

基于小靶标拼接的大视场摄像机标定方法

霍炬¹, 杨宁², 杨明², 董文博¹

- (1. 哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为了解决在大视场摄像机高精度标定中大尺寸靶标难以制作加工的问题, 提出了一种基于小靶标拼接的大视场摄像机标定方法。该方法将小靶标在摄像机视场内多个位置进行摆放, 通过各个小靶标之间的刚体变换, 并考虑拼接过程中存在的约束条件, 将各个小靶标拼接成一个覆盖整个摄像机视场的大靶标, 然后使用该大靶标对大视场摄像机进行标定。仿真和实际实验表明该方法标定精度与使用实际大靶标进行标定时标定精度相当, 能够实现对大视场摄像机的高精度标定。

关键词: 摄像机标定; 大视场; 刚体变换; 小靶标

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1474-06

Calibration of camera with wide field-of-view based on spliced small targets

Huo Ju¹, Yang Ning², Yang Ming², Dong Wenbo¹

- (1. Electrical Engineering Department, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to solve the problem that a large scale target is hard to fabricate in the high precision calibration of camera with wide field-of-view, a calibration method based on spliced small targets was proposed. In this method, small targets were placed in different positions in the field-of-view of the camera, and then a large scale target covering the whole field-of-view of the camera was spliced using the small targets on the basis of rigid transformation, while the respective constraints in the process of splicing were considered. Then the spliced large scale target was used to calibrate the camera with wide field-of-view. Simulation and real experiments results show that the precision of calibration with the spliced target is equivalent to the precision of calibration with real large scale target, indicating that the method proposed in this paper can achieve the high precision calibration for camera with wide field-of-view.

Key words: camera calibration; wide field-of-view; rigid transformation; small target

收稿日期: 2012-10-05; 修订日期: 2012-12-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.NSRIF.2014019)

作者简介: 霍炬(1977-), 男, 副教授, 博士, 主要从事视觉测量、半实物仿真方面的研究。Email: torch@hit.edu.cn

0 引言

随着工业制造技术的发展,摄像机在应用中视场越来越大,因此对大视场摄像机高精度标定的需求也越来越迫切。为了实现对大视场摄像机的高精度标定,需要能够尽可能覆盖整个视场区域的标定靶标,然而大尺寸高精度标定靶标无论在加工还是维护上都存在诸多困难。为了解决这一问题,国内外已有不少学者进行了深入的研究,并提出了相应的标定方法。孙军华等借鉴 Zhang 方法^[1],提出了一种利用平面单应性将视场内小靶标拼接成大靶标的大视场摄像机标定方法^[2]。余明浪等提出了一种利用直线间交点构造覆盖摄像机视场的大型靶标的标定方法^[3]。李为民等提出了一种差分式大视场标定方法^[4],该方法在标定过程中采用多项式模型,因而无法得到焦距、畸变系数等具有物理意义的参数,同时,该方法对各个子靶标的位姿有严格的要求,这些都限制了该方法的应用范围。虽然针对大视场摄像机标定已有不少相应算法提出,但在实际应用中操作简单、灵活,标定精度与传统摄像机标定方法相当的大视场摄像机标定方法的需求仍较为迫切。

因此,文中提出一种基于刚体变换的小靶标拼接方法,该方法在拼接过程中只需各小靶标共面,并充分考虑了拼接过程中存在的约束条件,操作简单、灵活,拼接精度高。通过该拼接方法由多个小靶标建立覆盖整个摄像机视场的相应大靶标,然后利用传统摄像机标定方法实现对大视场摄像机的高精度标定。

1 摄像机模型

透视投影模型是计算机视觉中广泛应用的一种摄像机成像模型,成像映射涉及到不同坐标系间的转换^[5-7]。定义如下坐标系:图像坐标系以计算机图像左上角为坐标原点,横纵轴分别为 u, v 方向;像平面坐标系以光轴与像平面的交点 O_i 为坐标原点, x, y 轴分别为像平面的水平和垂直轴;摄像机坐标系以光心 O_c 为坐标原点, z 轴为摄像机光轴, x, y 轴分别与像平面坐标系的 x, y 轴平行;世界坐标系为三维空间的参考系。各坐标系之间的转换关系如图 1 所示。

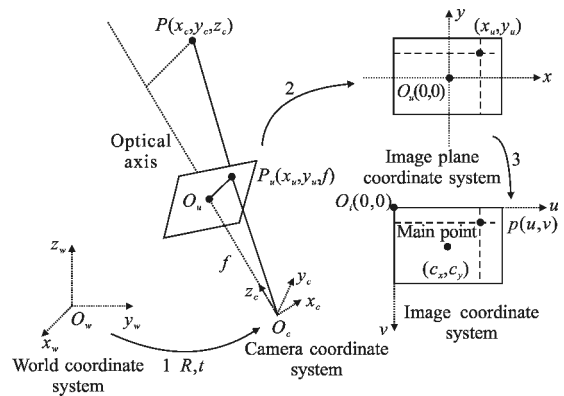


图 1 透视投影模型各坐标系之间的转换

Fig.1 Transformation of coordinate systems in perspective projection model

在透视投影模型下,空间点 P 的世界坐标 $(x_w, y_w, z_w)^T$ 与其投影点 p 在图像坐标系下的坐标 (u, v) 间的映射关系为^[8]:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/d_x & \gamma & c_x & 0 \\ 0 & f/d_y & c_y & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $f, d_x, d_y, c_x, c_y, \gamma$ 构成了摄像机的内参数,其中, f 为摄像机焦距; d_x, d_y 是摄像机感光元器件间的横向和纵向间距; (c_x, c_y) 为摄像机主点在图像坐标系下的坐标; γ 为倾斜因子,一般情况下 γ 为 0; R 是一个 3×3 正交旋转矩阵,表示摄像机坐标系和世界坐标系的旋转关系, t 是一个 3×1 的平移向量,表示了摄像机坐标系与世界坐标系的位置关系, R, t 称为摄像机的外参数; z_c 表示空间点 P 在摄像机坐标系下的 z 坐标。

由于加工、安装等原因,摄像机镜头往往存在畸变,空间投影并不严格遵守透视投影成像模型。摄像机镜头畸变可分为径向畸变、切向畸变、离心畸变和薄棱镜畸变等。通常径向畸变对摄像机成像影响较大,因此文中只考虑径向畸变。设空间点 P 在像平面所成点 p 的理想坐标为 $p_i(x_u, y_u)$, 实际坐标为 $p_d(x_d, y_d)$, 两者有如下关系:

$$\begin{cases} x_u = x_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ y_u = y_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \end{cases}, r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \quad (2)$$

式中: k_1, k_2, k_3, \dots 为径向畸变系数,一般情况下,只取第一项(即 k_1)即可。在引入摄像机镜头畸变后,摄像机内参数再加入畸变系数 k_1 。摄像机标定的主要任

务就是对摄像机的各个内外参数进行求解^[9-10]。

2 基于小靶标拼接的大视场摄像机标定

2.1 基于刚体变换的小靶标拼接基本原理

考虑通过单一小靶标对摄像机进行标定, 可以获取该小靶标坐标系与摄像机坐标系的转换关系, 如公式(3)所示:

$$X_c = R_{cw} X_w + T_{cw} \quad (3)$$

式中: X_c, X_w 分别为空间点在摄像机坐标系和小靶标坐标系中的坐标; R_{cw}, T_{cw} 为相应的两坐标系间的旋转、平移矩阵。

设小靶标 i 上的特征点 P_i 的坐标为 X_{wi} , 其在小靶标 j 坐标系下的坐标为 X_{wj} , 则该点在摄像机坐标系下的坐标可由公式(4)、(5)分别表示为:

$$X_{ci} = R_{cwi} X_{wi} + T_{cwi} \quad (4)$$

$$X_{cj} = R_{cwj} X_{wj} + T_{cwj} \quad (5)$$

显然, $X_{ci} = X_{cj}$, 联立公式(4)、(5)可得小靶标 i 坐标系与小靶标 j 坐标系的转换关系, 如公式(6)所示:

$$X_{wi} = R_{cwi}^{-1} R_{cwj} X_{wj} + R_{cwi}^{-1} (T_{cwj} - T_{cwi}) \quad (6)$$

记 $R_{ji} = R_{cwi}^{-1} R_{cwj}, T_{ji} = R_{cwi}^{-1} (T_{cwj} - T_{cwi})$, 公式(6)可简化为:

$$X_{wi} = R_{ji} X_{wj} + T_{ji} \quad (7)$$

利用公式(7)即可将多个单一小靶标拼接成一个靶标, 如图 2 所示。

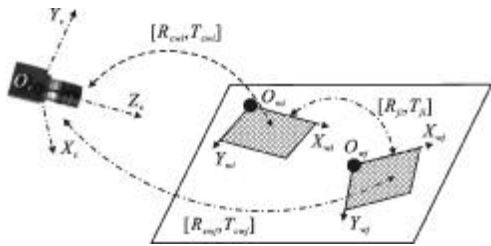


图 2 基于刚体变换的小靶标拼接

Fig.2 Splice of small targets based on rigid transformation

2.2 基于刚体变换的小靶标拼接的改进

在 2.1 节所述的基于刚体变换的小靶标拼接

过程中, 由于小靶标所占标定平面的比例较小, 直接标定得到的摄像机参数只能反映靶面区域的成像规律, 使用这些参数对其他区域进行重构时误差通常非常大; 同时, 由于使用了成像平面较小部分区域的图像信息, 使得解算出的参数耦合较大。以上两个原因使得单独使用外参无法通过公式(7)获得理想的拼接结果。为了解决这一问题, 考虑使用平面靶标对大视场摄像机标定过程中存在的以下三个约束条件:

(1) 在一次大视场摄像机标定中, 最终标定结果应该只包含一个内参矩阵和一个外参矩阵, 其中外参矩阵表示了摄像机坐标系与参考坐标系的转换关系。在标定过程中, 每个小靶标都对应一个旋转矩阵和平移向量, 表示摄像机坐标系与其靶标坐标系的转换关系, 而它们的内参矩阵应该是一样的;

(2) 大视场摄像机标定结果应使得所有小靶标的重构精度达到最优;

(3) 拼接结果应满足共面约束, 即拼接的大靶标应该是个平面。

根据以上三个约束条件, 可将拼接过程分为两部分, 首先利用第一个条件求取摄像机参数的初始值, 然后利用剩下的两个约束条件对摄像机参数进行优化, 以获取较高的拼接精度。

由径向一致约束可得公式(8)

$$[Y_{dij} X_{wij} \quad Y_{dij} Y_{wij} \quad Y_{dij} \quad -X_{dij} X_{wij} \quad -X_{dij} Y_{wij}] \begin{bmatrix} T_{yj}^{-1} r_{1j} \\ T_{yj}^{-1} r_{2j} \\ T_{yj}^{-1} T_{xj} \\ T_{yj}^{-1} r_{4j} \\ T_{yj}^{-1} r_{5j} \end{bmatrix} = X_{dij} \quad (8)$$

令 $[r'_{1j} \quad r'_{2j} \quad r'_{xj} \quad r'_{4j} \quad r'_{5j}]^T = [T_{yj}^{-1} r_{1j} \quad T_{yj}^{-1} r_{2j} \quad T_{yj}^{-1} T_{xj} \quad T_{yj}^{-1} r_{4j} \quad T_{yj}^{-1} r_{5j}]^T$,

将第 j 个靶标上的标定在该靶标坐标系下的坐标和与其相对应的图像坐标代入公式(8), 可解出 $r'_{1j}, r'_{2j}, T'_{xj}, r'_{4j}, r'_{5j}$ 的最小二乘解。将获得的解代入公式(9)、(10)

$$T_{yj} = \begin{cases} s \left[\frac{S_{ij} - \sqrt{S_{ij}^2 - 4(r'_{1j} r'_{5j} - r'_{2j} r'_{4j})^2}}{2(r'_{1j} r'_{5j} - r'_{2j} r'_{4j})^2} \right]^{\frac{1}{2}}, & \text{当 } r'_{1j} r'_{5j} - r'_{2j} r'_{4j} \neq 0, \text{ 其中 } S_{ij} = r_{1j}^{\prime 2} + r_{2j}^{\prime 2} + r_{4j}^{\prime 2} + r_{5j}^{\prime 2} \\ s \frac{1}{r'_{aj} + r'_{bj}}, & \text{当 } r'_{1j} r'_{5j} - r'_{2j} r'_{4j} \neq 0, \text{ 其中 } r'_{aj}, r'_{bj} \text{ 为 } \{r'_{1j}, r'_{2j}, r'_{4j}, r'_{5j}\} \text{ 中不为 } 0 \text{ 的两个元素} \\ s = \text{sgn}(x_{ij} X_{ij} > 0 \cap y_{ij} Y_{ij} > 0), & \text{其中 } x_{ij} = r'_{1j} X_{wij} + r'_{2j} Y_{wij} + T'_{xj}, y_{ij} = r'_{4j} X_{wij} + r'_{5j} Y_{wij} + T'_{yj} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} r_{1j}=r_1 T_{yj} & r_{2j}=r_2 T_{yj} \\ r_{3j}=\sqrt{1-r_{1j}^2-r_{2j}^2} & r_{4j}=r_4 T_{yj} \\ r_{5j}=r_5 T_{yj} & r_{6j}=s\sqrt{1-r_{4j}^2-r_{5j}^2} \\ s=-\text{sgn}(r_{1j}r_{4j}+r_{2j}r_{5j}) & T_{yj}=T_{xj} T_{yj} \end{cases} \quad (10)$$

可得摄像机的部分外参 $(r_{1j} \sim r_{6j}, T_{xj}, T_{yj})$, r_7, r_8, r_9 可由旋转矩阵的单位正交性求得。

令 $k_1=0$, 即不考虑镜头畸变, 将第 j 个小靶标的标定坐标代入公式(11), 可得外参 T_{zj} 和内参 f_j 的初值。

$$[y_{ij} \quad -d_y Y_{dij}] \begin{bmatrix} f_j \\ T_{zj} \end{bmatrix} = w_{ij} d_y Y_{dij} \quad (11)$$

式中: $y_{ij}=r_{4j}x_{wij}+r_{5j}y_{wij}+T_{yj}$, $w_{ij}=r_{7j}x_{wij}+r_{8j}y_{wij}$ 。若 $f_j < 0$, 则 $r_{3j}, r_{6j}, r_{7j}, r_{8j}$, 符号取反, 并将新的参数代入公式(10)重新计算 T_{zj} 和 f_j 。

利用上一步获取的参数 T_{zj} , 将所有小靶标的特征点在其各自靶标坐标系下的坐标和相应的图像坐标代入公式(12), 可得摄像机内参 f 的初始值。

$$y_{ij}f = w_{ij}d_y Y_{dij} + d_y Y_{dij} T_{zj} \quad (12)$$

最后, 令主点为图像中心, 即 $(c_x, c_y) = (\text{width}/2, \text{height}/2)$, $\text{width}, \text{height}$ 分别为图像的宽和高 pixel。通过上述几步计算就得到所有摄像机标定参数的初始值 $\{(r_1 \sim r_9), (T_x)_j, (T_y)_j, (T_z)_j, k_1, f, c_x, c_y\}, j=1 \dots n$ 为小靶标编号。在获取所有摄像机标定参数的初始值后, 接下来利用约束 2 与约束 3 对这些参数进行非线性寻优。

根据约束 2, 计算每个小靶标的图像特征点到其靶标坐标系的反向投影误差 $E_{\text{Backproject}_{ij}}$ (第 i 个小靶标的第 j 个特征点的反向投影误差), 令代价函数为

$$J_1 = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^n E_{\text{Backproject}_{ij}} \quad (13)$$

目标函数为

$$F_1 = \min(J_1) = \min \left(\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^n E_{\text{Backproject}_{ij}} \right) \quad (14)$$

即优化后的参数使得所有小靶标的反向投影误差之和达到最小。

由约束 3 可知各个小靶标共面, 即在参考坐标系下, 各小靶标坐标系在 z 方向上没有位移, 拼接靶标在参考坐标系下的 z 坐标为 0, 则得到约束 3 的代价函数为:

$$J_2 = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^n Z_{wij} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^n ((r_7)_{sj}x_{ws} + (r_8)_{sj}y_{ws} + (r_9)_{sj}z_{ws} + (T_z)_{sj})_i \quad (15)$$

目标函数为:

$$F_2 = \min(J_2) = \min \left(\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^n ((r_7)_{sj}x_{ws} + (r_8)_{sj}y_{ws} + (r_9)_{sj}z_{ws} + (T_z)_{sj})_i \right) \quad (16)$$

可以看出, 代价函数 J_1, J_2 具有同样的物理意义, 均为重构点与原始点的距离差, 因此可将两式相加得到基于刚体变换小靶标拼接方法的全局优化函数

$$F = F_1 + F_2 = \min(J_1 + J_2) = \min \left(\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^n (E_{\text{Backproject}_{ij}} + (r_7)_{sj}x_{ws} + (r_8)_{sj}y_{ws} + (r_9)_{sj}z_{ws} + (T_z)_{sj})_i \right) \quad (17)$$

经过如上两步即可得到精度较高的拼接大靶标。

2.3 基于拼接靶标的大视场摄像机标定

在得到高精度拼接大靶标后, 通过传统摄像机标定方法中的 Tsai 两步法^[10]使用拼接好的大靶标对摄像机进行标定, 并对标定结果进行精度验证, 从而完成整个大视场摄像机的标定过程。基于刚体变换小靶标拼接的大视场摄像机标定具体步骤如图 3 所示。

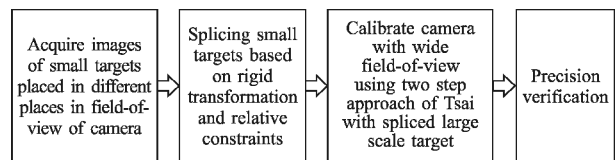


图 3 基于刚体变换小靶标拼接的大视场摄像机标定

Fig.3 Calibration of camera with wide field-of-view based on small targets splicing with rigid transformation

3 实验结果

3.1 仿真实验及结果分析

首先通过计算机仿真实验对所提大视场摄像机标定方法稳定性进行验证。利用公式(1)生成理想的特征点坐标, 并加入不同强度的白噪声 ($\text{snr} \in [8, 100]$, 幅值在 $0 \sim 1$ pixel 之间变化), 然后使用所提方法进行标定, 并计算标定点的重构精度, 绘制摄像机参数随噪声强度变化的曲线。假设摄像机的参数如表 1 所示。

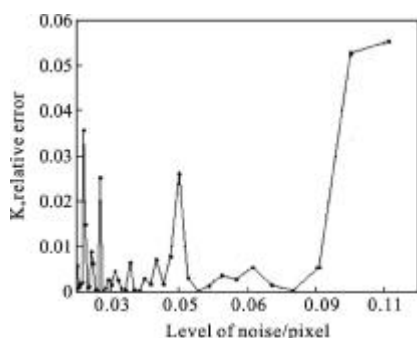
摄像机参数随噪声强度变化如图 4 所示, 图中横坐标为噪声信噪比 snr 的倒数, 径向畸变系数 k_1 , 焦距 f 其随噪声变化的误差以相对误差表示 (误差与真值的百分比), 反向投影误差以所有特征点误差的 RMS 表示。

表 1 仿真参数设置

Tab.1 Simulation parameters

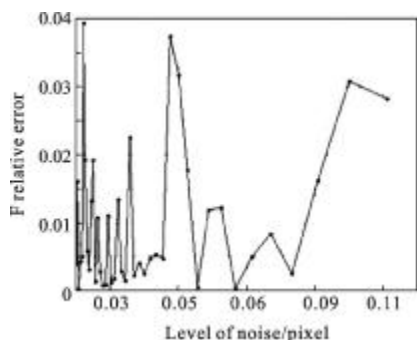
f/mm	k_1	c_x /pixel	c_y /pixel	A_x /(°)	A_y /(°)	A_z /(°)	T/mm
60	0.000 3	320	240	10	10	10	[10,20,1 000] ^T

从图 4 中可以看出, 基于刚体变换的小靶标拼接标定方法的标定精度随着加入噪声强度的增强而下降, 摄像机各参数的标定误差的波动幅度也随着



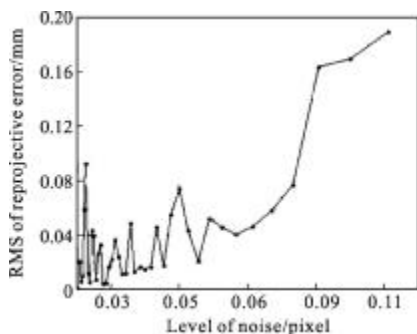
(a) k_1 误差随噪声变化的曲线(相对误差)

(a) Curve of k_1 error with the changes of noise (relative error)



(b) f 误差随噪声变化的曲线(相对误差)

(b) Curve of f error with the changes of noise (relative error)



(c) 反向投影误差 RMS 随噪声变化的曲线

(c) Curve of reverse projection error of RMS with the changes of noise

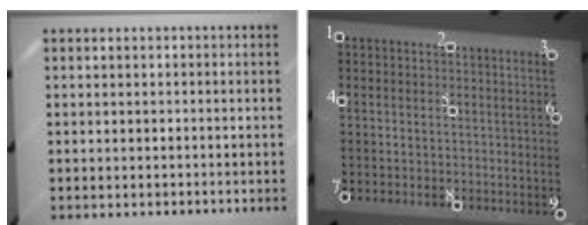
图 4 仿真标定结果与真值偏差随噪声变化曲线

Fig.4 Curve of deviation between simulation results and real values with the changes of noise

噪声的增强而逐渐增大, 这表明, 基于刚体变换的小靶标拼接标定方法的稳定性随着噪声强度的增强而下降。但从仿真结果可以看出, 虽然在噪声较大时, 文中所提方法的标定精度出现了较大幅度的波动, 但总体精度仍然较好。因此, 可以认为所提方法仍具有很好的稳定性。

3.2 实际标定实验及结果分析

为验证文中所提方法可行性, 分别使用实际大靶标与 2.2 节方法拼接出的大靶标进行标定。实际大靶标如图 5(a)所示, 受实验条件限制, 在小靶标拼接时, 将图 5(a)所示大靶标分成若干小靶标, 然后使用 2.2 节方法进行拼接并进行标定。实验中所用摄像机为 TM6710, 摄像机标定反向投影误差如图 6 所示。



(a) 实际大靶标

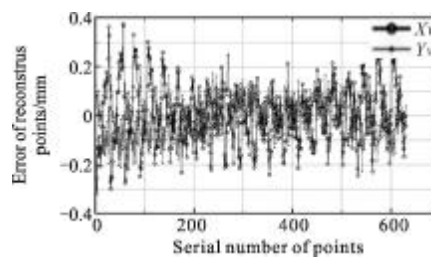
(b) 由大靶标分成的小靶标

(a) Real large scale target

(b) Small targets divided by large scale target

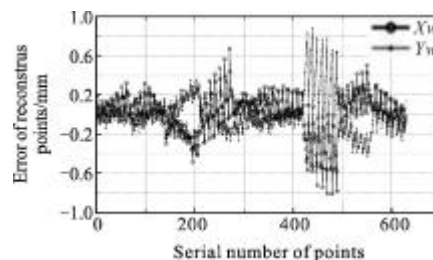
图 5 实验中使用的标定靶标

Fig.5 Calibration target used in experiments



(a) 大靶标标定误差

(a) Calibration errors of large scale target



(b) 基于刚体变换的拼接标定误差

(b) Calibration errors of spliced target based on rigid transformation

图 6 摄像机标定误差

Fig.6 Errors of camera calibration

实验结果表明,基于刚体变换小靶标拼接的摄像机标定方法标定精度较高,其标定精度约为0.8 mm,略大于 Tsai 两步法使用实际大靶标进行标定的标定精度小于 0.4 mm,能够满足大视场摄像机的高精度标定要求。

4 结 论

提出一种基于小靶标拼接的大视场摄像机标定方法。在该方法中,小靶标拼接时只需各小靶标共面,操作简单、灵活,并且考虑了拼接过程中存在的约束条件,提高了拼接精度。文中提出的基于小靶标拼接的大视场摄像机标定的标定精度与使用实际大靶标进行标定的标定精度相当,能够实现对大视场摄像机的高精度标定。

需要指出的是,文中方法在解算过程中使用了大量非线性优化,其运算时间比传统的标定方法要大的多,因此,如何进一步提高文中方法的计算效率是下一步要研究的重点。

参考文献:

- [1] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [2] Sun Junhua, Liu Zhen, Zhang Guangjun, et al. Camera calibration based on flexible 3D target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3433-3439. (in Chinese)
孙军华, 刘震, 张广军, 等. 基于柔性立体靶标的摄像机标定[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3433-3439.
- [3] Yu Minglang, Wei Zhenzhong, Sun Junhua. On-spot camera calibration method based on planar target [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(3): 347-350. (in Chinese)
余明浪, 魏振忠, 孙军华. 基于柔性平面靶标的摄像机现场标定方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(3): 347-350.
- [4] Li Weimin, Yu Qiaoyun, Liu Chao. Calibration method with separation pattern of a single camera based on difference coordinates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 697-701. (in Chinese)
李为民, 俞巧云, 刘超. 采用分离式差分标定靶的单摄像机标定方法[J]. *光学学报*, 2006, 26(5): 697-701.
- [5] Niu Haitao, Zhao Xunjie. New method of camera calibration based on checkerboard [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 133-137. (in Chinese)
牛海涛, 赵勋杰. 采用棋盘格模板的摄像机标定新方法[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 133-137.
- [6] Xu Peng, Wang Jianye, Wang Yanru. Calculation exact center coordinate of a target circle in camera calibration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1342-1346. (in Chinese)
徐鹏, 汪建业, 王燕儒. 摄像机标定中靶标圆心像点坐标的精确计算[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1342-1346.
- [7] Liu Wei, Wang Yongtian, Chen Jing, et al. Tracking algorithm for zoom camera based on compensation matrix [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 159-163. (in Chinese)
刘伟, 王涌天, 陈靖, 等. 利用补偿矩阵的可变焦摄像机跟踪算法[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 159-163.
- [8] Zhang Guangjun. *Vision Measurement* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
张广军. *视觉测量*[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [9] Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 465-472. (in Chinese)
霍炬, 杨卫, 杨明. 基于消隐点几何特性的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 465-472.
- [10] Ma Songde, Zhang Zhengyou. *Computer Vision*[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
马颂德, 张正友. *计算机视觉*[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [11] Roger Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, RA-3(4): 323-344.