

文章编号 1004-924X(2017)07-1882-08

大视场双目立体视觉柔性标定

倪章松^{1,2*}, 顾 艺², 柳庆林², 陈 然³, 李中伟³

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072;

2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000;

3. 华中科技大学, 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:为了实现双目立体视觉系统大范围高精度三维测量,提出了一种大视场双目立体视觉系统柔性标定方法,该方法将系统中各相机内部参数标定与相机间的姿态标定进行分离,标定内部参数时,只需要令标靶相对于相机任意摆放至少三个姿态,对标靶上的编码标志点进行识别,根据标靶上编码标志点信息,建立各姿态下视图的对应关系,粗略计算标志点的初始三维坐标;建立多姿态下逆向投影误差最小的目标函数,采用非线性最小二乘优化获取精确的相机内部参数和标志点三维坐标;最后,建立基于双相机逆向投影误差最小的目标函数,优化得到精确的相机间姿态的外部参数。实验结果表明:当测量空间为 1 200 mm×1 000 mm×1 000 mm 时,立体视觉系统的测量精度优于 0.1 mm,满足大范围双目立体视觉系统的高精度测量需求。

关键词:双目立体视觉;相机标定;大视场;光束法平差;编码标志点

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172507.1882

Flexible calibration method for binocular stereo vision in large field of view

NI Zhang-song^{1,2*}, GU Yi², LIU Qing-lin², CHEN Ran³, LI Zhong-wei³

(1. *Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;*

2. *China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;*

3. *School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)*

* *Corresponding author, E-mail: nzs2000@sina.com*

Abstract: In order to achieve high-precision three-dimensional measurement for binocular stereo vision system of large scale, a flexible calibration method in large field of view was proposed, which divided the calibration method into calibrating internal parameters and external parameters. To calibrate the internal parameters, the target was required to pose at least three posture corresponding to cameras, coded target on the target should be identified, according to the information of coded mark points on the target, a corresponding relationship among bottom views under all postures was established, initial three-dimensional coordinate of code targets were roughly calculated. The objective function of minimum reverse projection error under multi-pose was established, nonlinear least squares was used to obtain accurate intrinsic parameter of camera and three-dimensional coordinate of coded mark target. Finally, based on dual-camera, the objective function of

收稿日期:2016-11-04;修订日期:2017-01-07.

基金项目:气动力专用设备配套项目(No. 201453);湖北省科技重大专项(No. 2013AEA003)

minimizing reverse projection error was established, and the accurate extrinsic parameters of pose among cameras were optimized. The experimental result shows: the measurement space is $1\ 200\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm}$, measurement accuracy of the binocular stereo vision system is superior to $0.1\ \text{mm}$, which meet the requirements of high-precision measurement for binocular stereo visual system in wide vision field.

Key words: binocular stereo vision; calibration; large field of view; bundle adjustment; coded target

1 引言

双目立体视觉测量系统目前已成为工业制造、科学研究等领域不可或缺的基础工具^[1]。例如,测量风洞中飞行器模型的三维姿态与变形,能为准确分析模型表面的气动特性和优化飞机的整体结构提供可靠的数据依据^[2-5]。然而,当测量范围较大时,受标靶制造精度的影响,测量系统的标定精度很难提升,从而导致较大的测量误差。

目前,立体视觉系统标定方法发展较为成熟,在实际工程应用中,最常用的是 R. Tasi 提出的两步法^[6-7]与张正友提出的平面标定法^[8],这些方法都需要采用较高精度的标靶来保证标定精度,并且标靶的尺度范围需要与测量视场的范围相匹配。然而,当测量视场较大时,高精度的大型标靶制造困难且难以维护,小型标靶却无法与视场范围相匹配,很难保证标定结果的稳定性。为此,刘书桂^[9]和王向军^[10]提出利用三坐标测量机和发光二极管对相机进行分区域标定,该方法克服了大型标靶制造困难和小型标靶在大视场中标定精度低的缺点,但需要使用的三坐标测量机,在现场应用中有一定的局限性。杨景豪等^[11]提出了一种双目立体视觉系统大视场自标定方法,该方法只需利用空间中的平行线和垂直线建立相机参数与特征线之间的约束方程,即可实现大视场下相机参数的标定,但测量空间中难以实现精确的平行线与垂直线,影响了标定精度。Faugeras 等^[12]提出的自标定方法能使标定结果不依赖于标靶,仅利用相机拍摄的多幅图像中相同点的对应关系来标定相机参数,虽具有较高的灵活性,但在精度和稳定性方面还有待提高。梁晋^[13]和孙楠^[14]都提出了采用大型十字标靶作为标定工具,该方法只需明确标靶上标志点之间的准确距离,解决了大型标靶的制造精度难以保证的难题,而且十字标靶能够旋转和拆卸并且方便携带。但是在某些特殊的测量环境下,受活动空间的限制,十字标靶也很难对系统进行标定。

为此,本文提出了一种精度高、柔性强的的大视场双目立体视觉系统标定方法。首先在测量场景中的刚性体上任意粘贴若干编码标志点,组成标靶,令标志点的分布范围与测量视场匹配,然后将标靶相对于相机至少摆放三个姿态,使用两个相机同时拍摄多组图像,根据标靶上编码标志点的信息,建立各姿态下的视图对应关系,采用运动恢复结构的方法计算相机的初始姿态和标靶的初始三维坐标。在此基础上,创建多姿态下逆向投影误差最小的目标函数,采用非线性最小二乘优化获取精确的相机内部参数和标志点的三维坐标;然后,建立基于双相机逆向投影误差最小的目标函数,优化得到精确的相机外部参数。该方法在无需知道标靶上标志点三维坐标的前提下实现了大视场下精确的相机标定,使标定精度不依赖于标靶的制造精度,而且对标靶形状无严格要求,使得大视场标定具备较高柔性。

2 双目立体视觉测量原理

如图1所示,双目立体视觉系统中相机成像过程通常采用小孔成像模型来描述。

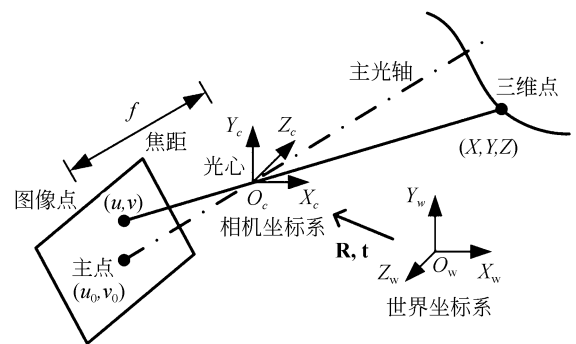


图1 相机小孔成像模型

Fig. 1 Camera pinhole imaging model

在世界坐标系下空间中任意一个三维点 $\mathbf{M}_w = [X_w, Y_w, Z_w]^T$, 它对应的二维图像点的像素坐标为 $\mathbf{m} = [u, v]^T$, 那么两者之间的映射关系

可以表示如式(1)所示。

$$\begin{cases} s_i \tilde{m}'_i = \mathbf{A}_i [\mathbf{R}_i | \mathbf{t}_i] \tilde{\mathbf{M}}_w \\ \mathbf{m}_i = \mathbf{m}'_i + \theta(k_i, \mathbf{m}'_i) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\tilde{\cdot}$ 为齐次坐标, i 为相机索引, s_i 为比例因子, $\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} ax_i & \gamma & u_i \\ 0 & ay_i & v_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为相机的内部参数矩阵, ax_i 和 ay_i 分别是水平和垂直两个方向上的归一化焦距, (u_i, v_i) 是主点的图像像素坐标, γ 为相机图像两个轴的夹角。 \mathbf{m}_i 为实际观测到的图像像素坐标, \mathbf{m}'_i 为理想成像的坐标, 两者之间存在一个非线性镜头畸变的变换, 镜头畸变参数用向量 k_i 来表示, 上述参数可统称为相机的内部参数。 \mathbf{R}_i 和 \mathbf{t}_i 分别为世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵与平移向量, 也可称为相机的外部参数。

测量时, 只需找到两个图像间的对应点坐标, 则可根据方程(1)得到下列方程组。

$$\begin{cases} s_1 \tilde{m}'_1 = \mathbf{A}_1 [\mathbf{R}_1 | \mathbf{t}_1] \tilde{\mathbf{M}}_w \\ s_2 \tilde{m}'_2 = \mathbf{A}_2 [\mathbf{R}_2 | \mathbf{t}_2] \tilde{\mathbf{M}}_w \end{cases} \quad (2)$$

其中, s_1, s_2 分别是两个相机的比例因子, \tilde{m}'_1 和 \tilde{m}'_2 是两个相机中对应点的图像坐标, $\tilde{\mathbf{M}}_w$ 为待求解的三维坐标, 可通过最小二乘法进行求解。

3 系统参数标定

系统标定的本质是通过已知的多个三维点坐标和对应的二维图像点坐标, 求解相机的内部参数(焦距、主点坐标、镜头畸变)和外部参数(相机坐标系在世界坐标系下的姿态), 其求解精度直接决定了系统的测量精度。 本文系统参数标定流程如图 2 所示, 首先由左右相机同时对标靶拍摄多组图像, 根据标靶上编码标志点的信息, 建立各相机多个姿态下视图的对应关系, 并计算相机的初始姿态和标靶的初始三维坐标; 然后创建多姿态下逆向投影误差最小的目标函数, 采用非线性最小二乘优化获取精确的相机内部参数和标志点的三维坐标; 最后, 建立基于双相机逆向投影误差最小的目标函数, 优化得到精确的相机外部参数。

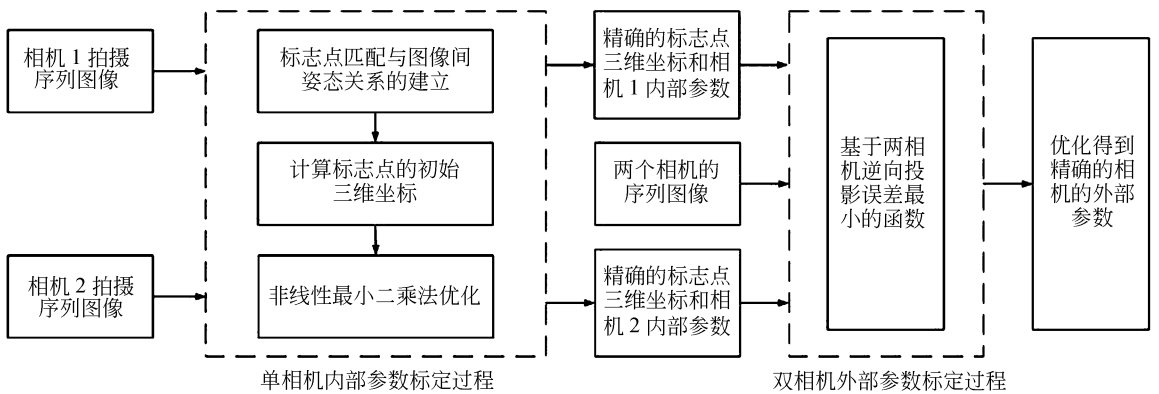


图 2 标定流程

Fig. 2 Flow chart of camera calibration

3.1 标志点的编码与解码

为快速建立各姿态下视图中标志点的对应关系, 构建其初始三维坐标, 需要对标志点进行识别。 本文使用编码标志点进行标定, 以实现标志点的自动识别。 如图 3(a) 和 (b) 所示, 编码标志点是由提供位置信息的内圆和提供编码信息的编码环构成, 内圆通过圆心提取算法计算图像中的椭圆圆心, 从而精确定位标志点位置。 编码环按

照角度被平均分为 15 份, 每份根据黑白颜色确认为一个二进制中的“0”或“1”(黑色代表“0”, 白色代表“1”), 利用这 15 个二进制的编码就可以确定编码标志点的编号。

编码标志点的解码是编码的逆过程, 其基本思想是根据编码环上的灰度变化, 以任意编码环带为起点, 逆时针读取二进制位组成 15 位的二进制串, 所有二进制串的最小数对应的十进制数为

该编码标志点的编号。例如,图 3(b)中编码标志点的二进制串,根据二进制串起点不同,可以表示为下列二进制串:110111101100000,101111011000001,011110110000011,111101100000110,111011000001101,110110000011011,101100000110111,011000001101111,110000011011110,100000110111101,000001101111011,000011011110110,000110111101100,001101111011000,011011110110000,其中二进制串 000001101111011 对应的十进制数最小,为 891,则图 3(b)中编码标志点的编号为 891。

根据上述编码标志点的编码规律,本文提出了一种编码标志点的精确识别算法。首先使用 Otsu^[15]算法提取椭圆边缘环状邻域,并对环状邻域点进行椭圆拟合来求解椭圆参数;根据圆度与椭圆参数约束排除图像中其他圆形图案;然后通过计算编码环段灰度梯度寻找灰度跳变点;最后计算编码弧段对应的圆心角来确定编码环带的编码值。其具体流程如下。

如图 3(c)所示,椭圆 D 为标志点圆心提取时识别出的椭圆,椭圆 A、C 分别为对应编码环带的外边界和内边界,椭圆 B 介于椭圆 A、C 之间。

(1)根据椭圆 D 找到椭圆 B 上各点在图像中的位置,并对其进行亚像素插值来计算灰度梯度;

(2)找到椭圆 B 上灰度梯度大于平均灰度梯度 k 倍的点,这些点即为编码环上的灰度跳变点,本文设 $k=3$;

(3)将步骤(2)中的点坐标按公式(3)逆仿射为单位圆坐标,并计算相邻两点间的角度:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/a & \\ & 1/b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \end{pmatrix}, \tag{3}$$

其中: X 、 Y 分别为椭圆 B 上灰度跳变点的在图像坐标系上的横、纵坐标, X' 、 Y' 为单位圆上对应的横、纵坐标, X_0 、 Y_0 为椭圆 B 在图像上的中心坐标, a 、 b 分别为椭圆 B 的长、短轴, α 为椭圆 B 与图像坐标系上 X 轴的旋转角;

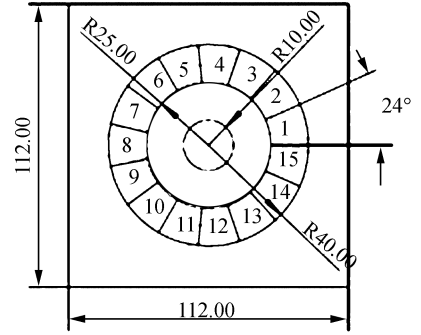
(4)识别每个编码环带上的颜色,计算其所包含的单位环段的数量;

(5)按记录顺序将编码环记录为 15 位二进制串;

(6)将得到的二进制串循环移动 15 次,取最

小的二进制串对应的十进制数为最后的解码值。

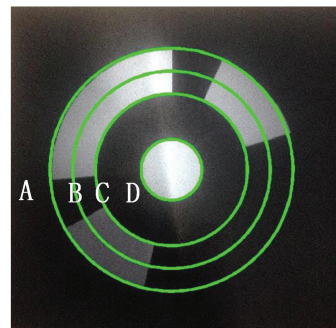
完成编码标志点的解码后可进行标靶上编码标志点的排序,从而方便可靠地确定多幅图像之间相同点的对应关系,也解决了图像点与空间点的对应问题。



(a) 编码标志点设计图
(a) Design coded target



(b) 编码标志点图
(b) Coded target



(c) 解码示意图
(c) Schematic of decoding

图 3 编码标志点
Fig. 3 Coded target

3.2 相机内部参数的标定

根据所建立的图像间的对应关系,首先计算图像间的粗略姿态关系,重建出标靶上标志点的初始三维坐标;然后构建基于逆向投影误差最小的非线性最小二乘优化模型,迭代优化得到精确的相机内部参数。通常图像间对应点 m_1 和 m_2 的关系可以用极几何约束来描述,可表示为如式(4)。

$$m_1^T F m_2 = 0, \quad (4)$$

其中: F 为基本矩阵,包含了两视图间所有的几何关系。假设已知两个相机的内部参数 A_i 和相机间的姿态关系 R 和 t ,则有:

$$F = A_1^T R [t]_x A_2 = A_1^T E A_2, \quad (5)$$

其中: E 为本质矩阵,包含了相机间的姿态关系, $[t]_x$ 则是由 t 定义的反对称矩阵。因此,只需通过图像间的多个对应点,采用经典的 8 点算法估算相机间的基本矩阵,并根据硬件制造厂商提供的初始内部参数矩阵,即可求解本质矩阵 E 。然后通过对 E 进行 SVD 分解,可求解出相机间的旋转平移矩阵 R 和 t 。

标定过程中,首先以相机第一个姿态下的相机坐标系作为世界坐标系,根据对应点信息分别计算其他姿态下相机坐标系与第一个姿态的坐标转换关系,这样便能获得初始的每个姿态下相机的外部参数和标靶初始三维坐标。然后,建立基于逆向投影误差最小的目标函数,优化得到精确的相机内部参数和标靶三维坐标。

设标靶上有 n 个圆心点,并且标靶在空间中摆放了 m 个位姿,那么标靶的第 i 个位姿的第 j 个圆心点图像点可表示为 m_{ij} ,其目标方程如式(6)所示。

$$err = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| m_{ij} - p(A, K, R_i, t_i, M) \|, \quad (6)$$

其中: p 为一个投影方程,将三维点投影到二维平面上; A 为相机的内部参数,其初始值可以使用相机的出厂参数; K 是畸变系数,包含了相机镜头的切向畸变和径向畸变; M 为标志点的三维坐标,其初值由上述单相机两幅图像三维重构得到。当所有的逆向投影误差之和 err 最小时,即可得到 A 、 K 、 M 的最优解。该问题实际上是非线性最小二乘问题,可以使用列文伯格(Levenberg-Marquardt, LM)算法求解。图 4 为相机内部参数求解流程。

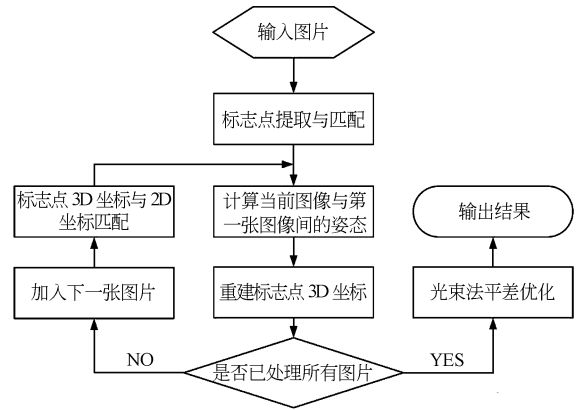


图 4 相机内部参数求解流程图

Fig. 4 Flow chart of calculating intrinsic parameters

3.3 相机外部参数的标定

当标定完两个相机的内部参数后,可进一步计算系统的外部参数。一般选取左相机坐标系为世界坐标系,相机的外部参数即为右相机到左相机的旋转矩阵 R 和平移向量 t 。图 5 表示的是左右相机坐标系的转换关系。 R 、 t 可用 R_{1i} 、 t_{1i} 、 R_{2i} 、 t_{2i} 表示。

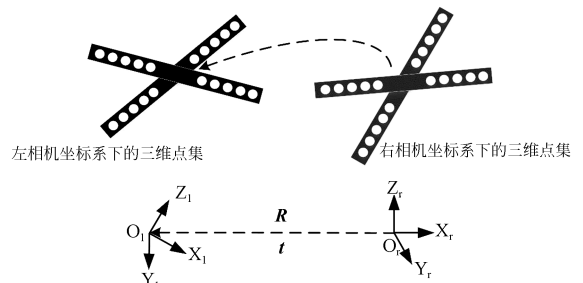


图 5 相机外部参数的求解示意图

Fig. 5 Schematic of calculating extrinsic parameters

选用右相机的逆向投影误差作为误差模型建立的目标函数。设标靶上有 n 个圆心点,并且标靶在空间中摆放了 m 个位姿,那么标靶的第 i 个位姿的第 j 个圆心点可表示为 m_{2ij} ,其目标方程如式(8)。

$$\begin{cases} R = R_{2i} R_{1i}^{-1} \\ t = t_{2i} - R_{2i} R_{1i}^{-1} t_{1i} \end{cases} \quad (7)$$

$$err = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| m_{1ij} - p(A_1, K_1, R_{1i}, t_{1i}, M) \| + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| m_{2ij} - p(A_2, K_2, R_{1i}, t_{1i}, R, t, M) \|, \quad (8)$$

其中: A_2 、 K_2 分别为右相机的内部参数和畸变

参数; \mathbf{M} 为式(5)计算得出的标志点三维坐标。当所有的逆向投影误差之和 err 最小时,即可得到 \mathbf{R} 、 \mathbf{t} 的精确解。此时优化出的平移向量 \mathbf{t} 与真实的平移向量相差一个比例系数 s ,可通过 $s=l_i/l_o$ 计算求得。其中, l_i 为已知的标靶上两个标志点之间的距离, l_o 为优化重建后对应两点之间的距离。为了得到精确的外部参数,一般使用标靶端部两点之间的距离求解比例系数。

4 实验验证

4.1 大视场标定实验

利用所提的大视场双目立体视觉相机标定算法,对双目立体视觉测量系统进行标定。如图 6 所示,系统由两个 130 万像素的 Basler acA1300-30gm GigE 相机和连接杆组成,相机像元大小为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$,分辨率为 $1\,296 \text{ pixel} \times 966 \text{ pixel}$,

镜头采用的是施耐德的 8 mm 定焦镜头。标靶由一字标尺和一定数量的编码标志点组成,且一字标尺上标志点间的距离已知。标定时,将测量系统摆放 12 个姿态,拍摄标靶图像。内参标定结果如表 1 所示。

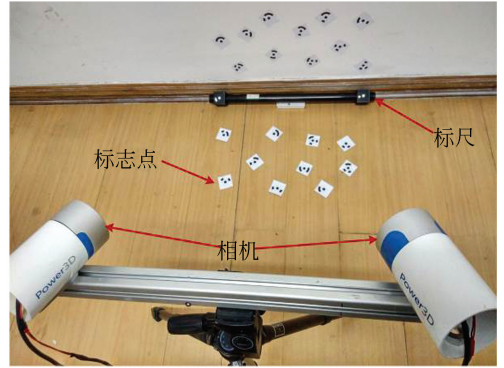


图 6 双目立体视觉测量系统标定图

Fig. 6 Calibration of binocular stereo vision measurement system

表 1 两个相机的内部参数

Tab.1 Interior parameters of two cameras

内参数	f_x/pixel	f_y/pixel	u_0	v_0	A_1	A_2	A_3	$B_1/\times 10^{-4}$	$B_2/\times 10^{-4}$
相机 1	2 211.198 3	2 210.966 7	641.843 9	489.869 5	-0.100 8	0.160 4	-0.117 7	3.000 8	2.492 1
相机 2	2 209.625 9	2 209.574 1	643.879 8	487.390 8	-0.111 2	0.140 9	-0.019 3	1.874 3	5.604 8

以相机 1 的相机坐标系作为世界坐标系,两个相机的外部参数即旋转矩阵与平移向量的计算结果如下:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 1.000\,0 & 0.000\,0 & 0.000\,0 \\ 0.000\,0 & 1.000\,0 & 0.000\,0 \\ 0.000\,0 & 0.000\,0 & 1.000\,0 \end{pmatrix}, \mathbf{T}_1 = \begin{pmatrix} 0.000\,0 \\ 0.000\,0 \\ 0.000\,0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} 0.934\,8 & -0.000\,8 & 0.355\,3 \\ 0.002\,5 & 0.999\,9 & -0.004\,2 \\ -0.355\,2 & 0.0048 & 0.9348 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{pmatrix} -738.058\,1 \\ 1.371\,5 \\ 89.851\,9 \end{pmatrix}.$$

为评价所提标定算法的精度,根据标定结果中相机的内、外部参数将重建出的标靶上标志点三维坐标投影到像平面上,计算其重投影误差,使用重投影误差来评价算法的精度。如表 2 所示为 12 个姿态下标靶在两个相机像平面上的重投影

表 2 重投影误差

Tab.2 Reprojection error in images (pixel)

标靶姿态	相机 1		相机 2	
	最大误差	标准偏差	最大误差	标准偏差
1	0.124 9	0.042 8	0.235 1	0.064 1
2	0.158 1	0.051 2	0.182 9	0.051 3
3	0.189 0	0.039 7	0.143 1	0.031 2
4	0.098 1	0.029 6	0.089 6	0.021 7
5	0.183 5	0.053 7	0.174 1	0.049 8
6	0.217 3	0.065 9	0.197 3	0.059 7
7	0.118 2	0.048 2	0.216 4	0.067 6
8	0.125 7	0.037 5	0.158 7	0.047 8
9	0.167 2	0.041 5	0.175 2	0.052 1
10	0.121 1	0.036 2	0.117 8	0.032 4
11	0.087 9	0.021 6	0.095 7	0.025 3
12	0.137 5	0.047 5	0.164 1	0.051 0

误差。从中可以看出,最大重投影误差小于 0.25 像素,标准偏差小于 0.07 像素,证明所提的标定方法具有较高的精度。

4.2 标准长度测量实验

参照德国 VDI/VDE-2634^[16] part1 精度测试标准,本文以长度为 1 001.672 mm 的高精度碳纤维一字标尺作为长度基准,使用上述双目立体视觉系统对其进行多次不同角度的拍摄并计算出标尺上标志点的距离,通过与标准长度进行对比来评价本文测量系统在测量空间的测量精度。实验中测量范围为 1 200 mm×1 000 mm×1 000 mm。首先对相机进行标定,然后将一字标尺多角度的摆放,均匀分布于视场范围,通过测量系统进行拍摄。拍摄两组,每组 7 个位置,如图 7 所示,共计 28 张图像。标志点之间的距离重建结果如图 8 所示。在一字标尺的 14 次测量实验中,测量结果的绝对误差最大值为 0.097 mm,最小值为 0.003 mm,平均值为 0.011 mm。证明本文所使用的双目立体视觉测量系统能达到较高的测量精度。



图 7 实验现场示意图

Fig.7 Schematic of experiment field

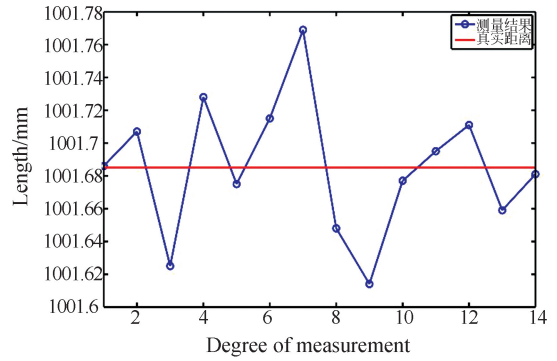


图 8 标尺上标志点之间的距离重建结果(单位:毫米)

Fig.8 Reconstruction of the distance between two coded target(mm)

5 结 论

本文针对在大视场范围内双目立体视觉测量系统难以精确测量大型模型并获取准确数据的难题,提出了大视场双目立体视觉系统柔性标定方法,并介绍了双目立体视觉测量原理,编码标志点解码方法与大视场相机标定原理。提出的方法无需预先知道标靶上标志点的三维坐标,使标定精度不依赖于标靶的制造精度,且对标靶的形状没有严格的要求,使标靶的形状可根据现场的情况自由定制,具备较高柔性。通过实验验证:使用本文提出的标定方法,双目立体视觉测量系统在视场为 1200 mm×1000 mm×1000 mm 的范围内的测量精度优于 0.1 mm。满足大视场双目立体视觉测量系统的测量要求。

参考文献:

[1] 叶声华, 郝继贵, 王仲, 等. 视觉检测技术及应用[J]. 中国工程科学, 1999, 1(1): 49-52, 62.
YE S H, ZHU J G, WANG ZH, *et al.*. Visual inspection technology and its application [J]. *Engineering Sciences*, 1999, 1(1): 49-52, 62. (in Chinese)

[2] 陈丁, 吕计男, 季辰, 等. 双目视觉技术在高超声速颤振风洞试验中的应用[J]. 实验力学, 2015, 30(3): 381-387.
CHEN D, LV J N, JI CH, *et al.*. Application of binocular vision measurement in hypersonic flutter

wind tunnel experiment [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2015, 30(3): 381-387. (in Chinese)

[3] 范洁川. 风洞试验手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
FAN J CH. *Handbook of Wind Tunnel Test* [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002. (in Chinese)

[4] 王勋年. 低速风洞试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
WANG X N. *Experiments in Low Speed Wind Tunnel* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)

- [5] 宋晋, 马军, 蒋敏, 等. 基于立体视觉系统的风洞尾旋试验测量方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(11): 2646-2648.
SONG J, MA J, JIANG M, *et al.*. Measurement method research of spin test in wind tunnel based on stereo vision system [J]. *Computer Measurement & Control*, 2011, 19(11): 2646-2648. (in Chinese)
- [6] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- [7] TSAI R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 1986: 364-374.
- [8] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [9] 刘书桂, 姜珍珠, 董英华, 等. 采用移动光靶标的分区相机标定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 259-265.
LIU SH G, JIANG ZH ZH, DONG Y H, *et al.*. Sub-regional camera calibration based on moving light target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 259-265. (in Chinese)
- [10] 王向军, 卞越新, 刘峰, 等. 远距离三维坐标测量中双目视觉系统结构参数的优化[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2902-2908.
WANG X J, BIAN Y X, LIU F, *et al.*. Optimization of structural parameters of binocular vision system in remote 3-D coordinate measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2902-2908. (in Chinese)
- [11] 杨景豪, 刘巍, 刘阳, 等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 300-308.
YANG J H, LIU W, LIU Y, *et al.*. Calibration of binocular vision measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 300-308. (in Chinese)
- [12] FAUGERAS O D, LUONG Q T, MAYBANK S J. Camera self-calibration: theory and experiments [C]. *European Conference on Computer Vision*, Springer, 1992: 321-334.
- [13] 梁晋, 肖振中, 刘建伟, 等. 大型飞机三维光学快速测量建模关键技术研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(6): 648-651, 656.
LIANG J, XIAO ZH ZH, LIU J W, *et al.*. Study on the technologies of rapid three-dimensional optical measurement and modeling for large airplane [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(6): 648-651, 656. (in Chinese)
- [14] 孙楠, 张丽艳, 叶南, 等. 基于十字靶标的双目立体测量系统标定[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412001.
SUN N, ZHANG L Y, YE N, *et al.*. Calibration of binocular stereo measurement system based on calibration cross [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412001. (in Chinese)
- [15] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [16] Optical 3D measuring systems-multiple view systems based on area scanning [S]. VDI/VDE 2634 Blatt3, 2006. German. ICS17.040.01.

作者简介:



倪章松(1973-),男,安徽太湖人,高级工程师,1997年于西南科技大学获得学士学位,2006年于国防科学技术大学获得工程硕士学位,主要从事低速风洞试验技术研究。E-mail: nzs2000@sina.com