

基于双线投影与线面约束的 3D 扫描测量系统研究

王 鹏, 史瑞泽, 钟小峰, 孙长库

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:将双目传感器和线结构光有机地结合到一起,设计了一套能够对大尺寸被测物进行无导轨三维扫描的测量系统。通过标定实现双目传感器与结构光传感器坐标系的统一。提出了一种双线投影模型,实现了双目标记点的立体匹配和标记点传感器坐标的测量。设计了基于线面约束的结构光测量模型,实现了物体表面光条三维信息的获取。采用空间几何相对不变性原则实现标记点传感器坐标和世界坐标的全局匹配,进而确定在测量位置处传感器坐标系与世界坐标系的转换关系。最终将传感器实时扫描测量的物体表面的三维点云数据转换到世界坐标系下,实现对被测物三维的扫描测量,工作距离下扫描测量精度优于 0.08 mm。

关键词: 3D 测量; 双线投影; 立体匹配; 线面约束

中图分类号: TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0427001

3D scanning measurement system based on double-line projection and the line-plane constraint

Wang Peng, Shi Ruize, Zhong Xiaofeng, Sun Changku

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

Abstract: A system about 3D scanning measurement towards large objects without rails was developed in this paper, which combined binocular sensor with structured-light sensor together and achieved the unity of their coordinate systems through calibration. The double-line projection model was presented, through which the system can complete the stereo matching of the mark points in the binocular sensor and get mark points' 3D coordinates. Based on the double-line projection model, a structured-light model named line-plane constraint was designed to get the modulated information of the light strips on the objects' surface. In order to build the relationship between the sensor coordinate system and the global coordinate system, the property of the space geometrical invariability of the mark points was used. In this way, the entire system of the sensor can convert the 3D points cloud data measured at different locations to the global system in real time. Thus, the entire sensor system can complete the 3D scanning measurement of the object, the measurement precision was better than 0.08 mm within the working distance.

Key words: 3D measurement; double-line projection; stereo matching; line-plane constraint

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(51375339)

作者简介: 王鹏(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光及光电检测方面的研究。Email: wang_peng@tju.edu.cn

0 引言

随着制造行业的进步特别是精密制造行业的飞速发展,便携、快速、高精度获取被测物体表面的三维信息已成为精密测量的一个趋势。目前,针对于视觉方法的便携式扫描测量的研究问题主要集中在双目的立体匹配与结构光信息的获取^[1]。

双目立体匹配是根据已知映射关系确定不同图像中相同点并实现其在三维空间中对准。目前应用较多的立体匹配方法大部分是基于图像几何和场景约束的原理,其中以外极线约束^[2-3]应用较为广泛。在两幅图像的对应角点较多时,采用外极线约束可以将待匹配的目标点锁定在外极线上从而简化运算,并通过基本矩阵^[4]的求取保证立体匹配的正确性。但是当待匹配的特征点数量较少时,单纯地在外极线上或附近搜索目标点不能保证匹配的正确性比如共外极线造成的误匹配^[5],同时如果采用基本矩阵进一步验证必须保证公共视场的同名点对的数量。单就方法本身而言前期一般需要标定各个相机的内外参数及相对关系,也就影响其应用的便捷性。

基于结构光的测量和标定方法经过多年的发展,涌现出了多种各具特点和优势的方式方法^[6-7]。方法的改进主要集中于标定精度的提高、特征点获取的效率等方面,但是相应地导致了标定的复杂性或测量模型的适用性不强等问题。特别在视觉扫描测量中,需要将结构光传感器与双目传感器结合,实现两者功能的融合和关系的转化。这样就对结构光标定的简便性和测量模型的适用性提出了更高的要求。

关于系统的标定方法,目前采用的方式大多是基于小孔成像模型,分别标定出单个相机的内部参数,再确定两个相机坐标系之间的刚体变换关系即外参,通过标定确定光平面在相机坐标系下的平面方程,根据相机坐标系之间的旋转、平移关系,相应地也就确定了双目和结构光之间的转换关系。总体来说标定的模型参数较多、步骤较复杂,过程较为繁琐不利于操作。

文中设计了一套将双目传感器与线结构光^[8]相结合的三维扫描测量系统。构建了一种新型的双目测量模型并将其应用到双目标记点的立体匹配过程中,提出了一种新的结构光测量模型,并能通过便捷的操作完成标定并实现两者坐标系的统一。在借助于已知世界坐

标的标记点的条件下实现被测物的三维扫描测量。

1 系统结构设计

测量系统如图 1 所示,包含一个线激光器,两个 CMOS 相机,千兆以太网交换机及其他辅助机械结构,其中线激光器与右相机构成一套线结构光传感器,两个 CMOS 相机构成一套双目测量传感器。根据相机的视场角、景深、工作距离等以及线结构光传感器、双目传感器的测量要求,两个相机与激光器三者之间有一定的相对位置关系。

通过标定将由激光器和右相机组成的线结构光传感器以及由两个相机组成的双目传感器统一到同一个坐标系下即传感器坐标系。激光投射到被测物体表面之后,光条被物体表面三维所调制,被调制的光条中包含物体表面的信息。对含有光条的图像进行处理结合结构光传感器的标定参数就可以获得被测物体表面光条位置处的三维信息。

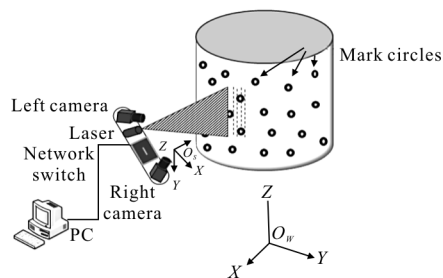


图 1 系统测量原理图

Fig.1 Measuring schematic diagram of the system

粘贴在物体表面的标记点的世界坐标可以由 V-STARS^[9]、激光跟踪仪等测得。双目传感器在测量位置处可以获得视场中标记点在测量传感器系统下的坐标,通过标记圆之间相对空间几何不变性完成标记点在测量位置处传感器坐标与世界坐标的匹配,进而确定传感器坐标系与世界坐标系的转换关系。因而可以将传感器在不同位置处由结构光测得的物体表面的三维信息转换到同一个世界坐标系下。通过传感器对物体进行扫描就可以得到物体表面连续完整的三维信息。

2 双目测量模型及标记点匹配方法

2.1 双线投影模型

双线透视投影模型如图 2 所示,空间中的一点

P , 其在左右相机图像上对应的像素坐标分别为 P_l^c (u_l, v_l) 和 P_r^c (u_r, v_r)。由成像原理可知, 点 P 应当是透视投影线 l_l, l_r 在空间的交点。 l_l 和 l_r 分别与空间两个平面 α, β 的交点为 P_l^α, P_l^β 和 P_r^α, P_r^β 。如果上述四个点的空间坐标确定, 相应的也就获得了透视投影线 l_l 和 l_r 的直线方程^[10], 如公式(1)、(2)所示。

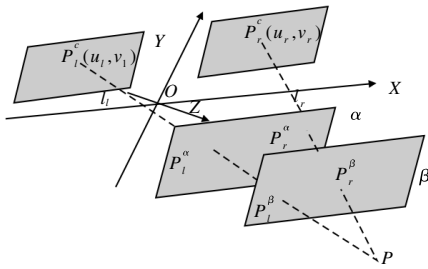


图 2 双线投影模型

Fig.2 Double-line projection model

$$\frac{x-x_{P_l^\alpha}}{x_{P_l^\beta}-x_{P_l^\alpha}} = \frac{y-y_{P_l^\alpha}}{y_{P_l^\beta}-y_{P_l^\alpha}} = \frac{z-z_{P_l^\alpha}}{z_{P_l^\beta}-z_{P_l^\alpha}} \quad (1)$$

$$\frac{x-x_{P_r^\alpha}}{x_{P_r^\beta}-x_{P_r^\alpha}} = \frac{y-y_{P_r^\alpha}}{y_{P_r^\beta}-y_{P_r^\alpha}} = \frac{z-z_{P_r^\alpha}}{z_{P_r^\beta}-z_{P_r^\alpha}} \quad (2)$$

联立公式(1)、(2)可以推出 P 点的三维坐标。进而问题就转化为建立图像点 P_l^c (u_l, v_l) 与空间点 P_l^α, P_l^β 以及 P_r^c (u_r, v_r) 与空间点 P_r^α, P_r^β 的映射关系。但是, 对于左右图像中每一个像素点都需要确定其与空间点的对应关系这样前期的工作量是相当大的。在测量坐标系 $O-XYZ$ 下, 为了使模型和方程解算更加简单以及后续标定的可行性、适用性, 可以通过分别建立左、右图像面与空间测量平面 α, β 的映射关系的方法。这里选取 α 和 β 的平面方程分别为:

$$\begin{cases} \alpha: z=a \\ \beta: z=b \end{cases} \quad (3)$$

同时空间点 $P_l^\alpha(x_l^\alpha, y_l^\alpha, a), P_l^\beta(x_l^\beta, y_l^\beta, b)$ 与左图像点 $P_l^c(u_l, v_l)$ 的映射关系可以采用 n 阶多项式表示:

$$\begin{cases} x_l^m = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} C_{ij}^m u_l^i v_l^j \\ y_l^m = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} D_{ij}^m u_l^i v_l^j \end{cases} \quad (4)$$

式中: m 为不同的空间平面可以为 α 和 β 。 C_{ij}^m, D_{ij}^m 为映射模型的参数, 通过标定获得。同理, 空间点 $P_r^\alpha(x_r^\alpha, y_r^\alpha, a), P_r^\beta(x_r^\beta, y_r^\beta, b)$ 与右图像点 $P_r^c(u_r, v_r)$ 的映射关系表示为:

$$\begin{cases} x_r^t = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} C_{ij}^t u_r^i v_r^j \\ y_r^t = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} D_{ij}^t u_r^i v_r^j \end{cases} \quad (5)$$

式中: t 的意义同公式(4)中的 m 。

根据公式(1)~(5)即可由空间一点的图像坐标解算出其在双目传感器下的三维坐标。

2.2 双目标记点立体匹配

采用双线投影模型对空间点坐标进行测量时首先得确定该空间点在左右图像中所对应的图像坐标, 这就涉及到双目标记点立体匹配的问题。考虑到测量的实际情况以及视场中标记点数量, 可以将双线透视投影的方法应用到双目标记点的匹配中。具体步骤如下:

首先, 对左右图像分别进行处理获取所有标记点的图像坐标。根据上述的双线投影模型以及公式(1)~(5)可以分别确定标记点像素坐标对应的透视投影线。

其次, 以左图像中的标记点作为参考标记点其所对应的透视投影线为参考透视投影线, 以每条参考透视投影线遍历右图中标记点所对应的透视投影线, 获取两条直线的公垂线并记录符合阈值要求的透视投影线进行初步匹配筛选。

最后, 结合图像中标记点的相对位置关系进一步确定与参考透视投影线匹配的右图中标记点所确定的透视投影线, 完成双目中相同标记点的立体匹配。同时可以确定标记点在双目传感器下的三维坐标。由于误差的存在, 以两条匹配的透视投影线公垂线的中点作为对应标记点的坐标。

2.3 标记点全局匹配及坐标系转换关系

传感器对物体进行扫描测量时, 需要实时确定传感器的位置以完成测量点云数据的拼接。标记点之间的相对距离关系在传感器下和在世界坐标系下是不变的, 文中通过标记点的空间几何的不变性, 完成传感器和世界坐标中对应标记点的匹配。

标记点的传感器坐标和世界坐标的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + T \quad (6)$$

$$\text{其中, } R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \text{ 为旋转矩阵; } T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \text{ 为平移矢量。}$$

关于 R 、 T 的求取可以采用不同坐标系下对应的三对同名点求解:

$$\begin{cases} (\overrightarrow{P_1P_2})_x^g = r_1 \cdot (\overrightarrow{P_1P_2})_x^s + r_2 \cdot (\overrightarrow{P_1P_2})_y^s + r_3 \cdot (\overrightarrow{P_1P_2})_z^s \\ (\overrightarrow{P_2P_3})_x^g = r_1 \cdot (\overrightarrow{P_2P_3})_x^s + r_2 \cdot (\overrightarrow{P_2P_3})_y^s + r_3 \cdot (\overrightarrow{P_2P_3})_z^s \\ Q = \overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_2P_3} \\ (Q)_x^g = r_1 \cdot (Q)_x^s + r_2 \cdot (Q)_y^s + r_3 \cdot (Q)_z^s \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_1 、 P_2 、 P_3 分别为空间中两个不同坐标系下对应的三个点; g 、 s 为世界坐标系和传感器坐标系; x 为点坐标对应的 x 分量。同样, 用 y 分量可以求解 r_4 、 r_5 、 r_6 , 对于 r_7 、 r_8 、 r_9 可以根据正交性求解。平移矢量可以根据三个同名点确定的平移矢量取平均获得。

通过 R 、 T 的求解就可以实现传感器的定位, 同时便于将扫描测量数据转换到同一世界坐标系下。

3 结构光测量模型

结构光测量采用的单线透视投影和光平面几何约束模型即线面约束模型如图 3 所示。

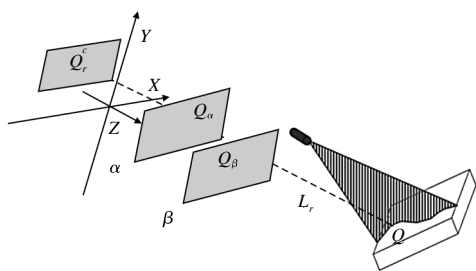


图 3 线面约束模型

Fig.3 Model of the line-plane constraint

光平面投射到被测物体并被物体表面的形貌调制, 图 3 中, Q 为被测物体光条上的一点其在右图像中的像素坐标为 $Q_r^c(u_r, v_r)$ 。结合双目测量模型中透视投影线的求取方法, 由右相机图像平面和空间平面 α 、 β 的映射关系, 即通过标定建立的被测点右图像中的像素坐标分别和空间平面 α 、 β 上的三维空间点对应的多项式模型。应用模型参数即可由被测点 Q 的右图像的像素坐标 $Q_r^c(u_r, v_r)$ 获得空间平面上点 Q_α 、

Q_β 的坐标。

由 Q_α 、 Q_β 的坐标可以确定透视投影线 L_r 的方程。显然, 在传感器的测量坐标系 O - XYZ 下, 根据空间几何关系, 被测点 Q 是直线 L_r 和光平面的交点。因而, 如果光平面在坐标系下的方程确定的话, 光平面 γ 和右相机透视投影线 L_r 的共同约束就可以确定被测点 Q 在结构光传感器下的三维坐标, 如公式 8 所示:

$$\begin{cases} \gamma: ax+by+cz+d=0 \\ L_r: \frac{x-x_{Q_\alpha}}{x_{Q_\beta}-x_{Q_\alpha}} = \frac{y-y_{Q_\alpha}}{y_{Q_\beta}-y_{Q_\alpha}} = \frac{z-z_{Q_\alpha}}{z_{Q_\beta}-z_{Q_\alpha}} = Q_\beta \end{cases} \quad (8)$$

通过上述单线透视投影和光平面约束的方法即可获得被测物光条上点在结构光传感器下的空间坐标。

4 系统标定

传感器系统的标定方法如图 4 所示, 建立传感器的测量坐标系 O - XYZ , 靶标面平行于坐标系的 XOY 面并且靶标上特征点的拓扑结构已知, Z 轴垂直于靶标面并平行于精密手动平移台移动方向, 线激光器垂直靶标面投射。

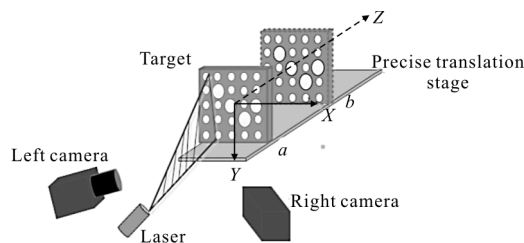


图 4 传感器系统标定方法

Fig.4 Calibration of the sensor system

对于双目而言, 双线投影模型的标定就是为了确定左右相机在位置 a 和位置 b 处的图像平面同 $z=a$ 和 $z=b$ 平面的映射函数关系。而这种映射关系可以通过多项式模型建立, 换言之就是分别确定在位置 a 和位置 b 处公式(4)、(5)中 C_{ij} 、 D_{ij} 。对位置 a 的左右图像处理获得特征点的像素坐标 $P_r(u_r, v_r)$ 、 $P_l(u_l, v_l)$ (l, r 表示 $0, 1, 2, \dots$) 以及在如图 4 所示的坐标系下根据靶标拓扑结构及精密平移台获得的特征点的在传感器测量坐标系下的坐标 $P_k^\alpha(x_k^\alpha, y_k^\alpha, \alpha)$ 。同理, 也可以确定在位置 b 处特征点的对应关系。然后将左右相机对应的特征点的坐标分别代入标定计算模型进行最小二乘求解:

$$Ge=0 \quad (9)$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & u_1 & v_1 & u_1 v_1 & u_1^2 & v_1^2 & \cdots & u_1^n & v_1^m & v_1^{-x_1} \\ 1 & u_1 & v_1 & u_1 v_1 & u_1^2 & v_1^2 & \cdots & u_1^n & v_1^m & v_1^{-y_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & u_i & v_i & u_i v_i & u_i^2 & v_i^2 & \cdots & u_i^n & v_i^m & v_i^{-x_i} \\ 1 & u_i & v_i & u_i v_i & u_i^2 & v_i^2 & \cdots & u_i^n & v_i^m & v_i^{-y_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & u_N & v_N & u_N v_N & u_N^2 & v_N^2 & \cdots & u_N^n & v_N^m & v_N^{-x_N} \\ 1 & u_N & v_N & u_N v_N & u_N^2 & v_N^2 & \cdots & u_N^n & v_N^m & v_N^{-y_N} \end{bmatrix},$$

$$e = \begin{bmatrix} C_0 & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & \cdots & C_{M-2} & C_{M-1} & 1 \\ D_0 & D_1 & D_2 & D_3 & D_4 & \cdots & D_{M-2} & D_{M-1} & 1 \end{bmatrix}^T,$$

$$M = \sum_{i=0}^n (1+i)(n+1-i)$$

通过该计算模型解得左右相机分别在位置 a 、 b 所对应的矩阵 e 完成双目的标定。右相机与光平面构成结构光传感器，双目标定中已经确定了右相机的图像平面和位置 a 、 b 平面的映射关系，通过对右图像处理

可以获得这两个位置处光条中心的像素坐标，结合右相机标定的参数 C'_{ij} 、 D'_{ij} (t 代表 a 、 b 平面) 可以获得光条特征点在平面 a 、 b 上对应的传感器下的三维点。对这两个位置处光条特征点的三维坐标进行平面拟合获取光平面在传感器测量坐标系下的平面方程，完成结构光标定。

上述双目标定和结构光平面标定都是在如图 4 中所述的坐标系下完成的，所以系统标定同时也完成了双目传感器坐标系和结构光传感器坐标系的统一。

5 实验及数据分析

5.1 标定实验

标定过程中通过精密平移台带动靶标移动，在传感器的工作距离要求下，平移台在 0~25 mm 移动范围内每隔 5 mm 左右相机分别拍摄一幅图像，并采用 0 mm 和 15 mm 位置的图像对文中提出的双线投影模型进行标定。如公式(4)、(5)所示映射关系采用的是 n 阶多项式，标定过程中选取 $n=3$ 。表 1 和表 2 为该模型左右相机的标定参数。

表 1 双线投影模型中左相机的标定参数

Tab.1 Calibration parameters of the left camera in the double-line projection model

| Mapping parameters of plane 0 mm | | | | Mapping parameters of plane 15 mm | | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------------|--------------|---------------|--------------|
| C_{ij}^0 | | D_{ij}^0 | | C_{ij}^{15} | | D_{ij}^{15} | |
| -9.727 2E+01 | -3.719 3E-02 | -9.234 8E+01 | 3.930 7E-02 | -9.761 9E+01 | -4.055 2E-02 | -9.732 0E+01 | 4.125 3E-02 |
| 2.712 7E-01 | 1.803 0E-03 | 8.513 9E+00 | 3.200 0E-05 | 2.941 5E-01 | 1.906 0E-03 | 9.016 2E+00 | 7.400 0E-05 |
| -1.496 3E-02 | 1.247 8E-02 | -4.253 6E-02 | -3.223 4E-02 | -1.634 7E-02 | 1.429 2E-02 | -4.352 1E-02 | -3.422 5E-02 |
| -5.600 0E-05 | -8.700 0E-05 | 1.436 0E-03 | 2.854 0E-03 | -4.000 0E-05 | -3.000 0E-05 | 1.467 0E-03 | 2.993 0E-03 |
| 8.253 6E+00 | 3.028 0E-03 | -3.211 7E-01 | 1.350 0E-04 | 8.753 9E+00 | 3.144 0E-03 | -3.390 7E-01 | 1.650 0E-04 |

表 2 双线投影模型中右相机的标定参数

Tab.2 Calibration parameters of the right camera in the double-line projection model

| Mapping parameters of plane 0 mm | | | | Mapping parameters of plane 15 mm | | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------------|--------------|---------------|--------------|
| C_{ij}^0 | | D_{ij}^0 | | C_{ij}^{15} | | D_{ij}^{15} | |
| -1.688 4E+02 | -4.459 4E-02 | -1.506 6E+02 | -3.884 0E-01 | -1.882 3E+02 | -4.188 2E-02 | -1.584 3E+02 | -3.996 9E-01 |
| 3.844 1E-01 | 2.136 0E-03 | 1.388 7E+01 | -2.740 0E-04 | 3.368 2E-01 | 2.055 0E-03 | 1.461 0E+01 | -3.070 0E-04 |
| -2.077 3E-02 | -5.619 4E-01 | -3.665 6E-02 | -6.900 9E-02 | -1.846 3E-02 | -5.673 3E-01 | -3.446 3E-02 | -6.894 0E-02 |
| -8.000 0E-05 | -9.000 0E-05 | 1.341 0E-03 | 6.985 0E-03 | -1.160 0E-04 | -1.280 0E-04 | 1.298 0E-03 | 6.932 0E-03 |
| 2.172 7E+01 | 8.289 0E-03 | 4.120 1E+00 | -9.100 0E-05 | 2.267 8E+01 | 8.030 0E-03 | 4.247 1E+00 | -7.000 0E-05 |

右相机同光平面组成结构光传感器,对右相机在 0 mm 和 15 mm 位置拍摄的图像进行处理,结合表 2 的标定数据拟合光平面方程完成结构光标定,光平面方程参数如表 3 所示。

表 3 光平面方程参数

Tab.3 Equation parameters of the light plane

| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> |
|-------------|-------------|--------------|-------------|
| 9.997 3E+03 | 1.921 0E+02 | -1.320 6E+02 | 2.988 6E+05 |

5.2 双目匹配和测量实验

在实验室的条件下根据相机视场条件并符合扫描测量对标记点密度需求的前提下,在被测物体上随机贴一些标记点。并用 V-STARS 拍摄并测量标记点在其所确定的坐标系下的坐标。其测量的标记点间的距离可以作为测量的参考值。设计中标记点的点密度约为 50~100 mm,传感器对所贴标记点随机进行多次测量的结果如表 4 所示。

表 4 标记点距离测量结果(单位:mm)

Tab.4 Measuring results of distances between mark points(Unit: mm)

| Reference | 39.502 | 49.382 | 57.063 | 58.495 | 60.534 | 64.548 | 67.467 | 69.044 | 93.415 | 115.954 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 1 | 39.475 | 49.381 | 57.006 | 58.481 | 60.506 | 64.519 | 67.475 | 68.982 | 93.319 | 115.898 |
| 2 | 39.473 | 49.380 | 57.018 | 58.482 | 60.508 | 64.522 | 67.330 | 68.980 | 93.318 | 115.854 |
| 3 | 39.476 | 49.373 | 57.005 | 58.477 | 60.508 | 64.523 | 67.468 | 68.984 | 93.317 | 115.846 |
| 4 | 39.475 | 49.380 | 56.998 | 58.480 | 60.506 | 64.519 | 67.491 | 68.988 | 93.319 | 115.884 |
| 5 | 39.475 | 49.390 | 56.989 | 58.479 | 60.506 | 64.523 | 67.469 | 68.990 | 93.315 | 115.871 |
| 6 | 39.476 | 49.380 | 57.021 | 58.481 | 60.504 | 64.525 | 67.486 | 68.985 | 93.315 | 115.916 |
| Average | 39.475 | 49.381 | 57.006 | 58.480 | 60.506 | 64.522 | 67.453 | 68.985 | 93.317 | 115.878 |
| S | 0.001 | 0.006 | 0.012 | 0.002 | 0.001 | 0.002 | 0.061 | 0.004 | 0.002 | 0.027 |

由表 4 可以看出,基于双线投影模型的双目测量具有较好的稳定性和可靠性,在实验中的标记点密度下测量精度优于 0.1mm。

5.3 扫描测量精度验证实验

对于扫描测量实验,如图 5 所示,在量块周围粘贴标记圆,并用 V-STARS 测量标记点的世界坐标,用该实验装置首先对量块 2 表面进行扫描,然后将量块 1 放置在量块 2 上并对其表面进行扫描。两个被测量平面的平均距离可以作为量块 1 的测量值。图 6 为标称值为 10mm 量块的扫描效果。

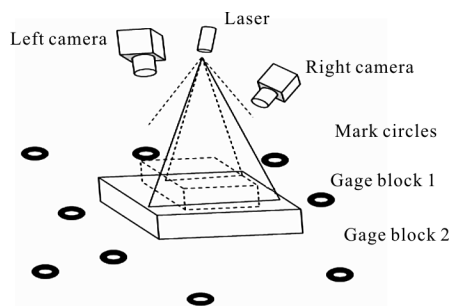


图 5 量块扫描方法

Fig.5 Scanning method of the gage blocks

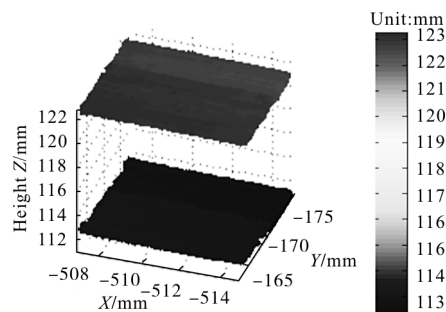


图 6 量块扫描结果

Fig.6 Scanning result of the gage block

该实验采用图 5 中的方法,对不同标称值的量块进行上述的扫描测量,测量结果如表 5 所示。由结果可知,在双目定位与结构光测量相结合的方案下的扫描测量具有较高的测量精度。

表 5 量块扫描测量结果(单位:mm)

Tab.5 Scanning measurement results of gage blocks (Unit:mm)

| Gage block size | Measurement | Error |
|-----------------|-------------|-------|
| 5 | 4.945 | 0.055 |
| 10 | 9.924 | 0.076 |
| 15 | 14.928 | 0.072 |

5.4 大尺寸扫描测量实验

针如图 1 中某圆柱形被测物体(直径约 1 m),采用该实验装置对其进行扫描,在某一高度处的局部扫描效果如图 7 所示。综上所述,该实验装置能够实现对被测物体的扫描测量,并且扫描效果能够反映出被测物体的三维形貌。



图 7 大尺寸扫描结果(局部)

Fig.7 Scanning result of big size object(local)

6 结 论

文中设计了一套三维视觉扫描测量系统。建立了一种基于双线投影的双目测量模型,并通过该模型实现左、右相机视场中标记点的匹配和三维坐标的测量。在左、右相机视场范围下双目的测量精度优于 0.1 mm。设计了一种单线透视投影与光平面约束相结合的结构光测量模型即线面约束模型。该系统通过双目定位和结构光测量可以实现对物体表面三维的扫描测量,扫描测量精度优于 0.08 mm。

参考文献:

[1] Ozenc U, Tastan O, Gullu M K. 3D object modeling by structured light and stereo vision [C]// Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2015, 23th, IEEE, 2015.

[2] Li Zhanli, Liu Hang. Improved matching method of artificial markers [J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(9): 3598-3600. (in Chinese)
李占利, 刘航. 一种改进的人工标记点匹配方法 [J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(9): 3598-3600.

[3] Han Wei, Zheng Jiangbin, Li Xiuxiu. Fast and accurate

stereo matching algorithm based on epipolar line restriction [J]. *Computer Engineering & Applications*, 2008, 44(1): 51-53. (in Chinese)

韩伟, 郑江滨, 李秀秀. 基于外极线约束的快速精确立体匹配算法[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(1): 51-53.

[4] Zheng J, Shi W. An improved algorithm of fundamental matrix estimation based on epipolar line restriction [C]// Signal Processing, 2008. 9th International Conference on IEEE, 2008: 1350-1354.

[5] Xie Zexiao, Lu Wenjuan. A binocular matching algorithm based on similar image geometric features [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(5): 171-177. (in Chinese)
解则晓, 陆文娟. 基于图像相似几何特征的双目匹配算法 [J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 171-177.

[6] Li Guannan, Tan Qingchang, Kou Ying, et al. A new method for calibrating line structured-light 3D measurement model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(11): 1334-1339. (in Chinese)
李冠楠, 谭庆昌, 寇莹, 等. 一字线结构光三维测量模型的新型标定方法[J]. *光子学报*, 2013, 42(11): 1334-1339.

[7] Sun Junhua, Zhang Guangjun, Liu Qianzhe, et al. Universal method for calibrating structured-light vision sensor on the spot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 174-177. (in Chinese)
孙军华, 张广军, 刘谦哲, 等. 结构光视觉传感器通用现场标定方法[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(3): 174-177.

[8] Paniagua Carmen, Puig Luis, J Guerrero Jose. Omnidirectional structured light in a flexible configuration[J]. *Sensors*, 2013, 13(10): 13903-13916.

[9] Lu Chengjing, Huang Guiping, Li Guangyun. Accuracy testing and application of V-STARS [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2007, 36(z1): 513-517. (in Chinese)
卢成静, 黄桂平, 李广云. V-STARS 工业摄影三坐标测量系统精度测试及应用 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(z1): 513-517.

[10] Wang Peng, Zhang Qiuzhi, Li Wenqiang, et al. Research on camera calibration method based on imaging ray tracking[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(1): 224-229. (in Chinese)
王鹏, 张求知, 李文强, 等. 基于成像光线空间追踪的摄像机标定方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(1): 224-229.