

立体视觉传感器的一种灵活靶标新标定方法

刘 震 尚 砚 娜

(北京航空航天大学“精密光机电一体化技术”教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要 为了解决大视场立体视觉传感器标定难题,提出一种基于灵活靶标的立体视觉传感器现场标定方法。该方法根据立体视觉传感器视场范围,灵活摆放多个小平面靶标,并通过刚性连接装置连接;再将灵活靶标在立体视觉传感器视场前自由移动多次(至少两次),以小靶标之间位置关系不变为约束条件,求解两个摄像机之间的转换矩阵;最后通过非线性优化方法得到转化矩阵的最优解,完成立体视觉传感器现场标定。经实验证明,该方法的标定精度优于小靶标,可得到与大靶标接近的标定精度。

关键词 机器视觉;立体视觉;灵活靶标;大视场;现场标定

中图分类号 TP212.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0315001

Novel Calibration Method for Stereo Vision Sensor Using Flexible Target

Liu Zhen Shang Yanna

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract In order to solve the calibration problem of the stereo vision sensor with large field-of-view (FOV), a novel calibration method using flexible target is proposed. According to the stereo vision sensors' FOV, several small planar targets are combined by the rigid connection device. The flexible target is moved in front of the stereo vision sensor several times (at least two times) without restriction, and the transformation matrix between the two cameras is solved according to the invariance of the relative positions between small planar targets. The transformation matrix is optimized using the nonlinear optimization method. Experimental result shows that the accuracy of the proposed method is higher than that of a small target, and close to that of a large target.

Key words machine vision; stereo vision; flexible target; large field of view; on-site calibration

OCIS codes 150.1488; 150.1135; 150.4232

1 引 言

大视场立体视觉检测及相应的标定技术目前已经广泛应用于大型构件尺寸检测等工业测量领域^[1~6]。大视场立体视觉传感器测量精度是立体视觉传感器实现大型构件高精度检测的关键,研究现场复杂条件下大视场立体视觉传感器标定方法具有重要意义。

传统的立体视觉传感器标定方法多采用三维(3D)靶标法^[7]、平面靶标法^[8,9]和一维靶标^[10,11]。大尺寸 3D 和二维(2D)靶标体积大、携带不便,不适

用于大视场立体视觉传感器现场标定。一维靶标加工较简单,但大视场立体视觉传感器标定仍需要较长的一维靶标,这给运输、携带和使用都带来不便。孙楠等^[12]采用十字靶标标定大视场立体视觉传感器,同采用一维靶标相同,该方法也面临着需要加工大型靶标的问题。张健新等^[13]提出了基于平行线消隐点理论,实现了立体视觉传感器标定,李明哲等^[14]利用神经网络进行立体视觉传感器现场标定,但以上两类方法精度不高,不适合高精度视觉测量系统。Zhang 等^[15]研究了采用球的多摄像机标定

收稿日期: 2012-09-19; 收到修改稿日期: 2012-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(51175027)和北京市自然科学基金(3132029)资助课题。

作者简介: 刘 震(1975—),男,博士,讲师,主要从事视觉处理与图像处理等方面的研究。

E-mail: liuzhen008@buaa.edu.cn

方法,该方法在实现大视场立体视觉传感器标定时,球在图像中面积较小,严重影响标定精度,因此该方法不适合实现大视场立体视觉传感器标定。

针对以上标定方法存在的局限性,本文提出一种基于灵活靶标的大视场立体视觉传感器现场标定方法。该方法通过刚性连接装置将若干小平面对标标连接在一起,小平面对标标的位置可根据立体视觉传感器视场范围在现场灵活调节。首先将连接靶标在立体视觉传感器视场前自由移动两次以上,以连接靶标中小靶标之间位置关系不变为约束条件,求解出两个视觉传感器之间的转换矩阵,然后通过非线性优化方法求出转换矩阵的最优解。该方法最大的优点是可以根据立体视觉传感器视场范围在现场灵活调节小靶标位置,更便于使用和携带,解决了大尺寸 3D 和 2D 靶标加工困难、一维靶标运输不便等难题。本文将先介绍算法基本原理,再通过实验验证该算法的可行性。

2 立体视觉传感器数学模型

由两台摄像机组成的立体视觉传感器数学模型如图 1 所示。 $O_{c1}x_{c1}y_{c1}z_{c1}$ 为摄像机 1 坐标系, $O_{c2}x_{c2}y_{c2}z_{c2}$ 为摄像机 2 坐标系,以 $O_{c1}x_{c1}y_{c1}z_{c1}$ 为基础建立立体视觉传感器坐标系。摄像机 1 图像坐标系为 $O_{i1}u_{i1}v_{i1}$,摄像机 2 图像坐标系为 $O_{i2}u_{i2}v_{i2}$ 。 R_{12} , t_{12} 分别为摄像机 1 坐标系到摄像机 2 坐标系的旋转矩阵和平移矢量。

空间点 Q 在摄像机 1 坐标系下三维齐次坐标为 $q_c = [x_c, y_c, z_c, 1]^T$,在摄像机 1 图像坐标系下图像齐次坐标为 $p_1 = [u_1, v_1, 1]^T$,在摄像机 2 图像坐标系下图像齐次坐标为 $p_2 = [u_2, v_2, 1]^T$ 。其中 q_c 与 p_1 、 p_2 的关系为

$$\begin{cases} \rho_1 p_1 = A_1 [I_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1}] q_c \\ \rho_2 p_2 = A_2 [R_{12} & t_{12}] q_c \end{cases}, \quad (1)$$

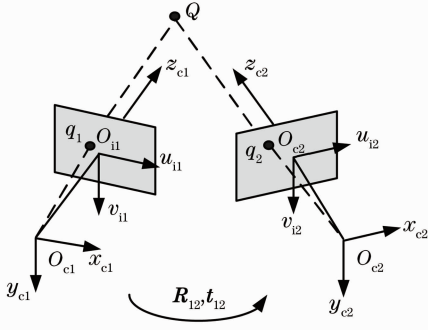


图 1 立体视觉传感器数学模型

Fig.1 Stereo vision sensor model

式中 ρ_1, ρ_2 为非零比例系数, A_1, A_2 分别为摄像机 1、2 的内部参数矩阵。摄像机内部参数矩阵 $A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 其中 f_x, f_y 分别为 u, v 轴方向的归一化焦距, (u_0, v_0) 为图像中心。摄像机内部参数还包括镜头切向畸变系数 k_1, k_2 。 $I_{3 \times 3}$ 为单位矩阵, $\mathbf{0}_{3 \times 1}$ 为零矩阵。

因此在 R_{12}, t_{12} 已知的前提下,由摄像机 1、2 获得的空间点图像坐标,根据(1)式采用最小二乘法可以获得空间点在立体视觉传感器坐标系下的三维坐标。

3 立体视觉传感器标定原理

图 2 为基于灵活靶标的立体视觉传感器标定示意图,图中小靶标 1 和小靶标 2 通过连接装置连接在一起(简称灵活靶标),两个小靶标之间位置关系在标定过程中保持不变。图 3 是实际使用中的灵活靶标,在图 3 右下角可以看到灵活靶标的分解图。

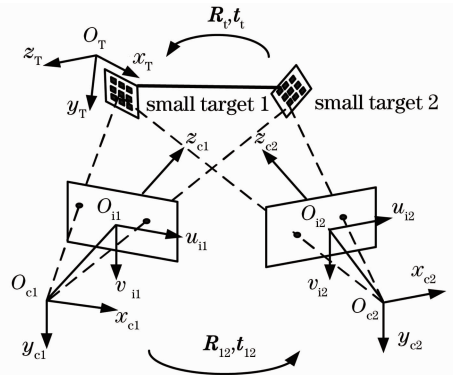


图 2 立体视觉传感器标定示意图

Fig.2 Sketch map of calibration of stereo vision sensor

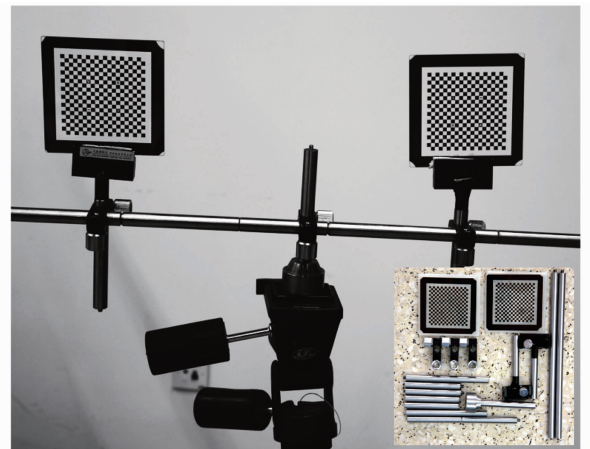


图 3 灵活靶标实物

Fig.3 Real flexible target

如图2所示, $O_T x_T y_T z_T$ 为小靶标1坐标系, 以此为基础构建灵活靶标。 R_t, t_t 为小靶标2坐标系到小靶标1坐标系的旋转矩阵和平移矢量。

立体视觉传感器标定的主要步骤为: 1) 每个摄像机内部参数已提前标定完毕, 以其中1个摄像机坐标系为基础建立立体视觉传感器坐标系; 2) 将灵活靶标在立体视觉传感器前自由摆放至少两次, 两个摄像机分别拍摄灵活靶标图像, 根据摄像机内部参数标定结果校正图像畸变; 3) 分别提取两个小靶标图像坐标计算 R_{12}, t_{12} 的线性解; 4) 根据灵活靶标中两个小靶标之间位置关系不变的约束条件, 通过非线性优化得到 R_{12}, t_{12} 的最优解。

3.1 R_{12}, t_{12} 线性解

设在灵活靶标的第 k 个摆放位置, 小靶标1特征点在 $O_{11} u_{11} v_{11}$ 和 $O_{12} u_{12} v_{12}$ 坐标系下图像坐标分别为 p_{11}^k 和 p_{12}^k , 在 $O_{c1} x_{c1} y_{c1} z_{c1}$ 和 $O_{c2} x_{c2} y_{c2} z_{c2}$ 坐标系下三维齐次坐标分别为 q_1^k 和 q_2^k , 小靶标2特征点在 $O_{11} u_{11} v_{11}$ 和 $O_{12} u_{12} v_{12}$ 坐标系下图像坐标分别为 p_{21}^k 和 p_{22}^k , 在 $O_{c1} x_{c1} y_{c1} z_{c1}$ 和 $O_{c2} x_{c2} y_{c2} z_{c2}$ 下三维齐次坐标分别为 q_1^k 和 q_2^k 。

设定两个摄像机的内部参数已经标定完毕。根据摄像机内部参数, 通过 $p_{11}^k, p_{12}^k, p_{21}^k$ 和 p_{22}^k 分别计算小靶标1坐标系到摄像机1坐标系的旋转矢量 R_{111} 和平移矩阵 t_{111} 、小靶标1坐标系到摄像机2坐标系的旋转矩阵 R_{112} 和平移矢量 t_{112} 、小靶标2坐标系到摄像机1坐标系的旋转矩阵 R_{211} 和平移矢量 t_{211} 、小靶标2坐标系到摄像机2坐标系的旋转矩阵 R_{212} 和平移矢量 t_{212} , 再求解小靶标上特征点在摄像机坐标系下的三维坐标 q_1^k, q_2^k, q_1^k 和 q_2^k 。

根据两个小靶标坐标系分别与两个摄像机坐标系之间的旋转矩阵和平移矢量, 通过下式求解 R_t, t_t :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} R_t & t_t \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{111} & t_{111} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_{211} & t_{211} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} R_t & t_t \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{112} & t_{112} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_{212} & t_{212} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

根据刚体变换关系, q_1, q_2 与 \hat{q}_1, \hat{q}_2 之间关系为

$$\begin{cases} \hat{q}_1^k = \begin{bmatrix} R_{12} & t_{12} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} q_1^k \\ \hat{q}_2^k = \begin{bmatrix} R_{12} & t_{12} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} q_2^k \end{cases} \quad (3)$$

任意选取3个以上非共线靶标特征点, 通过(3)式求解 R_{12}, t_{12} 。为了提高 R_{12}, t_{12} 的求解精度, 可选

取多个非共线靶标特征点, 罗列多个如(3)式的方程, 通过最小二乘法求解 R_{12}, t_{12} 。

3.2 非线性优化

设小靶标2特征点在小靶标1坐标系、小靶标2坐标系下三维坐标分别为 \bar{q}_{t2} 和 q_{t2} 。可得 \bar{q}_{t2} 和 q_{t2} 的关系为

$$\bar{q}_{t2} = \begin{bmatrix} R_t & t_t \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} q_{t2} \quad (4)$$

根据(4)式求解出 R_t, t_t , 将小靶标2上特征点三维坐标转换到小靶标1坐标系下。

设在灵活靶标第 k 个摆放位置, $\bar{p}_{11}^k, \bar{p}_{12}^k$ 分别为小靶标1特征点在摄像机1和摄像机2图像坐标系下投影图像坐标, $\bar{p}_{21}^k, \bar{p}_{22}^k$ 分别为小靶标2特征点在摄像机1和摄像机2图像坐标系下投影图像坐标。

根据摄像机或像模型可得

$$\begin{cases} \rho_1 \bar{p}_{11}^k = A_1 [R_{111} & t_{111}] q_{t1} \\ \rho_2 \bar{p}_{21}^k = A_1 [R_{111} & t_{111}] \bar{q}_{t2} \\ \rho_3 \bar{p}_{12}^k = A_2 [R_{112} & t_{112}] [R_{111} & t_{111}] q_{t1} \\ \rho_4 \bar{p}_{22}^k = A_2 [R_{112} & t_{112}] [R_{111} & t_{111}] \bar{q}_{t2} \end{cases} \quad (5)$$

式中 q_{t1} 为小靶标1特征点在小靶标1坐标系下的三维坐标。

假设图像噪声为高斯分布且独立分布, 则相应的优化目标函数可表示为

$$f(a) = \min \left[\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 d^2(p_{ij}^k, \bar{p}_{ij}^k) \right], \quad (6)$$

式中 $a = [R_{12}, t_{12}, R_{111}, t_{111}, R_t, t_t]$, d 为 p_{ij}^k 与 \bar{p}_{ij}^k 之间的距离, n 为灵活靶标摆放位置最大次数, $k=1, 2, \dots, n$ 。

采用非线性优化方法(如 Levenberg-Marquardt 法^[16]), 可得到 R_{12}, t_{12} 在最大似然准则下的最优解。

4 实验结果

不失一般性, 采用两台配有 8 mm 施耐德(Schneider)镜头的 Allied Vision Technologies 公司(AVT)数码相机组成大视场立体视觉传感器, 其中数码相机分辨率为 2452 pixel \times 2056 pixel, 视场范围为 1600 mm \times 1200 mm。

为了便于和大平面靶标进行精度评价, 实验中采用液晶电视生成靶标。在大靶标区域内选取两个大小相同的小靶标组成灵活靶标, 特征点数量为 4 \times 4, 特征点间距为 26.5 mm(间距 50 pixel, 每个像素间距为 0.53 mm)。两个小靶标之间距离为 874.5 mm。图4为一组立体视觉传感器中两个摄

像机拍摄的标定图像。图 4 中，“large target”表示大靶标，“sub-target 1”和“sub-target 2”组成灵活靶标，“small target”表示小靶标。

为了验证算法的有效性，分别进行三组实验：第一组实验采用灵活靶标，根据本文方法标定立体视觉传感器；第二组实验采用大靶标，根据文献[17,18]方

法标定立体视觉传感器；第三组实验采用与灵活靶标中小靶标面积相同的小靶标，根据文献[17,18]方法标定立体视觉传感器。其中前两组实验靶标在摄像机前合适位置处摆放 7 次，第三次实验小靶标在摄像机前摆放 13 次。三组实验采用相同的摄像机内部参数，具体摄像机内部参数标定结果如表 1 所示。

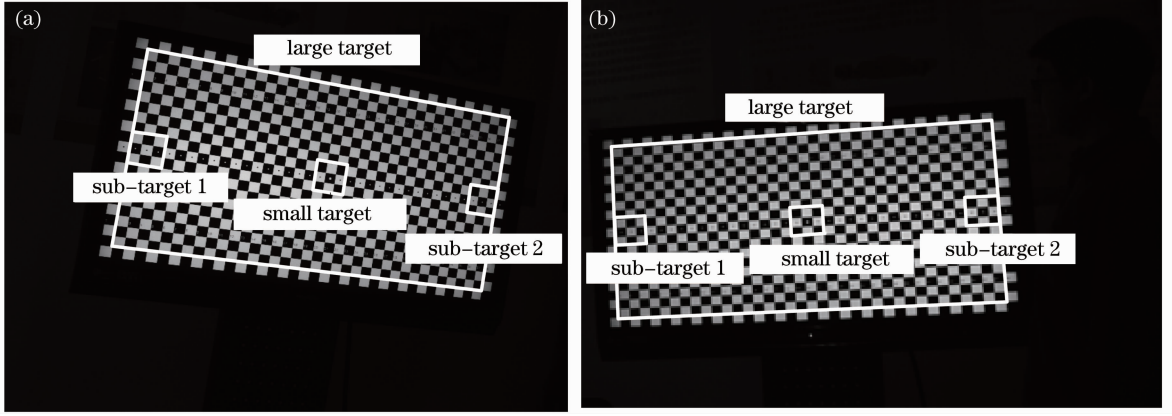


图 4 标定用靶标图像。(a)摄像机 1 拍摄的靶标图像；(b)摄像机 2 拍摄的靶标图像

Fig. 4 Images used in calibration. (a) Image captured by camera 1; (b) image captured by camera 2

表 1 两个摄像机的内部参数标定结果

Table 1 Calibration results of camera intrinsic parameters

	f_x	f_y	u_0	v_0	k_1	k_2
Camera 1	5174.0	5172.3	1218.9	980.4	-0.2110	0.4857
Camera 2	5187.1	5185.6	1235.7	987.9	-0.2304	0.6768

根据立体视觉传感器拍摄的标定图像，分别采用两个小靶标组成的灵活靶标、大靶标和小靶标完成立体视觉传感器标定，具体立体视觉传感器标定结果如下。

采用本文方法标定得到的 R_{12}, t_{12} 为

$$R_{12} = \begin{bmatrix} 0.8194 & 0.1995 & 0.5373 \\ -0.2363 & 0.9717 & -0.0005 \\ 0.5222 & 0.1266 & 0.8434 \end{bmatrix},$$

$$t_{12} = \begin{bmatrix} -1708 \\ 149.1 \\ 639.8 \end{bmatrix}.$$

采用大靶标标定得到的 R_{12}, t_{12} 为

$$R_{12} = \begin{bmatrix} 0.8201 & 0.2022 & 0.5353 \\ -0.2385 & 0.9711 & 0.0015 \\ -0.5201 & -0.1265 & 0.8447 \end{bmatrix},$$

$$t_{12} = \begin{bmatrix} -1727 \\ 153.9 \\ 661.9 \end{bmatrix}.$$

采用小靶标标定得到的 R_{12}, t_{12} 为

$$R_{12} = \begin{bmatrix} 0.8202 & 0.2012 & 0.5355 \\ -0.2371 & 0.9715 & -0.0018 \\ -0.5206 & -0.1255 & 0.8445 \end{bmatrix},$$

$$t_{12} = \begin{bmatrix} -1751 \\ 164.4 \\ 633.2 \end{bmatrix}.$$

为了评估立体视觉传感器标定精度，将大靶标在测量区域任意放置 4 次，立体视觉传感器拍摄大靶标图像，根据表 1 的标定结果校正图像畸变。分别采用灵活靶标、大靶标、小靶标的标定结果，测量靶标上特征点间距为 901 mm 的两个点，并将获得的测量值与真实值(901 mm)进行比对，得到立体视觉传感器测量点距的标准差(Std)和均方根(RMS)误差。具体测量结果及测量误差如表 2~4 所示。表 2~4 中 D_i 表示两点之间的真实距离， D_m 表示两点之间的测量距离，Error 表示两者的偏差。

由表 5 所示测量精度评论结果可以看出采用灵活靶标的测量精度接近大靶标、好于小靶标。

表2 灵活靶标测量结果
Table 2 Measurement results of flexible targets

Point 1			Point 2			D_i/mm	D_m/mm	Error /mm
x/mm	y/mm	z/mm	x/mm	y/mm	z/mm			
498.23	-176.78	3130.83	-311.41	-312.92	2762.45	901	899.86	-1.14
460.09	85.35	3117.26	-349.08	-50.70	2748.47	901	899.59	-1.41
488.64	-122.27	3167.77	-362.05	-258.66	2908.87	901	899.61	-1.39
450.52	139.92	3154.45	-399.64	3.63	2894.89	901	899.28	-1.72
383.51	-88.74	3051.27	-507.42	-220.54	3009.12	901	901.61	0.61
345.57	173.32	3038.01	-545.00	41.85	2994.93	901	901.25	0.25
576.74	-17.53	2870.68	-312.71	-147.91	2832.76	901	899.75	-1.25
538.90	244.53	2856.97	-350.03	114.22	2817.76	901	899.29	-1.71
606.29	52.89	3096.78	-232.14	-84.64	2801.63	901	899.44	-1.56
573.73	-159.49	3203.82	-317.42	-291.03	3191.03	901	900.89	-0.11
535.26	102.76	3190.84	-355.54	-28.77	3177.51	901	900.56	-0.44
425.97	-117.33	3400.56	-410.18	-255.30	3096.89	901	900.22	-0.78
387.21	144.85	3387.57	-448.40	7.02	3083.38	901	899.87	-1.13
527.90	-81.49	2829.55	-363.30	-206.51	2880.55	901	901.37	0.37
490.52	180.65	2816.18	-400.38	55.81	2866.16	901	900.99	-0.01

表3 大靶标测量结果
Table 3 Measurement results of a large target

Point 1			Point 2			D_i/mm	D_m/mm	Error /mm
x/mm	y/mm	z/mm	x/mm	y/mm	z/mm			
498.87	-176.95	3134.95	-311.70	-313.22	2765.01	901	901.36	0.36
460.76	85.35	3121.70	-349.45	-50.69	2751.31	901	901.19	0.19
489.21	-122.39	3171.53	-362.19	-258.75	2909.98	901	901.05	0.05
451.12	139.94	3158.55	-399.85	3.71	2896.32	901	900.82	-0.18
384.10	-88.88	3055.93	-507.26	-220.43	3008.17	901	902.28	1.28
346.16	173.44	3042.98	-544.91	41.98	2994.31	901	902.03	1.03
578.14	-17.60	2877.62	-312.97	-148.00	2835.10	901	901.60	0.60
540.30	244.88	2864.20	-350.38	114.42	2820.41	901	901.24	0.24
607.27	52.88	3101.73	-232.43	-84.71	2804.96	901	901.16	0.16
574.35	-159.59	3207.36	-317.30	-290.91	3189.86	901	901.44	0.44
535.93	102.74	3194.71	-355.46	-28.71	3176.68	901	901.21	0.21
426.09	-117.35	3401.48	-410.06	-255.20	3095.94	901	900.83	-0.17
387.38	144.74	3388.86	-448.33	7.11	3082.76	901	900.58	-0.42
529.22	-81.68	2836.65	-363.48	-206.59	2881.98	901	902.54	1.54
491.84	180.92	2823.56	-400.64	55.94	2867.91	901	902.27	1.27

表 4 小靶标测量结果
Table 4 Measurement results of a small target

Point 1			Point 2			D_i /mm	D_m /mm	Error/mm
x /mm	y /mm	z /mm	x /mm	y /mm	z /mm			
499.40	-176.81	3138.65	-312.76	-313.22	2773.07	901	901.03	0.03
461.40	85.37	3125.95	-350.60	-50.40	2759.85	901	901.01	0.01
489.75	-122.28	3175.29	-363.33	-258.63	2918.11	901	901.37	0.37
451.77	139.95	3162.85	-401.10	4.13	2904.93	901	901.30	0.30
384.63	-88.78	3060.48	-508.85	-220.22	3016.82	901	904.16	3.16
346.76	173.51	3048.05	-546.64	42.54	3003.45	901	904.06	3.06
578.92	-17.62	2881.54	-313.97	-147.80	2843.26	901	903.14	2.14
541.20	244.78	2868.61	-351.47	114.93	2829.00	901	902.93	1.93
607.97	52.83	3105.19	-233.15	-84.49	2812.87	901	900.99	-0.01
574.87	-159.46	3210.55	-318.18	-290.70	3197.29	901	902.74	1.74
536.58	102.71	3198.45	-356.43	-28.30	3184.65	901	902.67	1.67
426.49	-117.18	3405.15	-411.26	-255.00	3103.99	901	900.85	-0.15
387.88	144.81	3393.11	-449.64	7.58	3091.33	901	900.75	-0.25
529.98	-81.65	2840.84	-364.64	-206.43	2890.22	901	904.63	3.63
492.70	180.88	2828.23	-401.90	56.42	2876.61	901	904.51	3.51

表 5 测量精度评价
Table 5 Evaluation of measurement accuracy

	Flexible target	Large target	Small target
Std/mm	0.81	0.59	1.45
RMS error/mm	1.09	0.72	1.99

5 结 论

提出了立体视觉传感器的一种灵活靶标新标定方法。该方法通过刚性连接装置将多个小的靶标连接在一起,组成灵活靶标。以小靶标之间位置关系不变为约束条件,求解两个摄像机之间的转换矩阵。该标定方法具有以下几个优点:

1) 可根据立体视觉传感器的视场范围,灵活调整各小靶标之间距离,具有灵活、高效等特点,非常适合立体视觉传感器现场标定。

2) 具有较高精度,通过实验证明,该方法与大尺寸靶标的标定精度接近,好于小靶标的标定精度。

参 考 文 献

1 Li Weimin, Meng Hao, Wang Jianping *et al.*. Wide view calibration of single cameras [J]. *J. University of Science and Technology of China*, 2007, **37**(6): 627~630
李为民, 孟昊, 王建平等. 单场景摄像机的大视场标定[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, **37**(6): 627~630

2 Zhang Xuping, Wang Jiaqi, Zhang Yixin *et al.*. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0315002
张旭苹, 汪家其, 张益昕等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0315002

3 Yu Qian, Zhang Xuping, Zhang Yixin *et al.*. Novel method for

structured light plane calibration in three-dimensional vision measurement[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s1): s108006
俞乾, 张旭苹, 张益昕等. 新型三维视觉测量结构光平面标定方法[J]. 中国激光, 2012, **39**(s1): s108006

4 Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan *et al.*. Camera calibration technique of wide-area vision measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0915001
杨博文, 张丽艳, 叶南等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. 光学学报, 2012, **32**(9): 0915001

5 Yuan Yun, Zhu Zhaokun, Zhang Xiaohu *et al.*. Calibration method for large field of view camera based on infinite homography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0715002
苑云, 朱肇昆, 张小虎等. 基于无穷单应的大视场摄像机标定方法[J]. 光学学报, 2012, **32**(7): 0715002

6 Zhai Xintao. Large Scale Workpieces Measurement Based on Binocular Line-Structured Light [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. 1~8
翟新涛. 基于立体线结构光的大型工件测量[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008. 1~8

7 R. Y. Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]. Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, 1986. 364~374

8 S. Prince, A. D. Cheok, F. Farbiz *et al.*. 3D live: real time captured content for mixed reality [C]. Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2002. 7~13

9 G. K. Cheung, S. Baker, T. Kanade. Shape-from-silhouette of articulated objects and its use for human body kinematics estimation and motion capture [C]. Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. 77~84

- 10 Wang Liang, Wu Fuchao. Multi-camera calibration based on 1D calibration object [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(3): 225~231
王亮, 吴福朝. 基于一维标定构的多摄像机标定[J]. *自动化学报*, 2007, **33**(3): 225~231
- 11 Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong *et al.*. Calibrating binocular vision sensor with one-dimensional target of unknown motion [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2006, **42**(6): 92~96
周富强, 张广军, 魏振忠等. 基于未知运动一维靶标的立体视觉系统标定[J]. *机械工程学报*, 2006, **42**(6): 92~96
- 12 Sun Nan, Zhang Liyan, Ye Nan *et al.*. Calibration of binocular stereo measurement system based on calibration cross [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0412001
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
- 13 Zhang Jianxin, Duan Fajie, Ye Shenghua. "Two step" method for binocular sensor self-calibration [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(5): 37~41
张健新, 段发阶, 叶声华. "两步法"求取立体视觉系统中摄像机位置关系[J]. *光电工程*, 1998, **25**(5): 37~41
- 14 Li Mingzhe, Zhang Aiwu, Hu Shaoxing. On 3D measuring system of sheet metal surface based on computer vision [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2002, **13**(14): 1177~1180
李明哲, 张爱武, 胡少兴. 基于计算机视觉的板材曲面3维测量系统[J]. *中国机械工程*, 2002, **13**(14): 1177~1180
- 15 H. Zhang, K. K. Wong, G. Q. Zhang. Camera calibration from images of spheres [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, **29**(3): 499~503
- 16 J. Moré. The Levenberg-Marquardt algorithm, implementation and theory [C]. *Lecture Notes in Mathematics*, 1978, **630**: 105~116
- 17 Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 18 J. Y. Bouguet. Camera Calibration Toolbox for Matlab [EB/OL]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.

栏目编辑: 李文喆