

文章编号 1004-924X(2009)03-0633-08

大视场双目视觉传感器的现场标定

孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 张广军

(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:分析了摄像机和双目视觉传感器的数学模型, 针对大视场视觉测量应用, 提出了一种基于基线尺的大视场双目视觉传感器标定方法。在测量空间内任意多次摆放基线尺, 由两摄像机拍摄基线尺图像。利用基本矩阵及基线尺上两特征点之间距离的约束, 采用线性解和非线性优化相结合的方法同时估计摄像机的内部参数以及双目视觉传感器的结构参数。该标定方法操作简单, 标定效率高, 无需初始参数即可估计双目立体传感器的全部参数。实验结果表明, 该方法适合双目立体视觉传感器的现场标定, 在 $6\ 000\ \text{mm} \times 4\ 500\ \text{mm}$ 的范围内可以得到 $0.06\ \text{mm}$ 的测量精度。

关键词: 立体视觉传感器; 标定; 大视场; 基线尺; 基本矩阵

中图分类号: TP391; TP212.6 **文献标识码:** A

Field calibration of stereo vision sensor with large FOV

SUN Jun-hua, WU Zi-yan, LIU Qian-zhe, ZHANG Guang-jun

(*Key Laboratory for Precision Optical-mechanical Technology of the Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China*)

Abstract: The mathematical model of a stereo vision sensor is analyzed. Aiming at the application of vision measurement in large Field of View (FOV), a novel calibration method for stereo vision sensor with large FOV is proposed. A baseline ruler is randomly placed in FOV of the vision sensor for several times and the images of the feature points on the baseline ruler are acquired by the cameras. Then, based on the foundational matrix and the constraint of the known distance between two feature points on the target, the intrinsic parameters of cameras and the structure parameters of stereo vision sensor are simultaneously estimated by the method combining linear solution with nonlinear optimization. The experimental results show that the proposed calibration method is efficient and easy to operate. All parameters of stereo vision sensor can be determined without initial value. By the measurement precision of $0.06\ \text{mm}$ in the measurement range of $6\ 000\ \text{mm} \times 4\ 500\ \text{mm}$, it is proved that the proposed method is suitable for calibrating stereo vision sensor with large FOV on the spot.

Key words: stereo vision sensor; calibration; large FOV; baseline ruler; fundamental matrix

收稿日期: 2008-07-02; 修订日期: 2008-10-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50727502; No. 60804060); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 200800061003)

1 引言

双目立体视觉是基于视差的,由三角法原理进行三维信息的获取。随着成像器件加工工艺及水平的快速提高,其像元数也迅速提高,使得双目立体视觉技术应用于超大尺寸的检测成为可能。而摄像机标定及双目视觉传感器结构参数在大视场中的标定是立体视觉传感器进行超大尺寸检测的关键。

传统的摄像机和双目视觉传感器标定方法往往依赖于精密加工的 2D 或 3D 靶标,如 R. Tsai^[1]提出的基于径向约束的两步法。该类方法能够获得比较高的标定精度,但在标定中要求靶标能够尽可能地覆盖整个视场。然而,在大视场视觉测量应用中,大型高精度 2D 或 3D 靶标难于加工与维护;而小型靶标在大视场中进行标定将造成巨大的误差以及视场中精度分布的不均匀,所以,传统的标定方法在大视场测量应用中显然不可行。因此,大视场中摄像机的标定一直是视觉测量领域研究的热点。O. Faugeras^[2]等首先提出了自标定方法,这类方法无需靶标,仅利用摄像机内参数之间存在的约束即可完成标定,然而这类方法达到的标定精度往往不能够满足高精度测量的要求。张健新^[3]提出的基于平行线消隐点理论标定方法实现了立体视觉传感器结构参数的标定,但在实际应用中,高精度的平行直线方向矢量不易获得。李明哲等^[4]利用神经网络进行立体视觉传感器的结构参数标定,但未给出标定精度。马永壮^[5]等提出了基于双目主动视觉的自标定方法,但要求两摄像机之间存在纯平移关系。以上方法虽然可以使标定的过程不依赖于靶标且实现灵活,但无法满足视觉测量应用的高精度要求。针对大视场视觉测量,李为民^[6]提出了一种差分标定方法,将小靶标放置于视场内的多个工位进行摄像机的标定,但该方法要求靶标多次摆放的位置必须位于一个平面之内,并且对靶标每次摆放的姿态都有严格的要求,使得其在现场应用中受到严重的局限。王永强提出了基于视场边缘距离相对约束条件的摄像机标定方法,但方法中使用的标准距离控制场需要事先使用高精度定位仪器测出,同样无法满足现场标定的要求。周富强^[7]等提出了基于未知运动一维靶标的双目视觉

传感器标定方法,精度较高、实现方便,但其标定精度取决于摄像机内参数的精确标定,同样无法运用于大视场视觉测量。

本文提出了一种基于一维基线尺的双目视觉传感器标定方法。由于基线尺只具有两个距离已知的特征点,无需保证共面和共线,其加工难度远远低于靶标,大尺寸基线尺在工业中已经普及。但由于基线尺能够提供的约束过少,一直无法被运用于摄像机的标定之中。本文提出的方法利用基本矩阵,将基线尺多次任意摆放,由双目视觉传感器拍摄多幅靶标图像,采用线性和非线性相结合的方法同时估计出摄像机内部参数及双目视觉传感器结构参数。该方法很好地解决了双目传感器大视场现场标定对于大型靶标的依赖问题,并且实现了传感器内外参数的同时标定,消除了分开标定的积累误差影响。

2 双目视觉传感器数学模型

空间中任意一点在图像中的成像位置可以用针孔成像模型来近似表示。如图 1 所示,以左摄像机坐标系 $\sigma\text{-}xyz$ 作为世界坐标系,左摄像机图像坐标系为 $O_l\text{-}u_1v_1$,物空间点与像面 $O_l\text{-}u_1v_1$ 间构成理想的透视对应。空间中一点 $M(X, Y, Z)$ 在图像平面中的投影位置为 $m_1(u_u, v_u)$,设 $\mathbf{m} = [u_u, v_u, 1]^T$, $\mathbf{M} = [X, Y, Z, 1]^T$, \mathbf{A} 为摄像机内部参数矩阵,有如下透视投影关系

$$s\mathbf{m} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]\mathbf{M}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, s 为不为零的比例因子, \mathbf{R} 、 \mathbf{t} 分别为世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移矢量。这里由于摄像机坐标系与世界坐标系重合,有 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] = [\mathbf{I} \quad \mathbf{0}]$, (u_0, v_0) 为主点坐标, f_x, f_y 分别为 u 轴和 v 轴的有效焦距。

考虑摄像机镜头的一阶畸变,设畸变图像坐标为 (u_d, v_d) ,畸变系数为 k ,有畸变模型

$$\begin{cases} u_d = (u_u - u_0)(1 + kr_u^2) \\ v_d = (v_u - v_0)(1 + kr_v^2) \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $r_u^2 = u_u^2 + v_u^2$ 。

由两台摄像机组成的双目视觉传感器的测量模型及相应坐标系如图 1 所示。

以左摄像机作为世界坐标系,右摄像机坐标

系为 $o_r-x_r-y_r-z_r$, 图像坐标系为 $O_r-u_r-v_r$, 点 M 在左右摄像机坐标系中的坐标分别为 $M_l(x, y, z)$ 和 $M_r(x_r, y_r, z_r)$, 在左右摄像机图像平面中的投影位置分别为 $m_l(u_l, v_l)$ 和 $m_r(u_r, v_r)$ 。

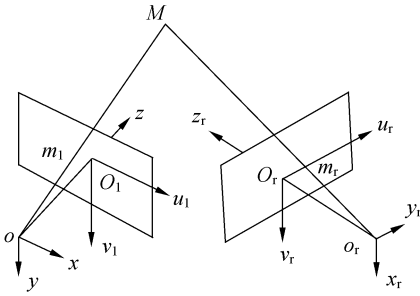


图 1 双目视觉传感器测量模型

Fig. 1 Measurement model of stereo vision sensor

设 A_l, A_r 分别为左右摄像机的内参数矩阵, P_l, P_r 分别为左右摄像机的投影矩阵。左摄像机坐标系与右摄像机坐标系之间的位置关系可通过旋转矩阵 R 和平移矢量 t 表示为:

$$s_l m_l = A_l [I \quad 0] M_l = P_l M_l, \quad (3)$$

$$s_r m_r = A_r [R \quad t] M_r = P_r M_r, \quad (4)$$

由此得到线性方程组:

$$\begin{bmatrix} u_l m_{31}^1 - m_{11}^1 & u_l m_{32}^1 - m_{12}^1 & u_l m_{33}^1 - m_{13}^1 \\ v_l m_{31}^1 - m_{21}^1 & v_l m_{32}^1 - m_{22}^1 & v_l m_{33}^1 - m_{23}^1 \\ u_r m_{31}^r - m_{11}^r & u_r m_{32}^r - m_{12}^r & u_r m_{33}^r - m_{13}^r \\ v_r m_{31}^r - m_{21}^r & v_r m_{32}^r - m_{22}^r & v_r m_{33}^r - m_{23}^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14}^1 - u_l m_{34}^1 \\ m_{24}^1 - v_l m_{34}^1 \\ m_{14}^r - u_r m_{34}^r \\ m_{24}^r - v_r m_{34}^r \end{bmatrix}. \quad (5)$$

使用最小二乘法解线性方程组(5)即可以求出 x, y, z 的值, 重建出 M 点的空间三维坐标。

3 标定原理

通过多次摆放一维靶标获取多组对应点, 计算出双目视觉传感器的基本矩阵, 再利用极线几何提供的约束从基本矩阵中分离出摄像机的内参数, 然后通过一维靶标的已知长度信息计算出双目视觉传感器的结构参数。最后对所有参数进行全局非线性优化, 得到传感器参数的最优解。

3.1 求解畸变系数

为了分离出摄像机的线性模型, 首先需要确定摄像机的畸变系数。假定畸变中心与主点重合, 由于摄像机的变焦及对焦过程对于主点位置的影响很小^[8], 可以利用激光法离线进行标定^[9]。设 F 为双目视觉传感器的基本矩阵, F 的自由度有 7 个, 因此要计算 F 至少需要获得 7 组对应投影点坐标。使用带有两个特征点的一维靶标, 在测量区域任意摆放 4 次以上, 即可利用 R. Hartley^[9] 提出的归一化 8 点算法求解 F 阵。设 $m_l = [u_l^1, v_l^1]^T, m_r = [u_r^1, v_r^1]^T$ 分别为空间点 M 在左右摄像机图像平面上的无畸变投影坐标, 有 $m_r^T F m_l = 0$ 成立。根据式(2), 利用极线约束条件, 通过最小化点到极线的距离建立优化目标函数:

$$g_l(k_l, k_r, F) = \frac{(m_r^T F m_l)^2}{(F^T m_r)^2 + (F m_l)^2}. \quad (6)$$

为了达到最佳的优化效果, 应该降低参数空间的维度, 分别对 F 阵和畸变参数进行估计^[10], 在畸变系数的每次优化迭代中进行 F 阵的估计。 F 阵的估计用 Levenberg-Marquardt 优化方法, 而畸变系数使用 Downhill-Simplex 法进行估计。求解此非线性优化问题, 就可以得到两个摄像机畸变系数最优解。

3.2 求解有效焦距

将图像坐标系的原点平移到主点, 设 f_x^l, f_y^l 为左摄像机的有效焦距, f_x^r, f_y^r 为右摄像机的有效焦距, 考虑到 $f_x^l \approx f_y^l = f_l, f_x^r \approx f_y^r = f_r$ 。摄像机内部参数矩阵可变为:

$$A_l = \text{diag}(f_l, f_l, 1), A_r = \text{diag}(f_r, f_r, 1).$$

利用 8 组以上经过畸变校正的匹配点求解出基本矩阵 F , 设 $e_l = [e_{l1}, 0, e_{l3}]^T$ 和 $e_r = [e_{r1}, 0, e_{r3}]^T$ 分别为左右摄像机的极点, 由

$$F e_l = 0, F^T e_r = 0, \quad (7)$$

分别求得两极点, 根据 Hartley 自标定方法^[11], 由于摄像机内参数矩阵的简化, 左右摄像机中绝对二次曲线的图像(IAC)为 $\text{diag}(1, 1, k_l^2)$ 和 $\text{diag}(1, 1, k_r^2)$, 此时 F 可以表示为如下简化形式

$$F \approx \begin{bmatrix} e_{r3} & & \\ & 1 & \\ & & e_{r1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_1 \\ c_3 & c_4 & c_3 \\ c_{l1} & c_2 & c_{l1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{l3} \\ 1 \\ e_{l1} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

由式(9)可以计算出有效焦距的初始值:

$$f_l^2 = \frac{-c_1 c_3 e_{l1}^2}{c_1 c_3 e_{l3}^2 + c_2 c_4}, f_r^2 = \frac{-c_1 c_2 e_{r1}^2}{c_1 c_2 e_{r3}^2 + c_3 c_4}. \quad (9)$$

求得有效焦距的初值后,可以进一步对其进行精确求解,根据式(6)利用极线约束,通过最小化点到极线的距离建立优化目标函数:

$$g_2(f_x^l, f_y^l, f_x^r, f_y^r) = \frac{(\mathbf{A}_r^{-1} \mathbf{m}_r^T \mathbf{F} \mathbf{m}_l \mathbf{A}_l^{-1})^2}{(\mathbf{F}^T \mathbf{m}_r)^2 + (\mathbf{F} \mathbf{m}_l)^2}. \quad (10)$$

以 $f_x^l = f_y^l = f_l, f_x^r = f_y^r = f_r$ 作为初值,采用 Levenberg-Marquardt 优化方法可以得到两摄像机有效焦距的最优值。

3.3 求解双目视觉传感器结构参数

设 \mathbf{E} 为双目视觉传感器的本质矩阵。利用上面求得的左右摄像机内参数,根据 $\mathbf{E} = \mathbf{A}_r^{-T} \mathbf{F} \mathbf{A}_l^{-1}$ 可以求得 \mathbf{E} 。对 \mathbf{E} 矩阵进行奇异值分解,可以求得两个旋转矩阵 \mathbf{R} 和带有比例系数的平移矢量 $t'^{[9]}$ 。若 \mathbf{E} 的奇异值分解为 $\mathbf{E} = \mathbf{U} \mathbf{A} \mathbf{V}^T$

$$\text{设 } \mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{有}$$

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1 = \mathbf{U} \mathbf{W} \mathbf{V}^T \\ \mathbf{R}_2 = \mathbf{U} \mathbf{W}^T \mathbf{V}^T \\ t' = \mathbf{Z} \mathbf{U} \mathbf{Z}^T \end{cases}. \quad (11)$$

双目视觉传感器的结构参数对应 4 种可能解,可使用以下条件判断出正确的组合:

(1) 一维靶标上的特征点在空间中必然位于双目视觉传感器的前方,使用双目视觉传感器重建出来的特征点坐标的 z 值恒为正值。

(2) 根据摄像机的位置关系可以直接判断 t' 的符号。例如,若 \mathbf{R} 和 $t' = [t_x \quad t_y \quad t_z]^T$ 表示的为从左摄像机到右摄像机的欧氏变换,则必然有 $t_x < 0$ 。

这里 $\|t'\| = 1$, 必须确定比例系数 $\theta = \left\| \frac{t'}{t} \right\|$ 才能最终确定平移矢量 t , 由于一维靶标的两个端点的距离 L 已知,利用上面求出的 \mathbf{R} 和比例意义的 t' , 根据式(5)可以重建出两个端点的空间三维坐标,从而得到比例意义上的两端点距离 L' 。计算出每幅图像对应的比例系数 θ , 最后取平均值作为最终的比例因子,即

$$\theta = \frac{L}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i}, \quad (12)$$

其中 n 为图像数,有:

$$t = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T = \theta t'. \quad (13)$$

由于噪声等因素的影响,空间点在图像平面的投影存在误差,因此重建出来特征点的空间三维坐标也存在误差。设通过三维重建得到第 i 幅图像中一维靶标的两个端点的三维坐标分别为

p_1^i 和 p_2^i , 计算得到两端点间距离为 d , 有:

$$g_2(r_x, r_y, r_z, t_x, t_y, t_z) = |L - d(p_1^i, p_2^i)|, \quad (14)$$

其中, r_x, r_y, r_z 为旋转矩阵 \mathbf{R} 的旋转向量表示形式。如果投影矩阵的估计存在偏差,由投影矩阵计算得到的基本矩阵 \mathbf{F} 将无法满极线约束条件, m_l^i 和 m_r^i 分别为第 i 组图像中空间点 M 在左右摄像机图像平面上的投影坐标,有:

$$g_3(r_x, r_y, r_z, t_x, t_y, t_z) = |m_r^{iT} \mathbf{A}_r^{-T} \mathbf{R} [t]_x \mathbf{A}_l^{-1} m_l^i|. \quad (15)$$

由式(14)和(15),建立最终的优化目标函数

$$f(x) = \min \left| \rho_1 \sum_{i=1}^N [g_2(x)]^2 + \rho_2 \sum_{i=1}^{2N} [g_3(x)]^2 \right|, \quad (16)$$

其中 $x = (r_x, r_y, r_z, t_x, t_y, t_z)$, ρ_1 和 ρ_2 为权重系数,一般可以取 $\rho_1 = 10, \rho_2 = 0.1$, 需要求解的系统参数一共为 6 个,而基本矩阵需要至少 4 组对应点才能求解,因此一维靶标至少需要在空间中任意摆放 4 次以上。以前面线性求解得到的结构参数作为初值,利用 Levenberg-Marquardt 优化法求解此非线性优化问题,就可以得到双目视觉传感器结构参数的最优解。

3.4 整体优化

为了进一步减少摄像机内参数不准确带来的误差,将双目视觉传感器的所有内外参数进行了整体非线性优化,根据双目视觉传感器测量模型有:

$$\frac{t_x - u_r t_z}{u_r (r_{31} u_l + r_{32} v_l + r_{33}) - (r_{11} u_l + r_{12} v_l + r_{13})} = \frac{t_y - v_r t_z}{v_r (r_{31} u_l + r_{32} v_l + r_{33}) - (r_{21} u_l + r_{22} v_l + r_{23})}. \quad (17)$$

设:

$$g_4(x) = (t_x - u_r t_z) [v_r (r_{31} u_l + r_{32} v_l + r_{33}) - (r_{21} u_l + r_{22} v_l + r_{23})] - (t_y - v_r t_z) [u_r (r_{31} u_l + r_{32} v_l + r_{33}) - (r_{11} u_l + r_{12} v_l + r_{13})]. \quad (18)$$

由于对左右相机的内部参数进行了修正,需要重新估计本质矩阵 \mathbf{E} , 构造新的目标函数为:

$$f(x) = \min \left| \rho_1 \sum_{i=1}^N [g_2(x)]^2 + \rho_2 \sum_{i=1}^{2N} [g_3(x)]^2 + \rho_3 \sum_{i=1}^{2N} [g_4(x)]^2 \right|, \quad (19)$$

其中, $x = (r_x, r_y, r_z, t_x, t_y, t_z, f_x^l, f_y^l, f_x^r, f_y^r, k_l, k_r)$ 此时需要求解的变量共为 12 个,利用 Levenberg-Marquardt 优化法求解此非线性优化问题得到两摄像机内部参数的精确解,同时获得双目视觉传感器结构参数的全局最优解。

4 实验结果

对于本文所提出的方法,分别用仿真和实物实验进行了验证。

4.1 计算机仿真

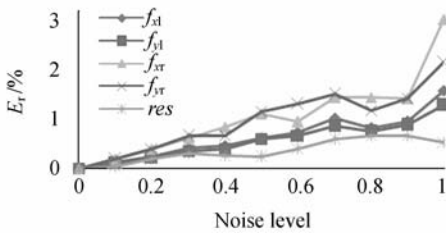
仿真实验中将双目视觉传感器置于 5 000 mm×5 000 mm 的视场之中,其参数如表 1 所示。标定使用的基线尺长度为 1 500 mm,随机放置于视场中 20 个不同的位置,在特征点的图像坐标上加上均值为 0,方差从 0 到 1 像素变化的高斯噪声,每个噪声水平做 10 次实验。

表 1 仿真双目传感器参数

Tab.1 Simulated parameters of stereo vision sensor

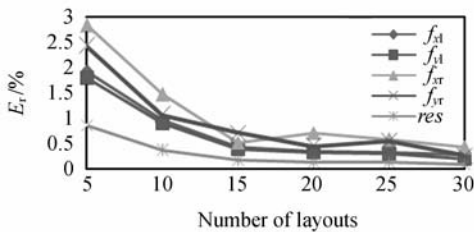
	f_x	f_y	u_0	v_0	k	
左	1 000.00	1 000.00	512.00	384.00	0.80	
右	1 000.00	1 000.00	512.00	384.00	0.80	
	r_x	r_y	r_z	t_x	t_y	t_z
	0.05	0.80	0.05	-4 000.00	50.00	1 500.00

标定结果如图 2 所示,其中 res 为标定残差,即用标定结果重建各幅图像中基线尺两特征点间距离与真实值的均方根误差。



(a) 不同噪声下结果

(a) Calibration results under different noise levels



(b) 不同摆放次数下结果

(a) Calibration result under different views

图 2 仿真标定结果

Fig.2 Simulated calibration results

如图可知在噪声为 1 个像素时,各参数标定误差在 3% 左右,标定残差在 0.5% 左右。图 2 (b)所示为标定误差随基线尺摆放次数的变化规律,当基线尺摆放超过 15 次以上时,标定结果基本趋于稳定。另外,在实际应用中,基线尺的摆放位置应均匀分布于视场内的各个位置,这样标定后的双目视觉传感器在测量范围内的精度将更均匀可靠。

4.2 实物实验

采用两台 Canon EOS-5D 数码相机和 Canon EF35mmF/2 镜头组成双目视觉传感器,图像分辨率为 4 368 pixel×2 912 pixel。传感器的测量范围约为 6 000 mm×4 500 mm。使用两端带有发光特征点的基线尺进行标定,两特征点中心间距为 $(1\ 218.640 \pm 0.005)$ mm。

将基线尺在双目视觉传感器测量区域中任意摆放 22 次,共得到 44 组对应观测点。计算得到左右摄像机的内部参数如表 2 所示。

表 2 摄像机内参数标定结果

Tab.2 Calibration results of intrinsic parameters of cameras

	f_x	f_y	u_0	v_0	k
左	4 365.340	4 365.730	2 183.117	1 454.640	-0.090
右	4 358.469	4 359.078	2 185.997	1 467.322	-0.091



图 3 用于标定的一维靶标图像(局部)

Fig.3 Image of 1D target used in calibration (part)

使用周富强在文献[7]中的方法进行计算,得到

$$P_{o1} = \begin{bmatrix} 8.010 \times 10^{-1} & -4.033 \times 10^{-2} & 5.973 \times 10^{-1} & -4.574 \times 10^3 \\ -1.720 \times 10^{-2} & 9.989 \times 10^{-1} & -4.437 \times 10^{-2} & 6.097 \times 10^1 \\ -5.984 \times 10^{-1} & 2.527 \times 10^{-2} & 8.008 \times 10^{-1} & 1.492 \times 10^3 \end{bmatrix}.$$

利用标定结果重建各幅标定图片中基线尺两特征点间的距离并与真实值进行比较,得到的标定均

方根误差为 0.108 mm。

利用本文方法进行计算,得到:

$$P_{o2} = \begin{bmatrix} 8.014 \times 10^{-1} & -4.041 \times 10^{-2} & 5.967 \times 10^{-1} & -4.564 \times 10^3 \\ -1.720 \times 10^{-2} & 9.989 \times 10^{-1} & -4.453 \times 10^{-2} & 6.127 \times 10^1 \\ -5.979 \times 10^{-1} & 2.543 \times 10^{-2} & 8.012 \times 10^{-1} & 1.495 \times 10^3 \end{bmatrix}$$

标定均方根误差为 0.046 mm。

为了评估标定的精度,再将基线尺任意放置在测量区域的 10 个不同位置,使用双目视觉传感器拍摄图像并对基线尺两标志点间长度进行测量,将获得的测量值与真实值 1 218.640 mm 进

行比较。表 3 列出了测量数据,使用文献[7]方法计算得到的结构参数对应的测量均方根误差为 0.116 mm,使用本文提出的方法计算得到的结构参数对应的测量均方根误差为 0.061 mm。

表 3 双目视觉传感器测量数据

Tab. 3 Measurement data of stereo vision sensor

序号	摄像机	特征点三维坐标			周的方法 ^[7]		本方法	
		x/mm	y/mm	z/mm	测量距离/mm	距离误差/mm	测量距离/mm	距离误差/mm
1	左	-1 168.293	-738.090	5 460.316	1 218.747	-0.107	1 218.694	-0.054
	右	-61.493	-463.883	5 890.606				
2	左	-1 844.297	-753.534	5 252.700	1 218.760	-0.120	1 218.709	-0.069
	右	-741.382	-481.039	5 693.950				
3	左	-1 228.172	-837.388	5 527.252	1 218.512	0.128	1 218.694	-0.054
	右	-151.744	-366.849	5 850.774				
4	左	-1 284.290	-667.486	5 513.906	1 218.699	-0.059	1 218.668	-0.028
	右	-121.835	-543.981	5 858.397				
5	左	-782.981	-731.840	5 701.169	1 218.545	0.095	1 218.577	0.063
	右	368.463	-463.010	5 995.719				
6	左	-160.179	-681.771	5 825.363	1 218.820	-0.180	1 218.746	-0.106
	右	952.775	-504.617	6 289.552				
7	左	25.614	-813.847	5 925.426	1 218.473	0.167	1 218.589	0.051
	右	1 079.556	-353.537	6 327.913				
8	左	257.864	-754.956	6 071.984	1 218.528	0.112	1 218.582	0.058
	右	1 388.026	-402.723	6 360.903				
9	左	822.298	-710.105	6 325.058	1 218.569	0.071	1 218.572	0.068
	右	1 985.276	-436.874	6 565.345				
10	左	1 168.741	-702.007	6 459.861	1 218.670	-0.030	1 218.656	-0.016
	右	2 332.507	-431.956	6 700.437				
均方根误差/mm					0.116		0.061	

由仿真实验和实物实验的结果可知,本方法与现有方法相比标定精度得到了明显的提高,这

是由于本方法不依赖于难于加工的大型靶标,而是利用易于加工的大型基线尺。将基线尺在视场

的不同位置摆放获得的特征点坐标统一进行计算和优化,并且同时计算摄像机内部参数和双目传感器结构参数,使得最后得到的内外参数结果同时达到全局最优,消除了积累误差。

5 结 论

本文提出了一种新的基于一维靶标的双目视觉传感器参数现场标定方法。利用带有两个标志点的已知长度的一维靶标在大视场测量空间中

自由移动,传感器获取多幅标定靶标的图像,通过两个摄像机获得的匹配点估计传感器的基本矩阵,进而获得双目视觉传感器的全部参数。与已有的标定方法相比较,一维靶标加工容易,成本低,维护容易,大大提高了标定效率。实验证明,在计算传感器结构参数时对摄像机内参数进行优化,大大提高了算法的收敛速度和精确度,在 $6\ 000\text{ mm}\times 4\ 500\text{ mm}$ 视场范围内测量精度达到 0.06 mm ,适用于大视场视觉测量系统的现场标定。

参考文献:

- [1] SAI R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[C]. *Proc. of CVPR*, 1986;364-374.
- [2] FAUGERAS O, LUONG Q, MAYBANK S. Camera self-calibration: theory and experiments[C]. *Proc. of the 2th ECCV*, 1992;321-234.
- [3] 张健新,段发阶,叶声华.“两步法”求取双目视觉系统中摄像机位置关系[J]. *光电工程*, 1998, 25(5): 37-41.
ZHANG J X, DUAN F J, YE SH H. “Two step” method for binocular sensor self-calibration [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, 25(5): 37-41. (in Chinese)
- [4] 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.
LI M ZH, ZHANG A W, HU SH X. On 3D measuring system of sheet metal surface based on computer vision[J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2002, 13(14): 1177-1180. (in Chinese)
- [5] 马永壮,刘伟军. 一种基于双目主动视觉的线性自标定算法[J]. *机器人*, 2004, 26(6): 486-490.
MA Y ZH, LIU W J. A linear self-calibration algorithm based on binocular active vision[J]. *Robot*, 2004, 26(6): 486-490. (in Chinese)
- [6] 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.
LI W M, MENG H, WANG J P, et al.. Wide view calibration of single cameras [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007, 37(6): 627-630. (in Chinese)
- [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系统标定[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]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(6): 92-96. (in Chinese)
- [8] HARTLEY R. In defense of the eight-point algorithm[J]. *IEEE Transactions on PAMI*, 1997, 19(6): 580-593.
- [9] CLARKE T A, FRYER J G, WANG X. The principal point and CCD cameras[J]. *Photogrammetric Record*. 1998, 16(92): 293-312.
- [10] ZHANG Z. On the epipolar geometry between two images with lens distortion[J]. *Proc. ICPR 1996*: 407-411.
- [11] HARTLEY R. Extraction of focal lengths from the fundamental matrix[R]. *Technical report, G. E. CRD, Schenectady, NY*, 1993.
- [12] 周富强,郑继贵,杨学友. CCD摄像机快速标定技术[J]. *光学精密工程*, 2002, 8(1): 96-100.
ZHOU F Q, ZHU J G, YANG X Y. A high speed CCD camera calibration technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 8(1): 96-100. (in Chinese)
- [13] 陈刚,陈华,车仁生. 空间点的立体视觉传感器标定方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9): 1439-1444.
CHEN G, CHEN H, CHE R SH. Calibration method for stereo vision sensor based on spatial points[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1439-1444. (in Chinese)
- [14] 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 32D foot shapes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(7):1124-1129. (in Chinese)

- [15] 周富强, 郝继贵, 杨学友, 等. 双目视觉传感器的现场标定技术[J]. *仪器仪表学报*, 2000,21(2):

142-145.

ZHOU F Q, ZHU J G, YANG X Y, *et al.*. A field calibration technique for binocular vision sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000,21(2):142-145. (in Chinese)

作者简介:



孙军华(1975—),男,博士,讲师,主要从事光电精密测量、机器视觉和图像理解方面的研究。E-mail: sjh@buaa.edu.cn



刘谦哲(1981—),男,博士研究生,主要从事光电精密测量、机器视觉和图像理解方面的研究。E-mail: liuqz@aspe.buaa.edu.cn



吴子彦(1983—),男,硕士研究生,主要从事光电精密测量、机器视觉和图像理解方面的研究。E-mail: wuziyuan@asee.buaa.edu.cn



张广军(1965—),男,博士,教授,主要从事光电精密测量、机器视觉和图像理解方面的研究。E-mail: gjzhang@buaa.edu.cn

● 下期预告

基于单片可编程系统的红外焦平面阵列实时非均匀性校正

代少升,张新立

(重庆邮电大学通信与信息工程学院,重庆 400065)

针对红外焦平面阵列(IRFPA)非均匀性多点校正过程中涉及的数据量大,难于实现实时校正的特点,提出了利用 Altera 公司单片可编程系统(SOPC)对红外焦平面阵列进行多点实时校正的方法。利用 SOPC 的 NiosII 处理器定制指令功能,实现了软件算法的硬件化,能够有效提高红外焦平面阵列实时非均匀性校正速度。实验结果表明:对相同的多点校正算法,利用 SOPC 硬件实现算法的校正速度比 TMS320C6201 DSP 硬件快 1.5 倍,且校正过程简单灵活,图像效果理想,能够很好地满足红外焦平面阵列实时非均匀性校正要求。