

文章编号: 0253-2239(2009)12-3433-07

基于柔性立体靶标的摄像机标定

孙军华 刘 震 张广军 魏振忠 江 洁

(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 针对大视场摄像机标定中,大尺寸靶标加工困难,小尺寸靶标标定精度不高等问题,提出一种基于柔性立体靶标的摄像机标定方法。柔性立体靶标是由多个小平面靶标(又称子靶标)灵活组合的一种靶标形式,将多个小的子靶标摆放在视场周边,以其中 1 个子靶标坐标系为基础建立柔性立体靶标坐标系。以子靶标之间位置关系不变为约束条件,将各子靶标特征点的局部坐标统一到柔性立体靶标坐标系下,建立以重投影误差为最小的目标函数,采用非线性优化方法得到摄像机参数的最优解。仿真和实验证明采用柔性立体靶标可以达到与相同靶标区域大小的大平面靶标相当的标定结果。

关键词 机器视觉;摄像机标定;大视场;柔性立体靶标;小靶标

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3433

Camera Calibration Based on Flexible 3D Target

Sun Junhua Liu Zhen Zhang Guangjun Wei Zhenzhong Jiang Jie

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

Abstract The calibration of camera with wide field-of-view is a challenging problem because a target of large scale is hard to machine, while using target of small scale cannot satisfy the required accuracy. A camera calibration method based on flexible three-dimensional(3D) target is proposed to solve the calibration problem of camera with wide field-of-view. Flexible 3D target is a target consisting of several planar targets, called sub-targets, which are placed flexibly according to the range of the camera's view-field. The coordinate frame of the flexible 3D target is constructed based on a sub-target. By using the invariance of the relative positions between sub-targets in the flexible 3D target, the local coordinate frame of each sub-target is transformed into the coordinate frame of the flexible 3D target. By minimizing the re-projection error of feature points on all the sub-targets, the maximum likelihood estimate of the camera parameters can be obtained. Synthetic and experiments show that the accuracy of the proposed calibration method is almost the same as the calibration method using a big planar target whose area is similar to that of the flexible 3D target.

Key words machine vision; camera calibration; wide field-of-view; flexible 3D target; small target

1 引 言

摄像机模型是物体空间和图像平面的一种映射关系。摄像机标定过程就是确定摄像机模型中各参数的过程。对于以摄像机为主要测量设备的视觉测量系统来说,摄像机标定结果直接影响着视觉测量系统的精度。

摄像机标定一般可分为传统标定方法和自标定方法两类。传统标定方法依靠形状与尺寸已知的靶

标,求取摄像机模型的内部参数和外部参数,比较典型的有:基于三维靶标的标定方法^[1,2]。根据三维靶标特征点与图像点的对应关系求解摄像机内部参数,这种方法的优点是标定结果精度高,缺点是三维靶标存在自身遮挡问题,并且加工难度大,费用高;基于二维靶标的标定方法^[3~5],标定中摄像机与靶标都可以自由移动,不需要知道运动参数,这种方法标定过程灵活,可以获得高质量的靶标图像,标定精

收稿日期: 2009-01-16; 收到修改稿日期: 2009-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(50727502, 50805006)资助课题。

作者简介: 孙军华(1975—),男,副教授,主要从事光电精密测试、机器视觉等方面的研究。E-mail: sjh@buaa.edu.cn

度较高,缺点是靶标较小时,标定结果精度较低;基于一维靶标的标定方法^[6~8],利用一维靶标特征点与图像点之间的对应关系以及一维靶标点共线的特点实现摄像机标定,有一定局限性^[8~10],无法完成单摄像机标定,因此该方法目前应用较少。自标定方法不需要靶标,仅依靠多幅图像对应点之间关系求解摄像机内部参数^[11~15],由于不需要靶标,只需要建立图像对应点,所以这种标定方法灵活方便,它的缺点是稳健性差,主要应用在精度要求不高的场合。

Zhang Zhengyou^[6]提出的二维靶标标定方法简单实用、精度较高,目前被广泛应用,它的缺点是随着靶标面积在视场中所占比例的逐渐变小,标定结果急剧恶化。这主要是因为小靶标的每个摆放位置只能提供小范围的特征点数据,虽然可以通过增加小靶标摆放次数增加特征点数量,但每个摆放位置的特征点数据之间没有联系和约束,因此标定结果不能真实反映整个视场空间与像平面之间的透视投影关系。尤其是摄像机畸变系数求解时,需要尽量分布空间较大的特征点数据,如果靶标较小,摄像机畸变系数的标定结果会偏差较大,从而导致整个摄像机标定结果精度降低。

针对大视场摄像机标定困难的问题,提出一种采用柔性立体靶标的摄像机标定方法。该方法根据摄像机视场范围将多个小平面靶标灵活分布在视场周边,尽量获得大的靶标区域。在标定过程中,将各小平面靶标之间的位置关系作为优化变量加入到以重投影误差为最小的目标函数中,通过非线性优化方法精确求解摄像机参数。

2 摄像机模型

如图 1 所示, π_c 为摄像机图像平面, Ouv 为图像坐标系, π_n 为归一化图像平面, $O_n x_n y_n$ 为归一化图像坐标系。设空间点 P 在世界坐标系 $O_w x_w y_w z_w$ 下的齐次坐标为 P_w , 在摄像机坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 下的齐次坐标为 P_c , 在图像坐标系 Ouv 下投影点 P_c 的无

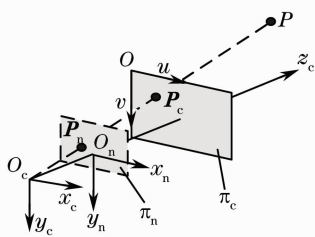


图 1 摄像机模型
Fig. 1 Camera model

畸变图像齐次坐标为 $P_u = [u, v, 1]^T$, 在归一化图像坐标系 $O_n x_n y_n$ 下投影点 P_n 的归一化图像齐次坐标为 $P_n = [x_n, y_n, 1]^T$ 。

根据摄像机透视投影模型可得

$$\rho P_u = \rho A P_n = A [I \ 0] P_c = A [R \ t] P_w \quad (1)$$

其中 ρ 为比例系数, R, t 表示世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移矢量, A 为摄像机内参矩阵, 具体表示为

$$A = \begin{bmatrix} a_x & \gamma & u_0 \\ 0 & a_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 a_x, a_y 分别为图像坐标系 u 轴、 v 轴方向上的有效焦距, u_0, v_0 是摄像机主点坐标, γ 为图像坐标系 u 轴与 v 轴的不垂直因子。

实际摄像机成像系统中往往存在畸变。只考虑径向畸变, 设 P_c 的带畸变图像齐次坐标为 $P_d = [u_d, v_d, 1]^T$, P_d 与 P_u 之间的关系可表示为

$$\begin{cases} u_d = u + (u - u_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4), \\ v_d = v + (v - v_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4). \end{cases} \quad (3)$$

式中 $r = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}$, k_1, k_2 为径向畸变系数。

3 标定原理

将多个平面靶标(称为子靶标)根据摄像机视场范围灵活摆放, 由于它们之间的位置关系不变, 将它们考虑为一个靶标整体, 就构成了一种柔性立体靶标。

图 2 即为一个柔性立体靶标。以其中任意一个子靶标坐标系为基础, 建立柔性立体靶标坐标系 $O_T x_T y_T z_T$ 。 $R_{i,T}, t_{i,T} (i = 2, \dots, n)$ 为各子靶标坐标系 $O_i x_i y_i z_i (i = 2, \dots, n)$ 到柔性立体靶标坐标系的旋转矩阵与平移矢量。柔性立体靶标中子靶标总个数为 n 。

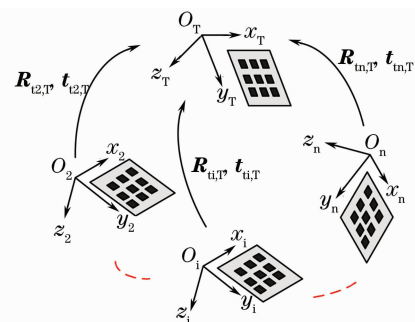


图 2 柔性立体靶标示意图
Fig. 2 Flexible 3D target

设 P_u 为第 i 子靶标上特征点 P_i 在子靶标坐标系下齐次坐标, \tilde{P}_u 为 P_i 在柔性立体靶标坐标系下

齐次坐标, $\tilde{\mathbf{P}}_{ti}$ 和 \mathbf{P}_{ti} 的变换关系为

$$\tilde{\mathbf{P}}_{ti} = [\mathbf{R}_{ti,T} \quad \mathbf{t}_{ti,T}] \mathbf{P}_{ti}. \quad (4)$$

柔性立体靶标通过 $\mathbf{R}_{ti,T}, \mathbf{t}_{ti,T}$ 将多个不相关的子靶标紧密的联系在一起, 形成一个大的靶标区域, 以达到代替大靶标的效果。

根据摄像机视场范围, 将多个小平面靶标摆放在视场周边, 生成一个尽量大的靶标区域。摄像机拍摄柔性立体靶标多次。求取子靶标平面与摄像机像平面的单应矩阵 \mathbf{H} , 根据单应矩阵 \mathbf{H} 求取摄像机参数。计算柔性立体靶标中的 $\mathbf{R}_{ti,T}, \mathbf{t}_{ti,T}$ 。建立以重投影误差为最小的目标函数, 采用非线性优化方法计算摄像机参数的最优解, 就完成了摄像机标定。

3.1 求解子靶标平面与像平面之间的单应矩阵

设 \mathbf{P}_w 为 P_i 在摄像机图像坐标系下的齐次坐标, $\mathbf{R}_{ti,c}, \mathbf{t}_{ti,c}$ 为子靶标坐标系 $O_i x_i y_i z_i$ 到摄像机坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 的旋转矩阵和平移矢量, 则 \mathbf{P}_{ti} 与 \mathbf{P}_w 的变换关系为

$$\rho_1 \mathbf{P}_w = \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}_{ti,c}] \mathbf{P}_{ti} = \mathbf{H} \mathbf{P}_{ti}, \quad (5)$$

其中 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 为 $\mathbf{R}_{ti,c}$ 的第 1, 2 列, $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \mathbf{h}_3]$ 为子靶标平面到摄像机像平面间的单应矩阵, $\mathbf{h}_k (k=1, 2, 3)$ 为 \mathbf{H} 的第 k 列。

3.2 求解摄像机参数

根据旋转矩阵 $\mathbf{R}_{ti,c}$ 的正交性 ($\mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_2 = 0, \mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2^T \mathbf{r}_2$) 可得到两个基本方程

$$\begin{cases} \mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0, \\ \mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2. \end{cases} \quad (6)$$

令

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

由于 \mathbf{B} 是对称矩阵, 可设一个六维向量为

$$\mathbf{b} = (B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33})^T, \quad (8)$$

因此可以将(6)式写成关于 \mathbf{b} 为未知数的齐次方程

$$\mathbf{v} \mathbf{b} = 0. \quad (9)$$

其中 \mathbf{v} 为 2×6 的矩阵。

如果摄像机多个拍摄位置共有 n_c 个子靶标, 将 n_c 个这样的方程组叠加起来, 可得

$$\mathbf{V} \mathbf{b} = 0. \quad (10)$$

其中 \mathbf{V} 为 1 个 $2n_c \times 6$ 的矩阵。如果 $n_c \geq 3$, 通过对矩阵 \mathbf{V} 进行奇异值分解(SVD)求解出 \mathbf{b} 。

根据(10)式, 采用 Cholesky 矩阵分解算法求解出 \mathbf{A}^{-1} , 求逆得到 \mathbf{A} 。其中子靶标坐标系与摄像机坐标系的变换关系可以相应求得^[2,16]。

3.3 确定 $\mathbf{R}_{ti,T}, \mathbf{t}_{ti,T}$

建立柔性立体靶标的关键是确定柔性立体靶标中各子靶标坐标系到柔性立体靶标坐标系的位置关系。

在摄像机第 j 个拍摄位置, $\mathbf{R}_{T(j),c}, \mathbf{t}_{T(j),c}$ 为柔性立体靶标坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移矢量, $\mathbf{R}_{ti(j),c}, \mathbf{t}_{ti(j),c}$ 为第 i 个子靶标坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移矢量。根据第 3.2 节计算结果, 以摄像机坐标系为中介, 求解出各子靶标坐标系到柔性立体靶标坐标系的 $\mathbf{R}_{ti,T}, \mathbf{t}_{ti,T}$, 变换为

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{ti,T} = [\mathbf{R}_{T(j),c}]^{-1} \mathbf{R}_{ti(j),c}, \\ \mathbf{t}_{ti,T} = [\mathbf{R}_{T(j),c}]^{-1} [\mathbf{t}_{ti(j),c} - \mathbf{t}_{T(j),c}]. \end{cases} \quad (i = 2, \dots, n) \quad (11)$$

3.4 非线性优化

在摄像机第 j 个拍摄位置, 子靶标 i 中第 k 个特征点在子靶标 i 坐标系下齐次坐标为 $\mathbf{P}_{ti,j,k}$, 在柔性立体靶标坐标系下齐次坐标为 $\tilde{\mathbf{P}}_{ti,j,k}$, 在图像坐标系下的重投影图像齐次坐标为 $\tilde{\mathbf{P}}_{wi,j,k}$, $\tilde{\mathbf{P}}_{di,j,k}$ 为其加入镜头畸变的重投影图像齐次坐标。 $\tilde{\mathbf{P}}_{wi,j,k}$ 与 $\mathbf{P}_{di,j,k}$ 的变换关系见(3)式。根据摄像机模型可得

$$\rho_1 \tilde{\mathbf{P}}_{wi,j,k} = \mathbf{A} [\mathbf{R}_{T(j),c} \quad \mathbf{t}_{T(j),c}] \tilde{\mathbf{P}}_{ti,j,k} = \mathbf{A} [\mathbf{R}_{T(j),c} \quad \mathbf{t}_{T(j),c}] [\mathbf{R}_{ti,T} \quad \mathbf{t}_{ti,T}] \mathbf{P}_{ti,j,k}. \quad (12)$$

为了得到高精度的标定结果, 将各子靶特征点的局部坐标通过(4)式全部转换为柔性立体靶标坐标系下的坐标, 以此得到大空间范围的特征点数据。假设图像噪声服从零均值的高斯分布且独立分布, 建立以重投影误差为最小的目标函数

$$f(a) = \min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^t d(\mathbf{P}_{di,j,k}, \tilde{\mathbf{P}}_{di,j,k})^2, \quad (13)$$

其中 $a = (\mathbf{A}, k_1, k_2, \mathbf{R}_{ti,T}, \mathbf{t}_{ti,T}, \mathbf{R}_{T(j),c}, \mathbf{t}_{T(j),c})$, n 为柔性立体靶标中子靶标个数, m 为摄像机拍摄次数, t 为子靶标 i 中特征点个数。

采用非线性优化方法(如 Levenberg-Marquardt) 即可得到 a 在最大似然意义下的最优解。

4 实验结果

4.1 仿真实验

摄像机焦距为 55 mm, 图像大小为 4368 pixel \times 2912 pixel, 视场为 2000 mm \times 1350 mm, 工作距离为 3000 mm。摄像机内部参数 $a_x = 6710$, $a_y = 6710$, $\gamma = 0$, $u_0 = 2184$, $v_0 = 1456$, $k_1 = 0.14$, $k_2 = 0.17$ 。

4.1.1 柔性立体靶标所占区域对标定结果的影响

柔性立体靶标的最大特点是可以根据视场情况, 灵活确定子靶标位置, 形成不同大小的靶标区

域。下面分析在子靶标面积大小、数量均相同的前提下,靶标区域大小对摄像机标定结果的影响。

设定柔性立体靶标由 4 个子靶标构成,子靶标特征点个数为 6×6 ,特征点横纵向间距为 25 mm。柔性立体靶标中的 4 个靶标构成一个正方形靶标区域,将靶标区域在横纵方向上所占空间 L 从 200 mm 变化到 1000 mm,摄像机拍摄 10 个位置,在图像上加均值为 0, $\sigma = 0.1$ pixel 的高斯噪声,迭代 100 次。仿真结果如图 3 所示。

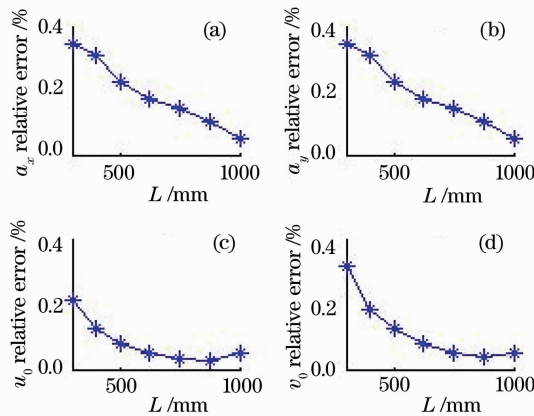


图 3 柔性立体靶标横纵向大小对标定结果的影响
Fig. 3 Calibration results with flexible 3D target of different sizes

由图 3 可见,多个小靶标所形成的靶标区域越大,标定结果越好,反之亦然。这主要是因为扩大子靶标间距,可以很直接的扩大柔性立体靶标在摄像机视场范围内的空间区域,因此标定结果也就更接近真实值。这就进一步印证了通过 $\mathbf{R}_{u,T}, \mathbf{t}_{u,T}$ 将各子靶标紧密联系在一起,形成一个大的靶标区域的有效性。因此在摄像机标定时,应尽量将子靶标摆放在摄像机视场的四周,形成一个大的靶标区域。

4.1.2 子靶标面积大小对标定结果的影响

设定柔性立体靶标有 4 个子靶标,形成一个 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 的靶标区域,子靶标特征点个数为 6×6 ,子靶标特征点横纵向间距 Δl 从 25 mm 变化到 85 mm,将柔性立体靶标在摄像机前合适位置摆放 10 次。为了进一步分析对比,采用一个特征点个数为 10×10 ,特征点横纵向间距从 25 mm 变化到 85 mm 的单一靶标,将平面靶标在摄像机前合适位置摆放 20 次,采用张方法对摄像机进行标定。在图像上加均值为 0, $\sigma = 0.1$ pixel 的高斯噪声,迭代 100 次,具体仿真结果如图 4 所示。

在柔性立体靶标区域大小不变的前提下,随着子靶标面积的减小,摄像机标定结果基本没变。而

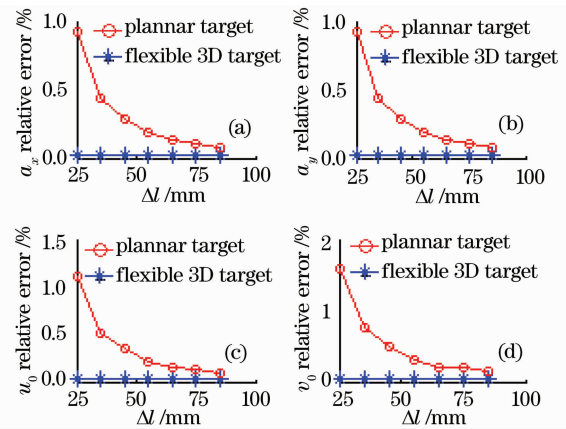


图 4 子靶标横纵向大小对标定结果的影响
Fig. 4 Calibration results with sub-targets of different sizes

采用单一靶标通过张方法进行摄像机标定时,靶标面积对标定结果影响很大。当靶标面积较小时,通过张方法标定摄像机效果欠佳。

由分析可知改变柔性立体靶标区域大小,也就是改变子靶标之间的距离,对摄像机标定结果影响较大,随着柔性立体靶标区域的增加,标定结果越好,反之亦然;在柔性立体靶标区域大小不变的前提下,改变子靶标面积对最后标定结果影响不大;采用单一靶标,通过张方法标定摄像机,随着靶标面积的减小标定结果急剧恶化。

4.1.3 对比仿真实验

为了证明采用柔性立体靶标标定摄像机的优越性,进行三组对比仿真实验。第一组采用柔性立体靶标根据介绍的方法标定摄像机,柔性立体靶标中有 4 个子靶标,子靶标特征点个数为 6×6 ,特征点横纵向间距为 25 mm,整个柔性立体靶标区域为 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$,4 个子靶标分布在靶标区域的 4 个角上;第二组采用大靶标,通过张方法标定摄像机,大靶标特征点个数为 10×10 ,特征点横纵向间距为 100 mm;第三组采用与柔性立体靶标中子靶标面积相近的小靶标,通过张方法标定摄像机,小靶标特征点个数为 10×10 ,特征点横纵向间距为 15 mm。前两组实验靶标摆放位置数为 10 次,第三组靶标摆放位置数为 30 次。在图像上加均值为 0, $\sigma = 0.1 \sim 1$ pixel 的高斯噪声,迭代 100 次。具体仿真结果如图 5~图 7,采用柔性立体靶标和采用大靶标的标定结果相近,远好于采用小靶标,同时三种方法的标定残差相同。

综合分析以上三组对比实验结果可知,柔性立体靶标提供的是大视场范围的,相互之间有约束关

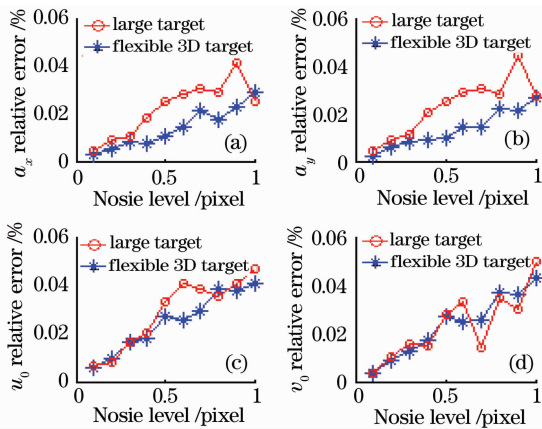


图 5 柔性立体靶标与大靶标标定结果对比图
 Fig. 5 Comparison of calibration results between the flexible 3D target and large target

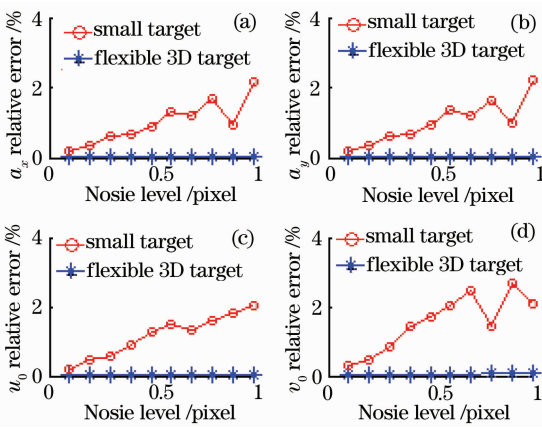


图 6 柔性立体靶标与小靶标标定结果对比图
 Fig. 6 Comparison of calibration results between the flexible 3D target and small target

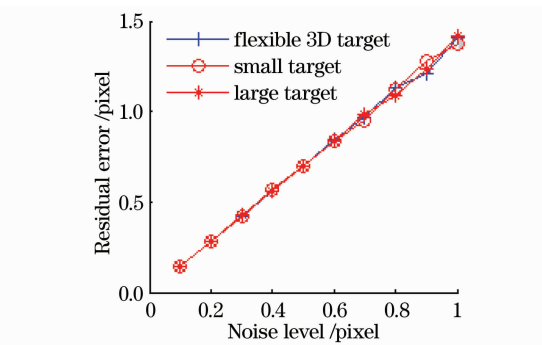


图 7 三种方法标定残差的比较
 Fig. 7 Comparison of calibration results of the three methods

系的三维数据,大靶标提供的是大面积的二维数据,两者都能提供大视场范围的特征点数据。因此通过这些特征点数据所得到的摄像机内部参数更能代表视场空间与摄像机平面之间的透视变换关系。而在第三组实验中小靶标的摆放次数虽然是前两组实验

靶标摆放次数的三倍,同时也尽量在整个摄像机视场空间范围内均匀分布,以保证特征点的数量和分布与前两组基本一致,但标定结果却与前两组相比要差很多。这主要因为小靶标每个摆放位置所提供的特征点数据分布范围较小,并且不同摆放位置的特征点数据没有联系和约束。尤其是在求解摄像机畸变系数时,特征点应尽量大的分布在视场空间中,而小靶标每个摆放位置只能提供小范围的二维数据,导致畸变系数标定精度不高,所以尽管三种方法的标定残差基本相同,但采用小靶标的标定结果与前两种方法相比精度要低。

4.2 实验

实验采用一台配有 50 mm 镜头的 Canon 5D 数码相机,图像分辨率为 4369 pixel × 2912 pixel。摄像机视场为 1100 mm × 900 mm,工作距离为 1800 mm 左右。如图 8 所示,柔性立体靶标由 4 个子靶标组成的(子靶标特征点个数为 10 × 10,特征点间距为 10.3 mm)。如图 9 所示,大靶标特征点个数为 12 × 10,特征点间距为 27.3 mm。

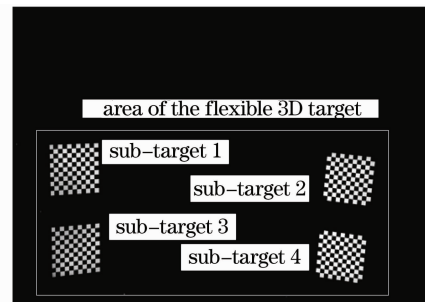


图 8 柔性立体靶标图像
 Fig. 8 Image of the flexible 3D target

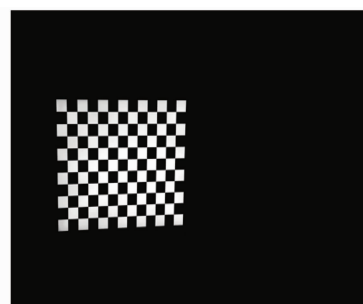


图 9 大靶标图像
 Fig. 9 Image of the large target

分别进行三组实验:第一组实验采用大靶标,通过张方法标定摄像机。第二组实验采用柔性立体靶标通过本文中介绍的标定方法标定摄像机。前两组实验,摄像机在不同位置拍摄 10 次。第三组实验采用与柔性立体靶标中子靶标面积相同的小靶标,通

过文献[6]的方法标定摄像机。摄像机拍摄小靶标30次。为了更直观的理解,将摄像机内参矩阵 \mathbf{A} 中的 γ 用图像坐标系之间的夹角 θ 来表示。

表1为三组实物实验的实验结果。采用大靶标的标定结果与采用柔性立体靶标的标定结果接近,与采用小靶标的标定结果相差较远。在前两组中,柔性立体靶标所占区域与大靶标面积大致相同,结果证明采用柔性立体靶标可以达到与相同靶标区域

大小的大靶标相当的标定结果,同时也证明了将小靶标组合起来构成一个大靶标区域以此提高摄像机标定精度的可行性。第三组尽管靶标摆放次数是前两组的三倍,但标定结果较差。采用小靶标标定摄像机时,单纯通过增加靶标摆放次数并不能提高摄像机标定精度。实物实验结果进一步印证了仿真实验结果,证明了采用柔性立体靶标标定大视场摄像机的可行性。

表1 实验标定结果

Table 1 Calibration result of camera

	a_x	a_y	u_0	v_0	k_1	k_2	θ	Residual error / pixel
Large target	6 708.379	6 730.256	2 224.040	1 443.867	0.143	0.167	90.044°	0.127
Flexible 3D target	6 710.677	6 710.748	2 224.786	1 447.538	0.148	0.133	90.018°	
Relative errors between flexible 3D target and large target / %	0.034	0.290	0.034	0.254	3.497	20.359	0.029	0.150
Small target	6 637.459	6 642.095	2 216.371	1 450.978	0.151	0.092	90.040°	
Relative errors between small target and large target / %	1.057	1.310	0.345	0.492	5.594	44.910	0.004	0.105

5 结 论

提出一种基于柔性立体靶标的摄像机标定方法。该方法将多个小平面对靶标根据摄像机视场范围灵活摆放组合在一起,以各小平面对靶标之间位置关系不变为约束条件,将所有靶标特征点坐标统一到柔性立体靶标坐标系下,从而获得大空间范围的特征点数据,进而提高摄像机标定精度。该方法标定精度高。在大视场摄像机标定时,由于无法加工一个与摄像机视场相符合的大靶标,只能使用小靶标。仿真和实物实验都证明采用柔性立体靶标可以达到与相同靶标区域大小的大靶标相当的标定结果,明显优于采用小靶标的标定结果。因此相对于小靶标,采用柔性立体靶标可以取得更高的测量精度。子靶标尺寸较小,加工方便,标定成本低。但由于小平面对靶标较多,所以提取靶标特征点比较费时,如果采用靶标特征点自动提取方法可以提高标定效率。

参 考 文 献

- Shen Yehu, Liu Jilin, Du Xin. Simultaneous three-Dimensional Environment Reconstruction and localization based on monocular vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 907~914
- 沈晔湖,刘济林,杜 歆. 单目视觉的同时三维场景构建和定位算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 907~914
- Lei Yanzhang, Zhao Huijie, Jiang Hongzhi. A three 2 dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1338~1342
- 雷彦章,赵慧洁,姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1338~1342
- Xu Qiaoyu, Che Rensheng. Study on single camera simulating stereo vision measurement technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2181~2186
- 徐巧玉,车仁生. 基于光学测棒的立体视觉坐标测量系统的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2181~2186
- R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses [J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, RA-3, (4): 323~344
- J. Y. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera calibration with distortion model and accuracy evaluation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(10): 965~980
- Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- X. Q. Meng, H. Li, Z. Y. Hu. A new easy camera calibration technique based on circular points [J]. *Proceedings of the 11th British Machine Vision Conference*, 2000, 496~505
- Zhang Zhengyou. Camera calibration with one-dimensional objects [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**(7): 892~899
- Wu Fuchao, Hu Zhanyi, Zhu Haijiang. Camera calibration with moving one-dimensional objects [J]. *Pattern Recognition*, 2005, **38**(5): 755~765
- Wang Liang, Wu Fuchano. Multi-camera calibration based on 1D calibration object [J]. *Acta Automation Sinica*, 2007, **33**(3): 225~231
- 王 亮,吴福朝. 基于一维标定物的多摄像机标定[J]. *自动化学报*, 2007, **33**(3): 225~231
- S. J. Maybank, O. D. Faugeras. A theory of self-calibration of a moving camera [J]. *International J. Computer Vision*, 1992,

- 8(2): 123~151
- 12 R. Hartley. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras [J]. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, 1992, 579~587
- 13 M. Pollefeys, L. Van Gool. A stratified approach to metric self-calibration [J]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997, 407~412
- 14 R. Hartley, L. DeAgapite, E. Hayman *et al.*. Camera calibration and search for infinity[J]. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, 510~517
- 15 A. Heyden, D. Q. Huynh. Auto-calibration via the absolute quadric and scene constraints [J]. *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition*, 2002, **2**: 631~634
- 16 Zhang Guangjun. Machine vision [M]. Beijing: Science press, 2005
张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005