

文章编号 1004-924X(2008)11-2274-07

一维靶标的多视觉传感器全局校准

刘震,张广军,魏振忠

(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 100083)

摘要:基于交比不变性原理和一维靶标点共线的特点,提出了一种多视觉传感器全局校准方法。以一个视觉传感器坐标系为基础建立全局坐标系,称该视觉传感器为基础视觉传感器。将一维靶标在基础视觉传感器和待校准视觉传感器前合适位置摆放至少两次,根据拍摄得到的3个或3个以上的靶标点图像坐标,由交比不变性原理,对每个视觉传感器求解不在视场区域的靶标点图像坐标。结合靶标点之间的距离约束,求解待校准视觉传感器到基础视觉传感器的转换矩阵。根据一维靶标特征点共线的特点,通过捆绑调整方式得到转换矩阵的最优解。最后,通过两两视觉传感器校准的方式完成多视觉传感器全局校准。该方法不需外部辅助设备,简单灵活,实用性强,全局校准精度可达0.041 mm。

关键词:全局校准;一维靶标;多视觉传感器;交比不变性

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

Global calibration of multi-vision sensor based on one dimensional target

LIU Zhen, ZHANG Guang-jun, WEI Zhen-zhong

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology of the Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the invariance of cross-ratio and the collinear property of all points for one dimensional target, a global calibration method of multi-vision sensor system is proposed. The global coordinate frame is constructed based on the coordinate frame of one of the vision sensors, which is called the base vision sensor. The one dimensional target is positioned arbitrarily for at least twice in front of both the base sensor and the sensor to be calibrated. For each vision sensor, the image coordinates of the target feature points out of the view field are computed utilizing the image coordinates of at least three feature points captured by the vision sensor according to the invariance of cross-ratio. A transformation matrix from the coordinate frame of the sensors to be calibrated to that of the base sensor is solved by considering the distance restraint between target points and optimized solution is obtained by non-linear optimization method. The global calibration of multi-vision sensor system is realized by pair-wise calibration between the base vision sensor and each of the vision sensors to be calibrated. Experiment results show that proposed method can do calibration without any high-accuracy 3D measuring equipment, it is simple, flexible and applicable in various situations. Calibration result shows that the error of global calibration method is 0.041 mm.

Key words: global calibration; one dimensional target; multi-vision sensor; invariance of cross-ratio

收稿日期:2008-07-22;修订日期:2008-08-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50727502)

1 引 言

视觉传感器具有大量程,非接触,速度快,系统柔性好和较高的测量精度等优点,通常用在三坐标测量系统中。由于单个视觉传感器受视场限制测量范围有限,在实际测量系统中通常将多个视觉传感器结合起来以得到很大的测量范围,这里将结合起来的多个视觉传感器称为多视觉传感器,这些视觉传感器一般没有共同视场,如何将它们统一到全局坐标系下,是关系到整个三坐标测量系统成败的关键。

目前常用的多视觉传感器全局校准方法主要有 3 种:(1)同名坐标统一法^[1-2],该方法利用一组同名坐标计算出各视觉传感器到全局坐标系的旋转矩阵和平移向量。(2)中介坐标统一法^[1-2],该方法通过多次中间坐标系转换来完成视觉传感器坐标系到全局坐标系的统一。(3)世界坐标唯一法^[2],该方法直接利用全局坐标系下的特征点对处于测量状态的系统各视觉传感器进行局部标定,从而将局部标定和全局标定统一到一起。以上 3 种方法都需要高精度外部辅助设备如双经纬仪,激光跟踪仪等来完成全局校准,这些方法都存在以下局限性:(1)当多视觉传感器系统安装结构复杂、存在相互遮挡时,外部辅助设备存在测量盲区,无法实现全局校准;(2)双经纬仪等外部辅助设备需要较大工作空间才能达到较高测量精度。当测量现场空间较小时,外部辅助设备无法获得较高测量精度,导致校准精度较低,或外部辅助设备根本无法安装,也就无法实现全局校准。

不采用外部辅助设备直接利用靶标进行多视觉传感器全局校准的方法主要是根据多视觉传感器所处位置加工一个专用靶标^[3-4],专用靶标上加工一些已知空间位置的标志点。每个视觉传感器拍摄专用靶标上相应位置的标志点,以专用靶标坐标系为中介实现多视觉传感器的全局校准。这些方法的缺点主要是:(1)通用性差。不同测量系统需要做不同的专用靶标,甚至一个测量系统由于视觉传感器距离和相互遮挡等因素也可能需要做不同的专用靶标。(2)专用靶标加工困难,成本高。当视觉传感器数量较多且距离较远时,专用靶标体积大、加工难度大且成本高。

一维靶标加工简单、成本较低,质量轻便于携

带且不存在自身遮挡等问题,非常适合用来在现场进行多视觉传感器全局校准。

针对现有多视觉传感器全局校准方法中存在的局限性,本文提出了一种基于一维靶标的多视觉传感器全局校准方法。首先根据交比不变原理,得到不在视场区域的一维靶标点图像坐标,然后根据一维靶标点共线的特点,通过捆绑调整的方式完成多视觉传感器全局校准。文中首先介绍了全局校准的算法理论;最后不失一般性的,通过两个视觉传感器的全局校准试验来验证算法的可行性。

2 多视觉传感器全局校准原理

2.1 多视觉传感器结构关系模型

不失一般性,以两个视觉传感器为研究对象,每个视觉传感器的内参数已标定完毕。

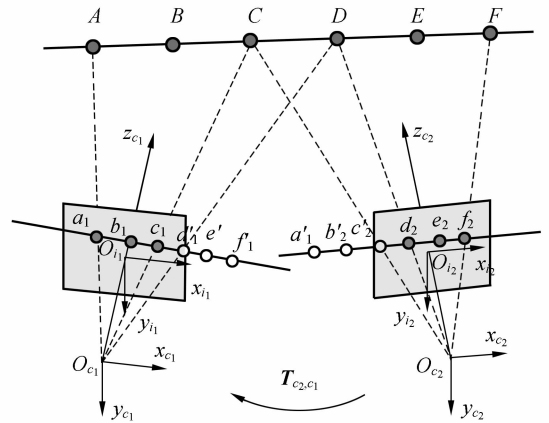


图 1 多视觉传感器结构图

Fig. 1 Configuration of multi-vision sensor

如图 1, $O_{c_1}, x_{c_1}, y_{c_1}, z_{c_1}$ 为视觉传感器 1 坐标系,以 $O_{c_1}, x_{c_1}, y_{c_1}, z_{c_1}$ 为基础建立全局坐标系。 $O_{c_2}, x_{c_2}, y_{c_2}, z_{c_2}$ 为视觉传感器 2 坐标系。 T_{c_2, c_1} 为视觉传感器 2 坐标系到视觉传感器 1 坐标系的转换矩阵。视觉传感器 1 投影坐标系为 $O_{i_1}, x_{i_1}, y_{i_1}$ (投影坐标系又称为归一化图像坐标系),视觉传感器 2 投影坐标系为 $O_{i_2}, x_{i_2}, y_{i_2}$ 。其中 A~F 为一维靶标中的 6 个特征点,由于视场所限视觉传感器 1 的可视一维靶标点(可视一维靶标点就是摄像机可以“看”到的一维靶标点)为 A~C 点,其在视觉传感器 1 投影坐标系下的投影点为 $a_1 \sim c_1$,视觉传感器 2 的可视一维靶标点为 D~F 点,其在视觉传感器 2

投影坐标系下的投影点为 $d_2 \sim f_2$ 。根据交比不变性原理,可获得不在视觉传感器 1 视场中的靶标点 $D \sim F$ 在投影坐标系下的投影点 $d_1' \sim f_1'$,同理也可获得靶标点 $A \sim C$ 在视觉传感器 2 投影坐标系下的投影点 $a_2' \sim c_2'$ 。

全局校准的主要步骤为:(1)将所有视觉传感器在合适位置安装固定,每个视觉传感器已提前标定完毕,以其中一个视觉传感器为基础建立全局坐标系,称该视觉传感器为基础视觉传感器;(2)将一维靶标在基础视觉传感器和待校准视觉传感器前摆放两次或两次以上。针对每个视觉传感器,根据交比不变性,求解不在视场区域的一维靶标点在投影坐标系下的投影坐标;(3)通过靶标对应点的投影坐标,计算本质矩阵,结合靶标点之间的距离约束求解 T_{c_2, c_1} ; (4)根据一维靶标点共线的特点,通过捆绑调整方式得到转换矩阵 T_{c_2, c_1} 的最优解。(5)最后通过两两校准的方式,实现多视觉传感器的全局校准。

2.2 求解全部一维靶标点的投影坐标

根据交比的定义和不变性原理,一维靶标上任意 4 点 (A, B, C, X) 的交比和其在视觉传感器投影坐标系下投影点 (a, b, c, x) 的交比保持不变,其中 X 和 x 点分别表示一维靶标上任意点和其在投影平面上的投影点。如式(1)所示:

$$r(A, B, C, X) = \frac{AC}{BC} : \frac{AX}{BX} = \frac{ac}{bc} : \frac{ax}{bx}, \quad (1)$$

给定 A, B, C, X 在一维靶标坐标系下的局部坐标,通过视觉传感器获取 a, b, c 点的投影坐标,根据式(1)可以求解 x 的投影坐标。

因此视觉传感器只需拍摄 3 个或 3 个以上靶标点,通过图像处理获取相应的图像坐标,经过图像畸变校正,求解投影坐标^[5-8]。根据式(1)可以求解出不在视觉传感器视场区域的靶标点在视觉传感器投影坐标系下的投影坐标。

2.3 求解 T_{c_2, c_1}

设一维靶标点在两个视觉传感器投影坐标系下的投影齐次坐标分别为 $p_{n,1}$ 和 $p_{n,2}$ 。投影方程如式(2)所示:

$$\begin{cases} p_{n,1} = [I \ 0] P'_{c_1} = P_1 P'_{c_1} \\ p_{n,2} = [R_{c_1, c_2} \ t_{c_1, c_2}] = P_2 P'_{c_1} \end{cases}, \quad (2)$$

其中 P'_{c_1} 为一维靶标点在视觉传感器 1 坐标系下坐标; R_{c_1, c_2} 为视觉传感器 1 坐标系到视觉传感器 2 坐标系的旋转矩阵, $t_{c_1, c_2} = [t_x, t_y, t_z]^T$ 为相应

的平移向量; P_1 和 P_2 分别为视觉传感器 1 和视觉传感器 2 的投影矩阵。

本质矩阵 E 反映了两个视觉传感器之间结构参数。如式(3)所示:

$$p_{n,1}^T S R_{c_1, c_2} p_{n,2} = p_{n,1}^T E p_{n,2} = 0, \quad (3)$$

$$\text{其中, } S = \begin{bmatrix} 0 & -t_x & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix}.$$

根据 E 的性质, E 的参数独立变量为 5 个,因此只要多于 5 个非共线靶标对应点投影坐标就可以求解 E 。

将一维靶标在视觉传感器前合适位置摆放多次。两个视觉传感器分别拍摄一维靶标图像,根据交比不变性原理,分别求解所有一维靶标点在两个视觉传感器投影坐标系下的投影坐标,由归一化 8 点算法求解本质矩阵 E ^[6-7]。

对本质矩阵 E 进行奇异值分解,可以求得一个带比例系数和四重多义性下的 P_2 ^[5]。由 $E^T t'_{c_1, c_2} = 0$ 可知, t'_{c_1, c_2} 是下列问题的解

$$\min_{t'_{c_1, c_2}} \| E^T t'_{c_1, c_2} \|^2 \quad \text{满足} \quad \| t'_{c_1, c_2} \| = 1$$

若 $E = U \text{diag}(1, 1, 0) V^T$, 则 P_2 具有如下 4 种形式:

$$P_2 = \begin{cases} [UWV^T & u_3] \\ [UWV^T & -u_3] \\ [UW^T V & u_3] \\ [UW^T V & -u_3] \end{cases}, \quad (4)$$

其中, $W = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$; u_3 为 U 的第 3 列。

由于被测靶标点一定在两个视觉传感器前,因此任取靶标上一点,计算该靶标点在两个视觉传感器投影坐标系下的投影坐标,分别将式(4)中 4 种 P_2 带入式(2),计算 4 种可能的三维坐标,若在 4 个三维坐标中有一个三维坐标为正,则对应的 P_2 矩阵就是正确的投影矩阵。

由 $\| t'_{c_1, c_2} \| = 1$ 可知,式(4)只能求得比例意义上的 P_2 。为了确定比例系数 k ,可根据 P_2 三维重建一维靶标上任意两个特征点的三维坐标,计算两点距离 \tilde{L} ,通过与两点实际距离 L 比较来确定 k ^[6-7],如式(5)所示:

$$k = \frac{L}{\tilde{L}}, \quad (5)$$

最后通过 \mathbf{P}_2 计算 \mathbf{T}_{c_2,c_1} , 如式(6)所示:

$$\mathbf{T}_{c_2,c_1} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{c_1,c_2} & \mathbf{t}_{c_1,c_2} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}^{-1}. \quad (6)$$

2.4 求解 $\mathbf{P}_{c,i,f}$ 和 α_i, β_i

见图 2, 第 i 个摆放位置, 一维靶标在 $O_{c_1} x_{c_1} y_{c_1}$ 上的投影直线与 y_{c_1} 轴的夹角为 α_i 。一维靶标所在空间直线与 $O_{c_1} x_{c_1} y_{c_1}$ 平面的夹角为 β_i 。 $\mathbf{P}_{c,i,f}$ 为一维靶标的第一个特征点, $\mathbf{P}_{c,i,f} = [x'_{c,i,f}, y'_{c,i,f}, z'_{c,i,f}]^T$ 为 $P_{i,f}$ 在视觉传感器 1 坐标系下的坐标。 $\mathbf{P}_{c,i,k} = [x'_{c,i,k}, y'_{c,i,k}, z'_{c,i,k}]^T$ 为一维靶标第 k 个特征点在视觉传感器 1 坐标系下的坐标。 $L_{k,1}$ 为第 k 个特征点到第 1 个特征点的距离。

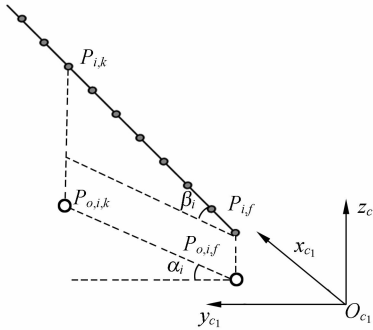


图 2 α_i, β_i 示意图
Fig. 2 α_i and β_i

在一维靶标的每个摆放位置, 根据靶标点在两个视觉传感器的投影坐标, 通过已计算得出的 \mathbf{P}_1 和 \mathbf{P}_2 , 由式(2)可以求解出所有靶标点在视觉传感器 1 坐标系下的三维坐标。因此靶标在相应摆放位置的 α_i, β_i 可通过靶标点在视觉传感器 1 坐标系下三维坐标求解。

根据一维靶标上所有特征点共线这一特性, 从图 2 中可见, 一维靶标上任意特征点在视觉传感器 1 坐标系下三维坐标均可通过 $\mathbf{P}_{c,i,f}$ 和 α_i, β_i 表示。如式(7):

$$\mathbf{P}_{c,i,k} = \mathbf{P}_{c,i,f} + L_{k,1} \begin{bmatrix} \cos \beta_i \sin \alpha_i \\ \cos \beta_i \cos \alpha_i \\ \sin \beta_i \end{bmatrix}. \quad (7)$$

2.5 捆绑调整

设在一维靶标的第 i 个摆放位置, 视觉传感器 1 可视的第 j 个一维靶标点为 $P_{i,j}^1, \mathbf{p}_{im,i,j}^1$ 和 $\hat{\mathbf{p}}_{im,i,j}^1$, 分别为 $P_{i,j}^1$ 在视觉传感器 1 图像坐标系下的无畸变图像齐次坐标和重投影图像齐次坐标。在一维靶标的第 i 个摆放位置, 视觉传感器 2 可

视的第 j 个一维靶标点为 $P_{i,j}^2, \mathbf{p}_{im,i,j}^2$ 和 $\hat{\mathbf{p}}_{im,i,j}^2$ 分别为 $P_{i,j}^2$ 在视觉传感器 2 图像坐标系下的无畸变图像齐次坐标和重投影图像齐次坐标。 $\hat{\mathbf{p}}_{im,i,j}^1, \hat{\mathbf{p}}_{im,i,j}^2$ 可通过式(8)计算求解。

$$\begin{cases} \rho_1 \hat{\mathbf{p}}_{im,i,j}^1 = \mathbf{A}_1 [\mathbf{I} & \mathbf{0}] \mathbf{P}_{c_1,i,j} \\ \rho_2 \hat{\mathbf{p}}_{im,i,j}^2 = \mathbf{A}_2 [\mathbf{I} & \mathbf{0}] \mathbf{T}_{c_2,c_1}^{-1} \tilde{\mathbf{P}}_{c_2,i,j} \end{cases}, \quad (8)$$

其中, $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ 分别为视觉传感器 1, 2 中摄像机的内部参数矩阵; $\mathbf{P}_{c_1,i,j}$ 和 $\tilde{\mathbf{P}}_{c_2,i,j}$ 分别为 $P_{i,j}^1$ 和 $P_{i,j}^2$ 在视觉传感器 1 坐标系下坐标, 其中 $\mathbf{P}_{c_1,i,j}$ 和 $\tilde{\mathbf{P}}_{c_2,i,j}$ 都需要由 $\mathbf{P}_{c,i,f}$ 和 α_i, β_i 通过式(7)表示。

假设图像噪声为高斯分布且独立分布, 为了得到 $\mathbf{R}_{c_2,c_1}, \mathbf{t}_{c_2,c_1}$ 在最大似然准则下的最优解, 建立如下优化函数:

$$F(\mathbf{a}) = \min \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{e_1} [d(\mathbf{p}_{im,i,j}^1, \hat{\mathbf{p}}_{im,i,j}^1)]^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{e_2} [d(\mathbf{p}_{im,i,j}^2, \hat{\mathbf{p}}_{im,i,j}^2)]^2 \right), \quad (9)$$

其中, $\mathbf{a} = [\mathbf{R}_{c_2,c_1}, \mathbf{t}_{c_2,c_1}, \mathbf{P}_{c,1,f}, \alpha_1, \beta_1, \dots, \mathbf{P}_{c,i,f}, \alpha_i, \beta_i, \dots, \mathbf{P}_{c,m,f}, \alpha_m, \beta_m]$; e_1, e_2 分别为视觉传感器 1, 视觉传感器 2 中可视靶标点的个数; m 为一维靶标摆放次数。

采用非线性优化方法^[9] (例如 Levenberg-Marquardt) 即可得到 \mathbf{a} 在最大似然准则下的最优解。

2.6 多视觉传感器全局校准

如图 3, 当视觉传感器数量多于两个时, 以其中某个视觉传感器为基础视觉传感器, 建立全局坐标系。将一维靶标在基础视觉传感器和待校准视觉传感器前摆放多次, 采用 2.2 节~2.5 节介绍的方法, 求解待校准视觉传感器坐标系到基础

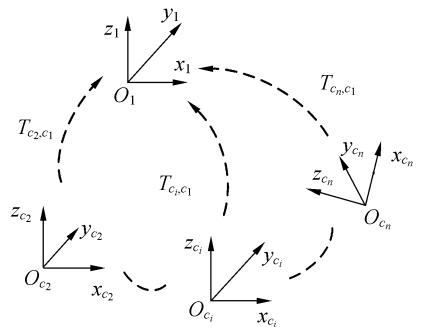


图 3 多视觉传感器全局校准过程
Fig. 3 Process of global calibration of multi-vision sensor

视觉传感器全局坐标系的转换矩阵。最后通过两两视觉传感器校准的方式完成多视觉传感器全局校准。

3 实验结果

不失一般性,实验通过两台摄像机之间的校准来验证本文多视觉传感器全局校准方法的可行性。摄像机采用大恒 1 400FM 数码相机,分辨率为 $1\ 392 \times 1\ 040$,镜头选用 35 mm 焦距 kowa 镜头。摄像机测量距离为 850 mm 左右。一维靶标采用液晶显示器生成,临近圆中心间距为 60 像素(每个像素间距为 0.264 mm),总长 316.80 mm,特征点个数为 21 个,临近点间距为 15.84 mm。两个摄像机分别拍摄一维靶标的一部分,其中摄像机 1 取一维靶标第 1 个到第 10 个特征点、摄像机 2 取一维靶标的第 12 个到第 21 个特征点用于校准计算。为了评价全局校准精度,一维靶标的第 8 个到第 14 个点为精度评价点,这些点在两个摄像机共同视场区域中,通过将共同视场区域中特征点与特征点的测量距离和实际距离进行比较来评价全局校准精度。具体靶标形式见图 4,图 5。在实际多视觉传感器全局校

准过程中,视觉传感器之间并不需要存在共同视场区域。

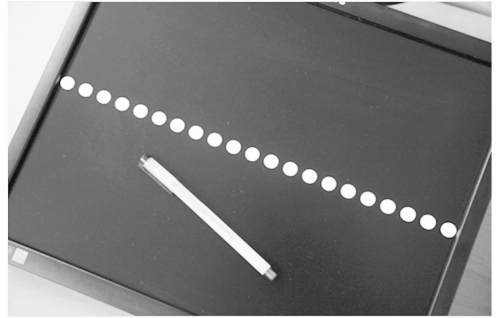


图 5 一维靶标实物图

Fig. 5 One dimensional target

在合适位置安装固定好两个摄像机,两个摄像机内部参数已知。以摄像机 1 为基础,建立全局坐标系。将一维靶标在两个摄像机前摆放 40 个位置,根据本文方法求解两个摄像机之间的转换矩阵。图 6 为两个摄像机结构图。表 1,表 2 为具体的试验结果。

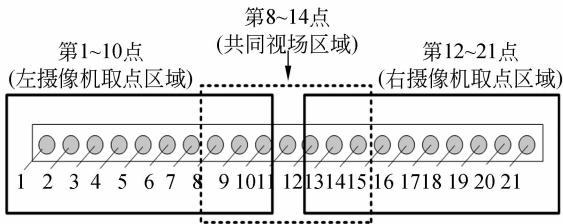


图 4 一维靶标示意图

Fig. 4 Configuration of one dimensional target



图 6 两个摄像机结构图

Fig. 6 Configuration of two cameras

表 1 摄像机标定结果

Tab. 1 Results of camera calibration

摄像机 1 内部参数			摄像机 2 内部参数		
$a_x = 5\ 934.252\ 2$	$a_y = 5\ 933.545$	$\gamma = -0.125\ 47$	$a_x = 5\ 986.766\ 0$	$a_y = 5\ 985.380\ 4$	$\gamma = -0.359\ 15$
$u_0 = 673.243\ 3$	$v_0 = 493.987\ 5$		$u_0 = 687.333\ 6$	$v_0 = 489.843\ 1$	
$k_1 = 0.193\ 456$	$k_2 = 1.476\ 454$		$k_1 = 0.249\ 021$	$k_2 = 0.156\ 012$	

表 2 全局校准试验结果

Tab. 2 Results of global calibration

		转换矩阵			
全局校准线性解	T_{c_2, c_1}	$\begin{bmatrix} 0.849\ 857 & -0.003\ 647 & 0.527\ 043 & 423.458\ 824 \\ -0.001\ 545 & 1.000\ 065 & 0.009\ 383 & 13.323\ 657 \\ -0.527\ 087 & -0.008\ 735 & 0.849\ 893 & -152.354\ 286 \end{bmatrix}$			
全局校准非线性优化解	T_{c_2, c_1}	$\begin{bmatrix} 0.820\ 942 & -0.010\ 886 & 0.571\ 053 & 449.020\ 754 \\ -0.002\ 254 & 0.999\ 812 & 0.022\ 134 & 21.550\ 135 \\ -0.571\ 176 & -0.019\ 427 & 0.820\ 664 & -167.426\ 567 \end{bmatrix}$			

将一维靶标在两个摄像机前任意摆放 3 次, 根据全局校准结果, 三维重建每个摆放位置, 一维靶标的第 8~第 14 点, 计算其中任意两个特征点的绝对距离, 与实际长度进行比较, 以此评定全局校准精度。每个摆放位置选取 20 个点对距离, 计算单个摆放位置的误差, 最后综合 3 个摆放位置的误差得到系统全局校准的总误差为 0.041 mm, 具体结果见表 3。

表 3 测量精度评价

Tab. 3 Evaluation of measurement results

	RMS(mm)
第 1 个摆放位置	0.043
第 2 个摆放位置	0.041
第 3 个摆放位置	0.040
总 RMS	0.041

图 7 为 3 个摆放位置的一维靶标第 8~第 14 点的三维重建图。

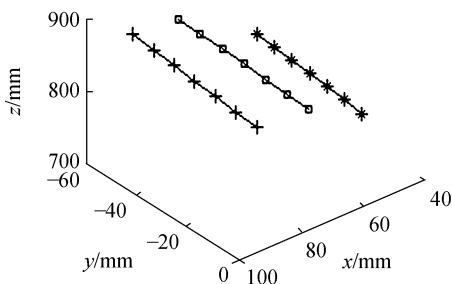


图 7 特征点三维重建图

Fig. 7 3D reconstruction of feature points

4 结 论

针对现有多视觉传感器全局校准方法中存在的局限性, 提出了一种基于一维靶标的全局校准方法。该方法通过交比不变性, 解决了无共同视场多视觉传感器之间无对应点图像坐标的问题。根据一维靶标点共线的特点, 采取捆绑调整方式, 得到视觉传感器坐标系之间转换矩阵的最优解, 解决了现有多视觉传感器全局校准方法操作复杂依赖外部设备等问题。它主要的优点是:(1)不依赖高精度外部设备, 只需要一维靶标, 不受现场空间大小及测量系统结构限制, 可实现各种复杂测量环境下的多视觉传感器的全局校准;(2)不存在靶标自身遮挡问题, 摄像机可以拍到高质量的靶标图像;(3)校准精度高, 经实验验证全局校准精度可达 0.041 mm;(4)标定过程简单方便, 非常适合在现场进行多视觉传感器全局校准。同时该方法也存在缺点: 当视觉传感器相隔较远时, 需要比较长的一维靶标, 这给加工带来一定难度。

参考文献:

- [1] 罗明. 多传感器机器视觉测量系统及其应用[D]. 天津:天津大学, 1996.
LUO M. *Study on multi-sensor machine vision gauging system and its application*[D]. Tianjin: Tianjing University, 1996. (in Chinese)
- [2] 张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社, 2005.
ZHANG G J. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 刘国忠, 王伯雄, 史辉, 等. 足部三维测量系统中 CCD 传感器的全局标定[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(7): 1124-1129.
LIU G ZH, WANG B X, SHI H, *et al.*. Global calibration of CCD cameras in measurement system for 3-D foot shapes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1124-1129. (in Chinese)
- [4] 张启灿, 苏显渝, 邹小平. 多个线结构光传感器三维测量系统的校准[J]. 激光技术, 2005, 29(3): 225-227.
ZHANG Q C, SU X Y, ZOU X P. Calibration of 3-D measurement system using multi-sensor with line structured-illuminated laser[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 225-227. (in Chinese)
- [5] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [6] HARLEY R, ZISSERMAN A. *A Multiple View Geometry in Computer Vision*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [7] 周富强, 张广军, 魏振忠, 等. 基于未知运动一维靶标的双目视觉传感器标定[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 92-96.
ZHOU F Q, ZHANG G J, WEI ZH ZH, *et al.*. Calibrating binocular vision sensor with one-dimensional target of unknown motion[J]. *Mechanical Engineering Journal*, 2006, 42(6): 92-96. (in Chinese)
- [8] 周富强, 郝继贵, 杨学友, 等. CCD 摄像机快速标定技术[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(1): 96-100.
ZHOU F Q, ZHU J G, YANG X Y, *et al.*. A high speed CCD camera calibration technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(1): 96-100. (in Chinese)
- [9] MORE J. *The levenberg-marquardt Algorithm: Implementation and Theory* [M]. New York: Springer-Verlag, 1977.

作者简介: 刘 震(1975—), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要从事光学精密测量、机器视觉、三维物体识别等方面的研究。E-mail: chichi008@aspe.buaa.edu.cn

张广军(1965—), 男, 天津人, 教授, 博士生导师, 主要从事机器视觉、光电精密测量等方面的研究。E-mail: zgj310@eyou.com