

Abstract: To alleviate the effect of local highlight and self occlusion of a random-pattern-projection-based binocular stereo measurement system, a novel method by using a single camera and the projector as a monocular measurement unit was presented. Firstly, a simple and effective calibration algorithm was proposed to construct the line functions of the rays emitted from every point of the random pattern plate through a projector lens, then the calibration was carried out by just taking several images (called calibrated images) of a white board with random illumination in different orientations. It is unnecessary to calibrate the distortion of projector lens, and the system precision is not affected by the distortion. Then, the object image captured in random illumination was matched with the calibrated image at sub-pixel location, and the 3D point cloud data of the object were obtained by triangulation principle. Finally, the standard plane and cylinder were measured to verify the accuracy of the proposed method, which demonstrates that the measurement uncertainty is less than 0.05 mm (3σ). Several other measurement examples indicate that two monocular measurement units working together

收稿日期:2008-12-22;**修订日期:**2009-03-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50875130);国家教育部博士点基金资助项目(No. 200802870016);江苏省科技支撑计划资助项目(No. BE2008136)

can effectively avoid point losing caused by the highlight and occlusion.

Key words: binocular stereo measurement; camera-projector; calibration; random illumination; 3D measurement

1 引 言

由于有极线几何原理和光学三角形原理的坚实支撑,基于双目立体成像原理的三维点云测量方法稳定可靠、精度高、速度快,目前已经广泛应用于逆向工程、物体识别、工业质量检测及机器人自导引等领域。这种方法是用两个有一定间距、成一定角度的相机同时分别摄取场景的一幅图像,在已知两个相机内外参数的前提下,通过图像间的像点匹配获得同一空间点在两幅图像中的像差,进而解算该点的三维坐标。然而,立体图像对之间的高精度像点匹配却并非易事^[1]。为此,一些学者提出了将双目立体结构中的一个摄像机替换为一个结构光场投射器,常见的结构光模式是多个条纹光场的组合。事先标定结构光场与摄像机之间的空间几何关系,测量时根据一个摄像机拍摄的经三维物体调制过的结构光图像,建立其上的像点与投射出的结构光场的对应关系,再利用三角测量原理来实现三维测量。然而,一个摄像机和一个投影器组成的结构光测量系统,对器件安装有严格要求。许多系统^[2-5]要求投影镜头的光轴与相机镜头的光轴相交,而且要求投影器的光学中心与各个条纹方向张成的光平面(结构光片)与两个光轴张成的平面垂直。另外也有的系统^[6]要求标定和测量时必须保证摄像机和投影器的光轴严格平行。这些安装上的严格要求实际操作中较难保证,而安装误差会直接影响测量精度。另一方面,一个摄像机和一个投影器组成的结构光测量系统标定过程比较复杂,要求精确控制标定参照物(如具有某种图案的平板)的空间位置^[7]。文献[8]将投影器视为主动式摄像机,将对摄像机-投影器的标定转化成对两个摄像机的标定,从而使标定过程得到了一定程度的简化。

解决立体图像对匹配问题的另一种方法^[9]通常是在双目结构的两个摄像机中间增加一个结构光场投射器,两个摄像机同时拍摄结构光场照射下的被测物体,借助结构光场提供的图像灰度信息和极线的双重约束,实现立体图像对之间的匹

配和三维重建。双目立体系统的优点是一般没有严格的安装精度要求,且已有成熟而简便的标定方法^[10]。然而,由于需要通过空间点在两幅图像间的像点匹配解算该点的三维坐标,因此,空间一点及其邻域只要在其中一幅图像上不可见,或者在一个摄像机视线方向出现高光反射,双目立体测量系统就无法测量出该点的三维坐标,使三维测量结果中在某些区域产生数据缺失。针对这种情况,文献[11]采用已标定的双目立体结构配合进行单摄像机-投影器单元的标定,然后分别用投影器和左右两个摄像机各自组成测量单元进行三维点云测量。文献[11]的方法是针对格雷码加移动光条的结构光模式而设计的,每次标定和测量都要投射多达 29 幅图像到被测物体表面,结构光标定过程是将每一个结构光片(共 400 个)拟合为一个二次曲面用于后续的测量过程。

文献[12]在双目立体测量系统中采用了一个纯随机光场投射器,通过瞬间投射出纯随机模板图像到被测物体表面,辅助进行双目立体图像之间的稠密像点匹配,从而获取物体表面的点云数据。该方法中的光场投射器结构简单、便于实现,没有特别的安装要求,而且只需要一个随机光场图像对就能够获得高质量的三维点云,因此能够在瞬间完成一次测量的图像采集,可用于非静态物体的三维表面轮廓测量。但是该方法也同样只能得到双摄像机公共视场内均清晰成像的点的三维坐标。

本文在文献[12]工作的基础上,研究将纯随机光场投影器分别和两个摄像机组成摄像机-投影器测量单元,进行物体表面点云测量的新方法。该方法只需从不同位置拍摄随机光场在一个普通白板上的 3~5 幅图像(称为标定图像),就可以简洁而有效地确定由纯随机模板上每一点发出的光线的直线方程。在三维测量过程中,将一个摄像机拍摄的在随机光场照射下的被测物体图像与标定图像进行亚像素精度的像点匹配,从而获取物体表面的三维点云数据。由于本文提出的单目测量方法中,空间一点及其邻域只需要在左右任意一幅图像上成像良好,就可以由其中的一个测量

单元得到其三维坐标,因此避免了由于某个单摄像机视线方向存在高光及遮挡等原因引起的三维测量数据缺失,能够有效弥补单纯双目测量的不足。

2 系统组成与工作模式

本文研究面向的测量系统主要由两个 CCD 摄像机、一个纯随机光场投射器、同步控制装置及计算机组成,如图 1 所示。标定和测量时,由计算机控制投射器投射随机光场,同时触发左右摄像机对随机光场照射下的被测物体进行拍摄,获取立体图像对。

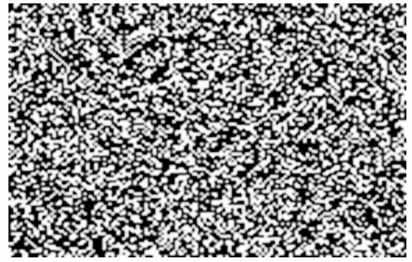


图 1 测量系统硬件形式

Fig. 1 Setup of measurement system

研发的随机光场投射器结构简单紧凑,光线由光源发出,依次经过隔热玻璃和光栏板,照射到具有纯随机图案的模板上,再通过光学投影镜头将模板上的图案投射于被测物体,如图 2 所示。模板上的图案由随机方法生成,以便在物体表面产生足够丰富的纹理信息。

在双目工作模式下,由两个摄像机从不同角度同时拍摄随机光场照射下的被测物体,利用随机图像各点邻域范围内的灰度分布各不相同的特



(b)模板上的随机图案

(b) Random pattern on template

图 2 随机光场投射器示意图

Fig. 2 Sketch maps of random illumination protector

点,采用基于区域匹配方法实现左右摄像机拍摄的图像对之间的稠密像点匹配和三维重建,从而获取物体表面的点云数据^[13-14]。采用文献[10]的方法进行两个摄像机的内外参数及其相对位置关系的标定。该标定方法只需要对一块具有不同大小圆形特征点的标定板从不同位置拍摄几幅图像即可方便地实现。双摄像机标定后,本文将世界坐标系取为与左摄像机坐标系重合。

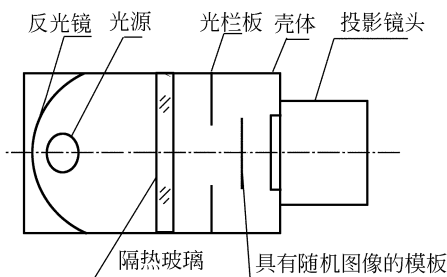
本文将系统中的随机光场投影器和一个摄像机组成摄像机-投影器测量单元进行三维点云测量的工作模式简称为单目工作模式,是本文研究的重点。由于投影器与两个摄像机的相对位置保持不变,因此经过随机模板上的每一点投射出去的光线,在世界坐标系下保持不变。将空间直线方程记为:

$$y = \bar{x} + \alpha e, \quad (1)$$

式中, \bar{x} 为直线上的一点, e 为直线的单位方向矢量, $\alpha \in \mathbf{R}$ 表示空间直线参数。本文将确定经过随机模板上的每一点投射出去的光线的空间直线 (\bar{x}, e) 的过程称为散斑标定。经过散斑标定后,测量时根据一个摄像机拍摄的随机光场照射下的被测物体图像上每个像素点邻域的灰度变化,找到该像素点在标定图像上的对应点,就可以根据该像素的成像直线与相应的投影光线的交点,获取物体表面上该点的三维坐标。

3 单目工作模式下的散斑标定

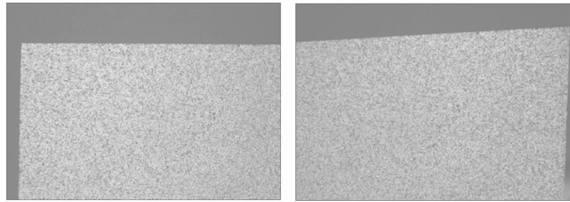
本文提出的散斑标定方法只需要一块简易的白色标定板,而且对该板的平面度没有严格要求。实际操作中,将双摄像机标定用的带有圆形



(a) 投射器基本结构

(a) Structure of projector

特征点的标定板的另一面做成白色即可。进行散斑标定时,由纯随机光场投射器向标定板的白色一面投射散斑图像,双目立体测量系统中的双摄像机同时对标定板进行拍摄,得到散斑标定图像对。在景深范围内将标定板前后移动一定距离(该距离无需控制,人工移动即可),重复拍摄 3~5 个标定图像对。图 3 所示为左右摄像机摄取的一个散斑标定图像对。



(a) 左图像 (a) Left image
(b) 右图像 (b) Right image

图 3 散斑标定图像

Fig. 3 Speckle images for calibration

3.1 确定投影直线

如图 4 所示,设投影器的虚拟光学中心为 P ,左摄像机光学中心为 C_l ,右摄像机光学中心为 C_r ,标定板的不同摆放位置记为 $\Pi^i (i=1, \dots, n)$, O 代表被测物体。纯随机散斑模板上的任意一点 $p_j (j=1, \dots, m)$ 投影到 Π^i 上的像点记为 x_j^i , 投影到被测物体上的点记为 x_j^o , 而 x_j^i 和 x_j^o 在左摄像机像平面上分别成像为 $(I_j^i)_l$ 和 $(I_j^i)_l$, 在右摄像机像平面上为 $(I_j^i)_r$ 和 $(I_j^i)_r$, (这里假定图像已经过成像畸变矫正)。

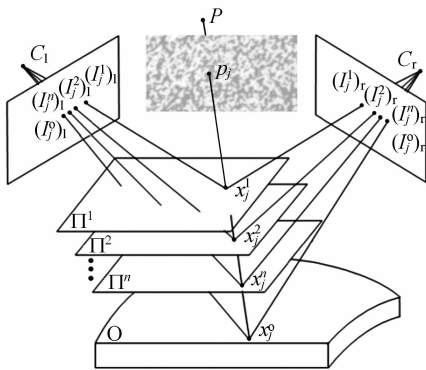


图 4 散斑标定与三维重建模型

Fig. 4 Model of speckle calibration and 3-D reconstruction

于左右两个摄像机对不同位置的标定板采集的 n 个散斑标定图像对,首先结合双目立体结构的极线几何约束,采用最小二乘区域匹配方法^[15]对每一个标定图像对上的各个像点建立匹配关系 $(I_j^i)_l \Leftrightarrow (I_j^i)_r$, 同时求取三维点坐标 $x_j^i (x_j^i, y_j^i, z_j^i)$, $i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$ 。空间点列 $x_1^j, x_2^j, \dots, x_n^j$ 理论上应该位于同一条直线上,但由于双目立体测量误差的影响,会有一些的偏差,因此,本文用 $x_1^j, x_2^j, \dots, x_n^j$ 拟合一条最小二乘意义下的空间直线。

令

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_j^i, \quad (2)$$

引入散布矩阵

$$S = \sum_{i=1}^n (x_j^i - \bar{x}_j)(x_j^i - \bar{x}_j)^T, \quad (3)$$

由主元素分析理论可知,拟合空间直线的方向向量 e_j 是 S 的最大特征值所对应的特征向量。由此可以确定 $p_j (j=1, \dots, m)$ 点的投射直线 (\bar{x}_j, e_j) 。

在 n 个散斑标定图像对中选择一个标定图像作为样板图像,记为 N ,用于后续的单目三维测量。标定出的 (\bar{x}_j, e_j) 作为与图像 N 上的相应像点 I_j 相关联的属性存储于系统当中。

3.2 关于投影镜头畸变的讨论

投影镜头和成像镜头一样,也存在畸变效应,但 3.1 节的方法中并没有涉及投影镜头的畸变,在此分析其原因。从光源发出的光线照射到随机散斑模板上的 $p_j (j=1, \dots, m)$ 点,经过投影镜头后会由于镜头的畸变效应使光线偏离原来的方向,而且随机散斑模板上的不同点发出的每条光线经过投影镜头后会有不同的畸变程度。当采用条纹结构光时,需要标定经过投影模板上的一条直线上的各点投射出去的“光平面”的方程。但由于模板上一条直线上的各点经过投影镜头产生不同程度的畸变,因此“光平面”实际上会成为一个曲面。因此,文献[11]为了考虑这种畸变的影响,以提高算法的复杂性为代价,将条纹产生的结构光片作为二次曲面而不是平面来加以标定,从而提高测量精度。而在本文的方法中,虽然过 p_j 的光线经过镜头会改变原来的方向,即图 4 中的 P 、 p_j 、 x_j^i 和 x_j^o 并不严格在一条直线上,但是相应的光线从投影镜头发出后在空气中传播,因此一定

假定两个摄像机的内外参数已经过标定,对

是在一条直线上,即 $x_j^i (i=1, \dots, n)$ 和 x_j^o 一定在一条直线上。3.1 节中的方法实际上是为样板图像对上的每个像素确定一条从投影镜头出发后的那条光线的直线方程。由于是每个点独立标定,因此,测量时只要确定物体上的一点 x_j^o 所对应的投射直线 (\bar{x}_j, e_j) ,就可以由直线 (\bar{x}_j, e_j) 和连接 I_j^o 与摄像机光心 C_1 (或 C_r) 的直线的交点确定 x_j^o ,而不用标定 P 和 p_j 点的实际位置。因此,本文的散斑标定方法非常简洁易行,不受投影镜头畸变的影响。

4 单目三维测量

散斑标定完成以后,就可以进行单目工作模式下的三维点云测量。首先由投射器向被测物体投射随机光场,由两个摄像机各自拍摄随机光场照射下的被测物体,得到两个测量用的图像,分别记为 M_l 和 M_r 。本文将测量图像 M_l, M_r 和样板图像 N 分别构成两个单目测量单元,各自生成三维点云数据。后续讨论除非特别指出,单目测量单元不专指哪一个,用 M 表示测量图像。另外,由于左右摄像机的相对位置关系已经经过了标定,两个单目测量单元得到的点云数据可以很容易地转换到一个统一的坐标系中。

4.1 散斑投影图像的稠密像点匹配

对于测量图像 M 中的每个像点,其小邻域范围内(本文取 15×15 的一个窗口)的被测物体的景深变化远小于物体距测量系统的距离。因此,根据图 5 所示,投影模板上 p_j 及其邻域发出的光线投射在标定板上的一个局部区域与投射在被测量物体上的相应局部区域仅有微小的变形,因而样板图像 N 上的局部小窗口在测量图像 M 上的相应区域变形也比较小,在局部小范围内可用仿射变换来近似描述:

$$\begin{cases} u^M = a_{11} + a_{12}u^N + a_{21}v^N \\ v^M = b_{11} + b_{12}u^N + b_{21}v^N \end{cases}, \quad (4)$$

式中, $a_{11}, a_{12}, a_{21}, b_{11}, b_{12}, b_{21}$ 为仿射系数, (u^N, v^N) 表示样板图像 N 上的像素点坐标, (u^M, v^M) 表示测量图像 M 上的同名匹配点坐标。对于公式(4)中的 6 个未知数,如果只考虑一个匹配点对,则是一个欠约束问题。所以对于固定大小的窗口区域,考虑待匹配点整个邻域内的灰度分布相似的像素点,默认它们有相同的仿射系数,则方

程的个数大大超过未知量的个数。具体采用文献[15]的方法通过最小二乘法迭代优化求出仿射变换系数,进而得到待匹配图像上的精确坐标位置。

上面的最小二乘优化匹配需要有比较好的匹配初始值。为此,本文首先通过已标定的摄像机非线性畸变参数对标定图像进行矫正。然后采用 Harris 角点检测算法^[16]提取图像 M 和图像 N 中的角点作为候选特征点。在此基础上,借鉴 SIFT^[17]方法,给每一个候选特征点定义一个由 128 维向量表示的特征描述子,通过双向查找特征描述子欧氏距离意义下的最近邻,得到图像 M 和图像 N 之间的候选匹配对,见图 5。

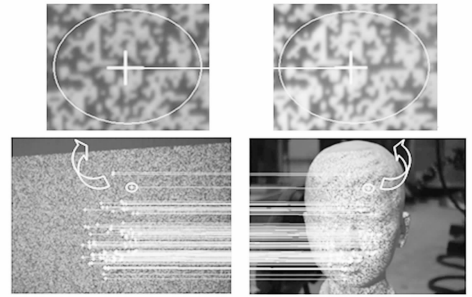


图 5 图像初始匹配示意图

Fig. 5 Sketch maps of initial correspondences between the two images

由于摄像机镜头存在畸变,且通常径向畸变占主导地位,图像虽经过畸变矫正,但通常仍然是距图像中心越近误差越小。因此,本文综合候选初始匹配点对间的特征描述子欧氏距离的大小及其与图像中心的距离,得到候选匹配的优先顺序,并列入指定数组 C 。

取数组 C 中优先级最高的候选匹配点对作为第一个匹配点对的初值,然后用最小二乘法迭代优化进行匹配求精。获得了一个匹配点对以后,本文通过匹配传播的方法确定相邻像素的匹配初值。即假设 (u_0^N, v_0^N) 为样板图像上的一个像素点,经最小二乘迭代优化得到了测量图像上的精确匹配位置 (u_0^M, v_0^M) 和仿射变形系数 $a_{11}^0, a_{12}^0, a_{21}^0, b_{11}^0, b_{12}^0, b_{21}^0$,那么 (u_0^N, v_0^N) 的四邻域点(或八邻域点) $(u_1^N, v_1^N) = (u_0^N + \Delta u, v_0^N + \Delta v)$ ($\Delta u, \Delta v$ 取 ± 1)的初始匹配位置可以取为:

$$(u_0^M + a_{12}^0 \Delta u + a_{21}^0 \Delta v, v_0^M + b_{12}^0 \Delta u + b_{21}^0 \Delta v),$$

再次利用最小二乘迭代优化找到 (u_1^N, v_1^N) 的精

匹配位置 (u_1^M, u_1^M) 。通过这种匹配传递方法,可以为大量的像点获得很好的匹配初值,实现样板图像与测量图像间的快速稠密像点匹配。

从一个点开始的匹配传递遇到被测物体表面高光反射区域或局部遮挡引起的不连续区域,算法会在该处停止传递。这时,本文算法从候选匹配数组 C 中取下一个未经精确匹配的像素对,重新开始上述过程,直到数组 C 中的候选匹配点都经过了迭代求精为止。第 5 节的车门钣金件测量实例验证了多初始点对匹配算法的有效性,使一次测量能够获得尽可能大范围的三维点云。

4.2 三维重建

建立了图像 M 和图像 N 之间的同名像点匹配 $(I_j)^N \Leftrightarrow (I_j)^M$ 后,查找样板图像上的像点 $(I_j)^N$ 相关联的标定投影直线 (\bar{x}_j, e_j) 。而摄像机坐标系下的投影射线 $\overline{C_{ri} I_j}$ 表示由 C_{ri} 到摄像机像平面上的点 I_j^o 的连线(如图 6),记为 βI_j^o ($\beta \in \mathbf{R}$)。投影射线 $\overline{C_{ri} I_j}$ 和散斑点投影直线 (\bar{x}_j, e_j) 理论上应该相交,但由于双目测量误差的影响,它们一般会形成异面直线,所以取二者公垂线中点 $(x_j^o)'$ 为重建出的三维坐标。

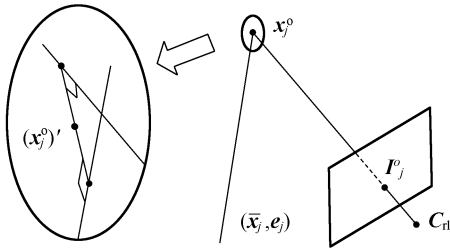


图 6 单目测量结构图

Fig. 6 Monocular measurement configuration

假设摄像机的投影射线和散斑点投影直线的公垂线为 $c(I_j^o \times e_j)$ ($c \in \mathbf{R}$),则在左摄像机坐标系下,左右摄像机的投影射线与 (\bar{x}_j, e_j) 的公垂线分别为 $c_1((I_j^o)_1 \times e_j)$ 和 $c_2(\mathbf{R}_{z21}(I_j^o)_r \times e_j)$, $c_1, c_2 \in \mathbf{R}$ 为两公垂线参数, \mathbf{R}_{z21} 表示右摄像机坐标系到左摄像机坐标系的旋转矩阵。这样只需求出实数 α, β, c , 满足:

$$\beta I_j^o - \alpha e_j - c(I_j^o \times e_j) = \bar{x}, \quad (5)$$

就可得到三维点 $(x_j^o)'$ 的坐标:

$$\beta I_j^o - \frac{c}{2}(I_j^o \times e_j) \text{ 或 } \alpha e_j + \bar{x} + \frac{c}{2}(I_j^o \times e_j). \quad (6)$$

5 实验验证

本文的实验平台是自主研发的纯随机模式投影的三维测量系统,如图 1 所示。两个摄像机采用 Watec 902B CCD 视觉传感器,相面尺寸为: $6.4 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$,分辨率为 $768 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$;光学镜头为 computar M1614-MP,焦距为 16 mm ;软件以 VC++6.0 为工具编写,在 Windows2000 平台运行。实验之前,预先通过文献 [10] 的方法,得到左右摄像机的内外参数矩阵。

表 1 精度验证结果

Tab. 1 Result of precision verification

误差/mm	平均偏差	标准差
平面度	0.0175	0.0145
圆柱度	0.0172	0.0141

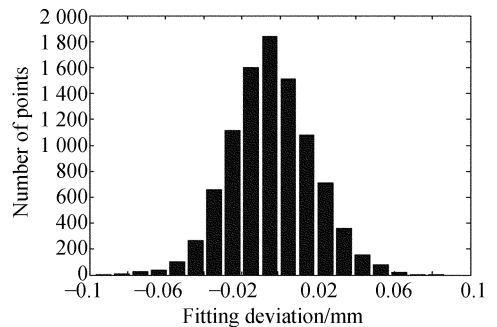
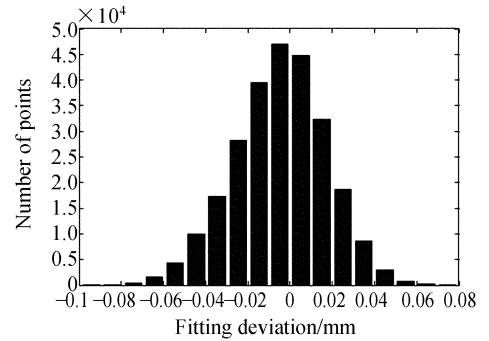


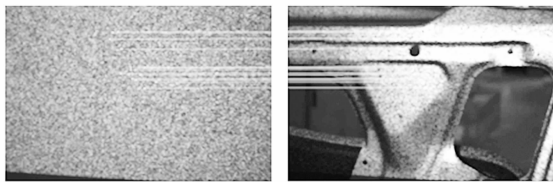
图 7 拟合偏差统计直方图

Fig. 7 Histogram of fitting deviation

在本次散斑标定实验中,手持白色标定板在不同角度拍摄 3 对图像,并利用双目结构重建视场内点的三维坐标。然后根据公式(2)和(3),标定由随机模板上每一点投射出去的投影直线。为了验证单目测量系统的测量精度,本文分别对一

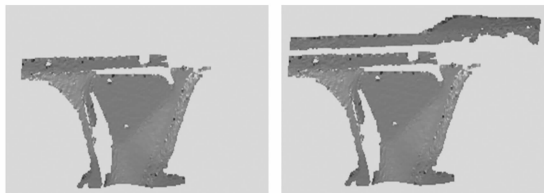
个平面试件和一个圆柱面试件进行测量。其中平面试件面积约 $200\text{ mm} \times 180\text{ mm}$, 精度等级达 4 级, 形状公差为 $6\text{ }\mu\text{m}$; 圆柱面取自一个密封零件的密封配合面, 半径约 37 mm , 精度等级达 5 级, 形状公差为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 。对于标准平面试件, 将测量得到的 257 361 个三维点云数据拟合平面, 分析测得的各个三维坐标点与拟合平面的欧氏距离; 而对于圆柱面试件, 以测取的 9 613 个点云数据拟合出一个圆柱面, 同样分析各测量数据点到拟合圆柱的欧氏距离。表 1 显示了两个实验的数值统计结果, 平面和圆柱面的拟合偏差统计直方图如图 7 所示, 约 97% 的数据点分布在距拟合面 $\pm 0.05\text{ mm}$ 的区域。

此外, 为了验证样板图像的选取对单目测量结果的影响, 本文依次选取三个不同的标定图像分别作为样板图像, 并分别与标准平板的同一幅测量图像进行图像匹配, 重建其上的三维点云。通过分析平面拟合偏差, 得知三次测量的结果很接近, 平均偏差都在 0.017 mm 上下浮动。因此, 样板图像的选择对单目测量影响不大, 这与理论上的分析是一致的。



(a) 测量时初始匹配结果

(a) Initial matches in measurement



(b) 单点匹配传递的结果 (c) 多点匹配传递的结果
(b) Single point for matching propagation (c) Multi-points for matching propagation

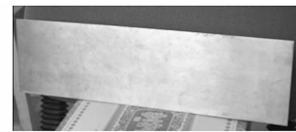
图 8 车门钣金件的单目测量

Fig. 8 Monocular measurement results of sheet metal door

图 8 所示的实验说明本文采用的测量图像与样板图像之间初始匹配点对的选取方法对三维

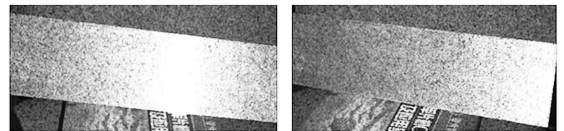
测量结果的意义。(a)是利用本文的 Harris 角点检测结合 SIFT 特征描述子方法得到的车门钣金件测量图像与样板图像的初始匹配结果, 共有 13 个候选像素匹配对。(b)图是以一个初始匹配点对进行匹配传递的结果, 得到 220 136 个三维空间点, 匹配传递的区域相对较小。而图(c)是基于本文的自动多初始点对匹配传递方法重建的结果, 一次测量的空间点数增至 304 271 个, 获得了更大范围的三维点云, 比较好地提高了数据产出率。

图 9 是单目测量模式用于改善金属高光反射区域测量效果的实验。图 9(a)是实验待测的金属薄板, 在光的照射作用下, 表面局部发生反光, 致使图 9(b)和图 9(c)所示的测量图像上出现不同位置的高光, 湮没了相应的散斑信息。从图(d)明显看出, 利用双目立体测量模式重建出的结果中缺失了高光区域的三维数据信息。而在单目测量模式下, 左右测量单元各自获得的三维点云数据具有互补性, 拼合在一起的结果如图(e)所示, 可见三维数据更加完整。



(a) 待测模型

(a) Test model

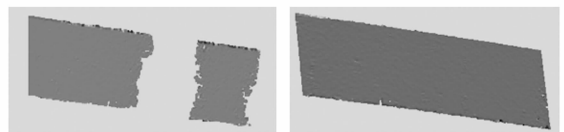


(b) 左图像

(b) Left image

(c) 右图像

(c) Right image



(d) 双目模式测量结果 (e) 单目模式测量结果
(d) Binocular measurement (e) Monocular measurement

图 9 金属薄板重建

Fig. 9 Reconstruction of a sheet metal

图 10 用于说明单目测量模式改善被测物体自身遮挡测量效果的实验。图 10(a)是被测的石

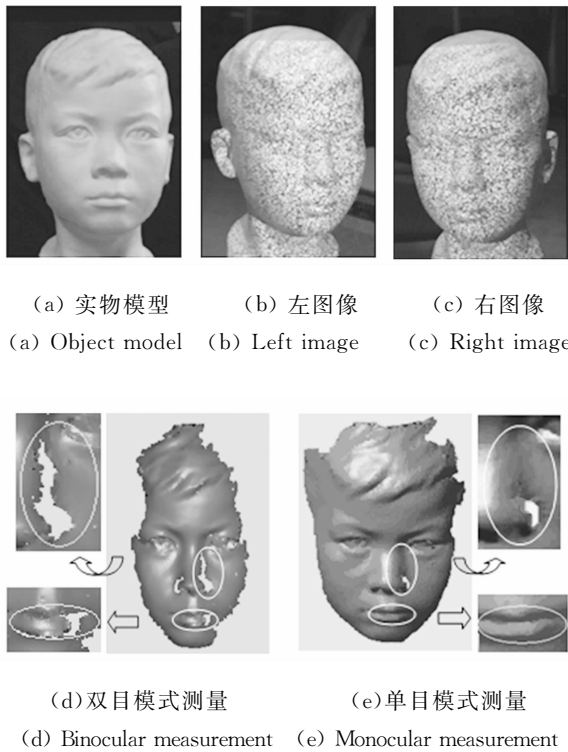


图 10 石膏头像重建

Fig. 10 Reconstruction of gessoed head

膏头像,10(b)和 10(c)分别为左右摄像机拍摄的随机光场照射下的测量图像。石膏头像表面形状

参考文献:

- [1] BLEYER M, GELAUTZ M. A layered stereo matching algorithm using image segmentation and global visibility constraints [J]. *ISPRS J. Photogram.*, 2005,59(3):128-150.
- [2] TSAI M J, HUNG C C. Development of a high-precision surface metrology system using structured light projection [J]. *Measurement*, 2005,38(3):236-247.
- [3] WANG Z Y, LI H W, LI D P, *et al.*. A direct calibration method for structured light [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Niagara Falls, Canada*,2005;1283-1287.
- [4] SANSONI G, TREBESCHI M, DOCCHIO F. Fast 3D profilometer based upon the projection of a single fringe pattern and absolute calibration [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006,17(7):1757-1766.

结构复杂,在局部突出或凹陷区域两个摄像机各自都会有一定的区域被遮挡,图 10(d)为双目工作模式下一次测量得到的结果,其中由于额头、鼻翼和嘴唇的遮挡出现了许多空缺。图 10(e)综合了左右单元测得的三维点云数据,可以看出,单目测量结果对双目测量结果中的空缺区域做了很多的补充,提高了一次测量的数据点产出率。同时也看到,图 10(e)在鼻翼两侧仍存在小的漏洞,这是由于这一部位曲率变化较大,在单目图像中也存在一定的自身遮挡引起的盲区,可以通过变换测量角度加以补充测量。

6 结 论

本文针对投射随机光场的双目立体测量系统的特点,提出了一种由单摄像机-投影器构成两个单目测量单元的测量方法。该方法的投射光线标定过程非常简洁易行,不需实际确定投影中心的具体位置,也无需考虑投影镜头畸变。实验证明,在纯随机模式投影的双目立体测量系统中采用单目测量模式,标准试件拟合面的平均偏差 $< 0.02\text{ mm}$,测量不确定度 $< 0.05\text{ mm}$ (3σ),能够有效避免由于某个摄像机视线方向存在高光及遮挡等原因引起的三维测量数据缺失。

- [5] 姜宇,杨国辉. 基于光栅投影技术的刀具磨损三维特征提取方法[J]. *光学 精密工程*,2007,15(3):390-395.
- JIANG Y, YANG G H. 3D feature extract method for tool wear based on grating projection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):390-395. (in Chinese)
- [6] LIEBE C C, PADGETT C, CHANG J. Three dimensional image utilizing structured light [C]. *Proceeding of the IEEE Aerospace Conference*, 2004:2647-2655.
- [7] CHEN X B, XI J T, JIN Y, *et al.*. Accurate calibration for a camera-projector measurement system based on structured light projection [J]. *Opt. Laser. Eng.*, 2009,47(3/4):310-319.
- [8] ZHANG S, HUANG P S. Novel method for structured light system calibration [J]. *Opt. Eng.*, 2006,45(8):083601(1-8).
- [9] 叶海加,陈昱,邢渊. 双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配[J]. *光学 精密工程*,2004,12(1):71-

- 75.
- YE H J, CHEN G, XING Y. Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(1): 71-75. (in Chinese)
- [10] 张辉,张丽艳,陈江,等.基于平面模板自由拍摄的双目立体测量系统的现场标定[J].航空学报,2007,28(3):695-701.
ZHANG H, ZHANG L Y, CHEN J, et al.. Field calibration of binocular stereo system based on planar template and free snapping [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007,28(3):695-701. (in Chinese)
- [11] YANG R Q, CHENG S, CHEN Y ZH. Flexible and accurate implementation of a binocular structured light system [J]. *Opt. Laser. in Eng.*, 2008,46(5):373-379.
- [12] ZHANG H, ZHANG L Y, WANG H T, et al.. Surface measurement based on instantaneous random illumination [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009,22(3):316-324
- [13] SJODAHL M, SYNNERGREN P. Measurement of shape by using projected random patterns and temporal digital speckle photography [J]. *Appl. Optics*, 1999,38(10):1153-1158.
- [14] 代红军,苏显渝.数字散斑时间序列相关三维面形测量方法[J].光学学报,2001,21(10):1208-1213.
DAI H J, SU X Y. Shape measurement by digital speckle temporal sequence correlation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001,21(10):1208-1213. (in Chinese)
- [15] GRUEN A W. Adaptive least squares correlation; a powerful image matching technique [J]. *In South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, 1985,14(3):175-187.
- [16] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector [C]. *Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference, Manchester, England*, 1988:147-151.
- [17] LOWE D G. Distinctive image feature from scale-invariant keypoints [J]. *Int. J. Comput. Vision*, 2004,60(2):91-101.

作者简介:



石春琴(1983—),女,江苏南通人,博士研究生,2005年于扬州大学获得学士学位,主要从事逆向工程、非接触三维几何测量等方面的研究。E-mail: scq0303@163.com



韦虎(1974—),男,安徽舒城人,博士研究生,2006年于南京航空航天大学获得硕士学位,主要从事逆向工程、非接触三维几何测量等方面的研究。E-mail: weihu2005@163.com



刘胜兰(1974—),女,副教授,硕士生导师,1994年、1997年、2004年于南京航空航天大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事逆向工程、CAD/CAM等方面的研究。E-mail: meesliu@nuaa.edu.cn

导师简介:



张丽艳(1967—),女,教授,博士生导师,1988年于南京航空航天大学获得学士学位,1991年于西安交通大学获得硕士学位,2001年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事基于数字图像的快速柔性三维测量、产品逆向建模与复杂曲面产品质量检验、高效数控加工与仿真、设计过程集成与优化等方面的研究。E-mail: zhangly@nuaa.edu.cn