

文章编号 1004-924X(2014)02-0259-07

采用移动光靶标的分区域相机标定

刘书桂, 姜珍珠*, 董英华, 张宏玲

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:针对工业视觉测量中的摄像机标定精度及效率低的问题,提出一种高精度 CCD 相机分区域标定方法。该方法首先利用三坐标测量机(CMM)带动圆形发光二极管(LED)光靶标按梯形台状做精确空间移动,结合最小二乘椭圆拟合算法求解光靶标的像面位置,并与 CMM 三维坐标形成精确的空间标定数据集。同时,将像平面按圆环形对称结构分割成 N 个区域,并结合改进的 Tsai 算法分别对每个子区域进行相机参数的标定。标定实验结果表明:经过分区域标定,相机采集点的总误差比单区域标定法降低了 17%($N=8$),单点平均误差降低了 20%左右。算法可实现自动精确标定点采集,操作过程简单,基本满足中等精度的工业测量要求。所提出的相机标定法可应用于工业视觉测量,特别是大工件测量领域。

关键词:视觉测量; CCD 相机; 相机标定; 分区域思想; 改进的 Tsai 算法; 光靶标

中图分类号: TB553.1; TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0259

Sub-regional camera calibration based on moving light target

LIU Shu-gui, JIANG Zhen-zhu*, DONG Ying-hua, ZHANG Hong-ling

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: zhenzhuj@tju.edu.cn

Abstract: A reliable sub-regional calibration method for CCD cameras was proposed to improve the accuracy and efficiency of industrial vision measurement. With the proposed method, a round light target was moved with the Coordinate Measuring Machine (CMM) according to a trapezoidal shape. The images of light target were processed with least square ellipse fitting algorithm to obtain the center positions. By 3D coordinates of CMM, a set of accurate calibration data were obtained. Furthermore, the image plane was separated into several sections according to the circle symmetrical structure and camera parameters in different regions were calculated with the sub-regional theory and improved Tsai method. Comparing with the sub-regional calibration method to single calibration one, the actual calibration experiments show that the total error is decreased by 17% when the image is separated 8 regions and the average error of single point is decreased about 20%. Experiments demonstrate that the data collection process is automatic and simple, and the camera calibration accuracy meets the medium precision of industrial measurement. It indicates that the method proposed is suitable for the industrial vision measurement, especially for the larger work piece measurement.

Key words: vision measurement; CCD camera; camera calibration; sub-regional theory; improved Tsai method; light target

1 引言

随着图像处理和光电子技术的发展,基于计算机视觉的大工件测量系统已广泛应用于航空航天、汽车制造等诸多工业领域^[1-3]。视觉测量系统中图像采集设备(相机)的标定精度直接影响系统的整体测量精度^[4-6]。相机标定按标定原理可以分为三类:传统相机标定法、自标定方法和主动视觉标定法^[7]。传统相机标定法^[8-9]一般需要尺寸精度很高的标定物,且相机成像模型和优化算法已经非常成熟,因此常用于精度要求较高且标定好后相机参数不需要调整的工业场合。自标定方法^[10-12]和主动视觉标定法^[13-14]无需标定物,自标定算法简单灵活,但标定精度低,一般适用于现场标定;主动视觉标定法利用自动控制系统精确控制相机做已知运动,但实验设备昂贵,条件要求苛刻,不易实现。因此在视觉测量系统中常采用基于标定物的传统相机标定法对相机进行标定。

基于标定物的传统相机标定法依赖于标定物的精度。三维标定物制作复杂,而二维标定物的精度不易保证,且采集的标定物不能充满整个像平面。文献^[15-16]利用 IR-LED 作为光靶标实现了虚拟空间标定物的采集,为使标定物充满相机视场,采集过程中需移动相机从不同角度拍摄空间虚拟点集,且相机需要安装红外滤镜,离焦采集图像,这在一定程度上会影响镜头焦距的准确性。针对此缺陷,本文采用直径为 10 mm 的圆形 LED 作为光靶标,固定在三坐标测量机(CMM)测量臂上,CMM 按照设定好的梯形台状做精确的空间运动,形成光靶标的标准位置集合。数据采集时相机位置不动,且各位置靶标的像点均匀地充满整个像平面。现有的相机标定算法将像平面作为整体进行标定,但使用相同的相机参数修正像平面上不同位置的像点会影响标定的精度。因此本文提出了一种分区域标定思想,对像平面按圆环形对称结构分割成多个区域,利用落入每个子区域的标定物进行相应区域的参数标定,获得多组相机参数。使用相机时,对不同区域的像点利用相应区域的相机参数进行校正。同时改进了 Tsai 两步法,增加待标定的相机内部参数,按最小二乘思想建立目标函数,利用非线性方程组

最小二乘解的广义逆(M-P)法对目标函数进行优化求解,提高了相机的标定精度。

2 改进的 Tsai 算法

2.1 相机成像模型

基于径向一致约束(Radial Alignment Constraint, RAC)的相机成像模型如图 1 所示。模型包含 4 个坐标系,分别为世界坐标系 $O_w-x_w y_w z_w$,相机坐标系 $o_c-u_c v_c w_c$,像平面毫米坐标系 $O_1-X_m Y_m$,像平面像素坐标系 $O_F-X_F Y_F$ 。点 Q 是世界坐标系中的任意点, Q_u 和 Q_d 分别是理想像点和实际像点。

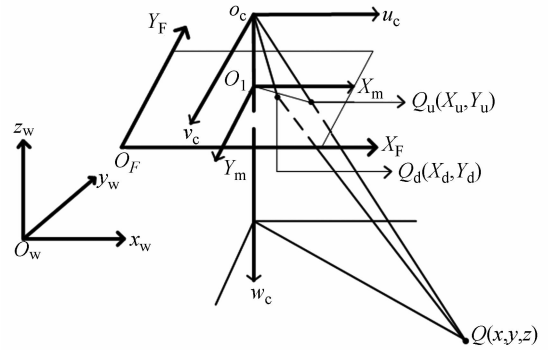


图 1 基于 RAC 的相机成像模型

Fig. 1 Camera imaging model based on RAC

假设点 Q 在相机坐标系下的坐标是 (u, v, w) ,则 (x, y, z) 和 (u, v, w) 的对应关系为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别为旋转矩阵和平移矩阵。

由透视投影^[17]可以得到在像平面毫米坐标系下的理想对应点坐标 (X_u, Y_u) , 为:

$$s \cdot \begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: s 为比例因子, f 为焦距。

假设 X 和 Y 方向上的畸变为 (δ_x, δ_y) , 则毫米像面上的实际对应点坐标 (X_d, Y_d) 为:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} \delta_x &= X_d[(k_1 q + k_2 q^2) + p_1(q + 2X_d^2) + 2p_2 X_d Y_d], \\ \delta_y &= Y_d[(k_1 q + k_2 q^2) + p_2(q + 2Y_d^2) + 2p_1 X_d Y_d], \\ q &= X_d^2 + Y_d^2, k_1, k_2 \text{ 和 } p_1, p_2 \text{ 分别是镜头径向和切} \\ &\text{向畸变的两级畸变系数。} \end{aligned}$$

根据像平面上毫米坐标系和像素坐标系之间的关系可知,像素坐标 (X_F, Y_F) 为:

$$\begin{bmatrix} X_F \\ Y_F \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 \\ 0 & 1/d_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: (C_x, C_y) 是像平面中心, d_x, d_y 分别是 CCD 相机横向和纵向的扫描间隔, d_y 已知, d_x 需要标定。

实际中不可能对像点位置进行完全的修正,被修正点在 X_m 和 Y_m 方向上的修正偏差为:

$$\begin{aligned} f_a &= (r_1 x + r_2 y + r_3 z + t_x) f - (r_7 x + r_8 y + r_9 z + t_z)(X_d + \delta_x) \\ f_b &= (r_4 x + r_5 y + r_6 z + t_y) f - (r_7 x + r_8 y + r_9 z + t_z)(Y_d + \delta_y) \end{aligned} \quad (5)$$

旋转矩阵 \mathbf{R} 可以由 α, β, γ 3 个旋转角表示,因此得到目标函数:

$$F(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z, f, d_x, C_x, C_y, k_1, k_2, p_1, p_2) = \text{MIN} \left(\sum_{i=1}^n f_a^2 + \sum_{i=1}^n f_b^2 \right), \quad (6)$$

其中: n 是标定点集中点的个数。此方程含有 14 个参数,前 6 个为相机外部参数,后 8 个为相机内部参数。

2.2 参数求解两步法

(1) 第一步:求解外部参数 $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ 的初始值。令:

$$\begin{bmatrix} f r_1 & f r_2 & f r_3 & f t_x \\ f r_4 & f r_5 & f r_6 & f t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} = t_z \cdot \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ a_5 & a_6 & a_7 & a_8 \\ a_9 & a_{10} & a_{11} & 1 \end{bmatrix},$$

$k = a_9 x + a_{10} y + a_{11} z + 1$, 根据式(1)和(2)有:

$$k \cdot \begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ a_5 & a_6 & a_7 & a_8 \\ a_9 & a_{10} & a_{11} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由式(3)和(4)可知:

$$\begin{cases} X_u = (X_F - C_x) d_x + \delta_x \\ Y_u = (Y_F - C_y) d_y + \delta_y \end{cases}, \quad (8)$$

其中: (X_F, Y_F, x, y, z) 为标定点, C_x, C_y, d_x, f 的近似值可以根据相机的出厂参数确定,镜头畸变

δ_x, δ_y 取值 0。则 6 对以上的对应标定点即可以获得式(7)中 11 个未知参数的最小二乘解。

根据矩阵 \mathbf{R} 的正交性和式(9)的参数分解公式可以求解出相机模型的 6 个外部参数的初始值。

$$\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_1 t_z}{f} & \frac{a_2 t_z}{f} & \frac{a_3 t_z}{f} & \frac{a_4 t_z}{f} \\ \frac{a_5 t_z}{f} & \frac{a_6 t_z}{f} & \frac{a_7 t_z}{f} & \frac{a_8 t_z}{f} \\ a_9 t_z & a_{10} t_z & a_{11} t_z & \frac{1}{\sqrt{a_9^2 + a_{10}^2 + a_{11}^2}} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

(2) 第二步:优化目标函数,求解 14 个参数的最优解。

14 个参数的最优解可用非线性方程组最小二乘解 M-P 法对目标函数求解得到。文献[18]证明了广义逆法的收敛性,但并未说明收敛速度。经求解可知,使用本算法收敛精度可达 1×10^{-8} , 2~3 次迭代就可得到 X 的最优解,运算速度完全满足实际应用的要求。

3 分区域标定思想

由相机标定方法计算得到一组相机参数,在使用相机进行测量时,对所有像点按相同参数进行修正。由于相机和镜头的加工制作过程会产生误差,即使镜头经过了超精密加工,也不能保证空间物体经由镜头投影到 CCD 感光元上的二维图像的每一处畸变都相同,因此提出一种分区域的标定思想。

镜头畸变主要体现为桶形畸变和枕形畸变,对镜片进行粗细研磨加工时,边缘对称固定同心转动,在以光学中心为圆心的同心圆上其畸变大致相同。图 2 所示的圆环分区域法将像平面分成 N 个子区域。

先用上述改进的 Tsai 算法对整个区域进行标定得到图像中心位置 (C_x, C_y) ,对每个子区域采用统一的图像中心,各子区域的划分可根据式(10)计算。

$$d_i = \sqrt{(X_f - C_x)^2 + (Y_f - C_y)^2}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

利用各个子区域的标定点计算相应子区域的相机参数,图像中心统一采用单区域标定的中心

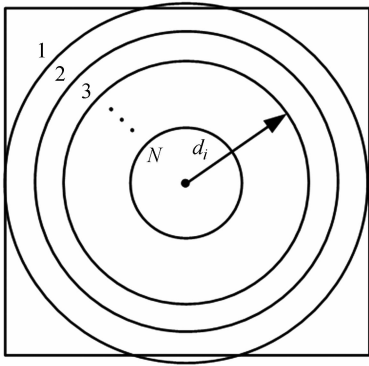


图 2 区域划分模板

Fig. 2 Template for image plane separation

位置,因此只计算 $f, d_x, k_1, k_2, p_1, p_2$ 6 个相机内部参数,即可得到 N 组相机参数。使用相机时,通过相同区域划分模板确定被测点的像点位置,再使用对应的相机参数对像点位置进行修正。

4 实验与讨论

4.1 标定点采集

为获得精确的空间标定点集,采用移动光靶标的标定点采集法。将一个 LED 光靶标固定在 CMM 的测量臂上,相机固定在 CMM 防震台前,如图 3 所示。在每个位置,相机采集靶标图像并实时传输到计算机,经过图像预处理和最小二乘椭圆拟合算法^[18] 计算得到靶标中心在像平面上的位置。将 CMM 的当前位置作为此标定点对应的世界坐标位置,即可构成一对标定点,然后控

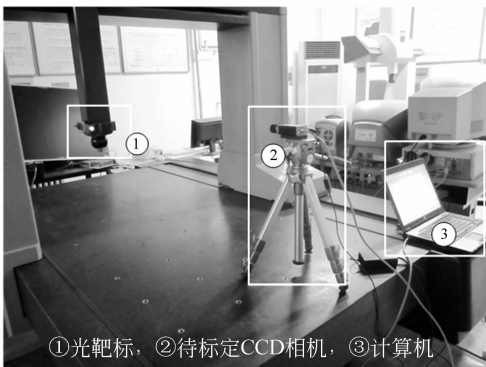


图 3 标定点采集

Fig. 3 Collection of calibration data

制 CMM 移动到下一个标定采集点。通过控制光圈大小可以获得质量良好的图像,再利用阈值分割和轮廓跟踪对图像进行预处理。为保证靶标中心的稳定性,在每个位置采集 5 幅图像并逐一计算中心坐标求取平均值,并作为该位置光靶标中心在像平面上的坐标。

为了能够求解焦距 f ,需要控制 CMM 在相机的光轴方向 y_w 轴移动,沿此方向间隔 100 mm 取 8 个截面,在每个截面即 CMM 的 $x_w O z_w$ 面上采集 50×50 个点,共采集 20 000 个空间标定点。为保证每个截面上的所有标定点成像尽量充满整个像平面,需设定 CMM 按照梯形台状移动,如图 4 所示。

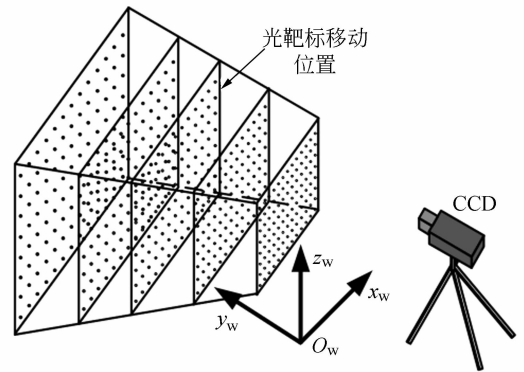


图 4 标定点采集 CMM 移动形状

Fig. 4 Moving shape of CMM in data collection process

4.2 实际相机标定实验

使用自己开发的软件平台对德国 Basler 公司生产的 CCD 黑白工业相机进行标定。镜头为 PENTAX 16 mm 定焦镜头,相机像元数为 $2\,456 \text{ pixel} \times 2\,058 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$ 。分别利用单区域和分区域标定法进行标定,结果分别如表 1 和表 2 所示。从表 1 和表 2 可看出,分区域法与单区域法相比,相机的畸变参数相差较大。需要通过计算标定点的形状误差来比较两种标定

表 1 单区域标定的相机内部参数

Tab. 1 Results for single camera calibration method

内部参数	数值	内部参数	数值
f/mm	15.911 6	$k_1/\times 10^{-4}$	5.882 3
$d_x/(\text{mm})(\times 10^{-3})$	3.450 3	$k_2/\times 10^{-5}$	-5.408 8
C_x/pixel	1 233.171 4	$p_1/\times 10^{-6}$	5.849 5
C_y/pixel	1 016.024 4	$p_2/\times 10^{-7}$	-2.654 8

表 2 分区域(N=8)标定的相机内部参数

Tab.2 Results for sub-regional camera calibration method (N=8)

序号	f/mm	d_x/mm ($\times 10^{-3}$)	k_1 $/\times 10^{-4}$	k_2 $/\times 10^{-5}$	p_1 $/\times 10^{-5}$	p_2 $/\times 10^{-6}$
1	15.895 9	3.449 2	2.711 5	9.409 0	2.914 7	-3.656 0
2	15.897 2	3.449 7	3.020 5	4.191 0	-0.818 9	-2.295 3
3	15.900 9	3.449 7	4.279 0	1.315 9	-0.580 2	-1.672 0
4	15.878 7	3.449 7	1.147 7	2.603 7	-0.248 0	-1.246 7
5	15.858 6	3.449 8	-0.220 8	2.443 9	-0.021 0	-0.807 4
6	15.861 8	3.449 7	-3.929 3	3.292 7	0.016 3	-0.823 4
7	15.880 0	3.449 9	-0.213 8	1.419 1	0.151 5	-0.484 3
8	15.918 8	3.450 0	0.595 7	-0.591 3	0.037 5	-0.036 9

方法的精度,定义形状误差为:

$$S_i = (xc_i - xu_i \times t_i)^2 + (yc_i - yu_i \times t_i)^2 + (zc_i - f \times t_i)^2, i=1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

其中: $t_i = \frac{(xc_i \times xu_i + yc_i \times yu_i + zc_i \times f)}{(xu_i^2 + yu_i^2 + f^2)}$ 。通过

式(1)计算得到标定点在相机坐标系下的坐标 (xc_i, yc_i, zc_i) , 其像平面上的对应点 (xu_i, yu_i) 可以通过式(8)计算得到。因此所有标定点的总形状误差为:

$$Total \text{ - error} = \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i}, \quad (12)$$

其中: n 为每组标定点的个数。

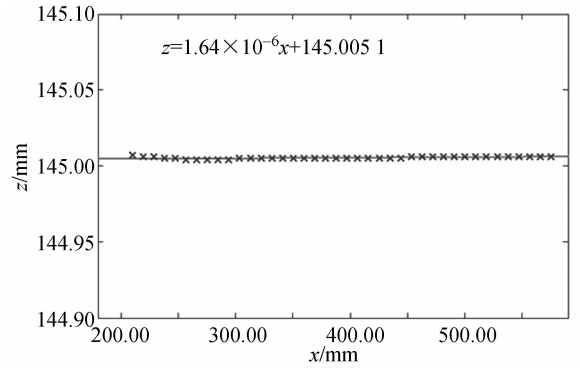
利用单区域标定法得到的标定点总形状误差为 162.566 mm。表 3 为几种不同形式的分区域标定法计算的总形状误差。由表可看出,几种分区域算法的总误差明显比单区域标定法小,特别是 $N=8$ 的误差比单区域算法降低了 17% 左右;并且由前 5 个数据可看出,随区域个数的增加,误差有减小的趋势;但当 N 大于 6 时,误差改善不明显,这和镜头畸变系数和落入标定区域的标定点数有关。当畸变系数较大时,可以采取较多的分区域方式和更多的标定点数,在实际应用中可以根据实际情况选择不同的区域划分标准。

表 3 分区域标定方法的总形状误差

Tab.3 Total errors by using sub-regional calibration (mm)

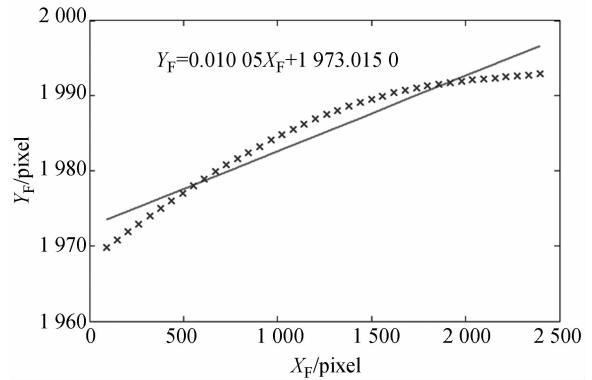
N	总误差
2	159.821
3	149.323
4	137.195
5	136.548
6	135.303
8	135.262

标定点采集时,CMM 带动光靶标按直线逐行移动,每一行上光靶标中心在空间的 50 个坐标形成一条直线。如图 5(a)所示,光靶标中心空间坐标的 x 轴和 z 轴数据拟合直线,记为空间点拟合直线。此直线投影到像平面理论上是一条直线,但由于镜头畸变,实际像点形成的是一条曲



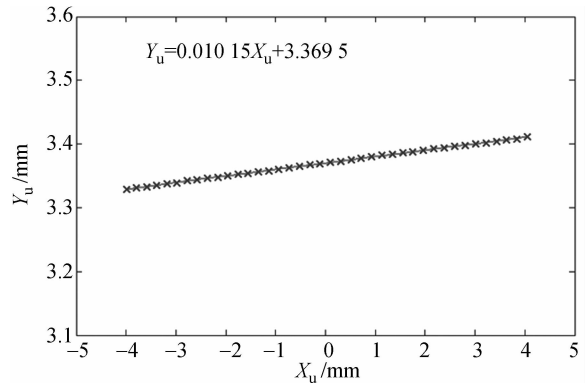
(a) 空间点拟合直线

(a) Curve-fitting through space points



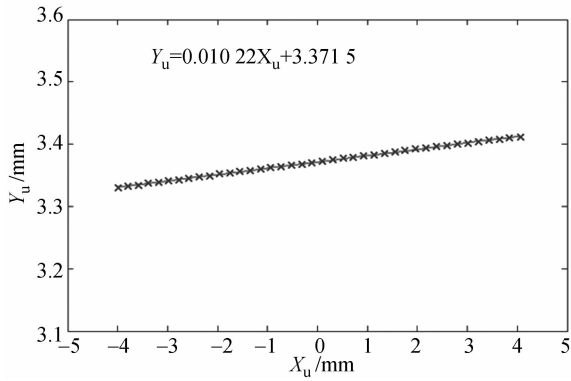
(b) 实际像点拟合直线

(b) Curve-fitting through image points



(c) 单区域修正像点拟合直线

(c) Curve-fitting through corrected image points by single regional method



(d) 8 区域修正像点拟合直线

(d) Curve-fitting through corrected image points by 8-regional method

图 5 实际空间点、实际像点以及修正像点的拟合直线
Fig. 5 Curve-fittings by space, image and corrected points

线,如图 5(b)所示,记为实际像点拟合直线。分别利用单区域和分区域($N=8$)的相机参数对像点进行校正,得到像平面坐标系下的各点并进行直线拟合,结果如图 5(c)和 5(d)所示。

按照直线拟合的方程对所有点求修正平均误差,结果如表 4 所示。

表 4 修正前和修正后像点平均误差比较

Tab. 4 Comparison of average error before and after corrections

修正前/pixel	单区域修正/ 10^{-4} mm	8 区域修正/ 10^{-4} mm
1.641	4.356	3.500

参考文献:

- [1] 张国雄. 坐标测量技术发展方向[J]. 红外与激光, 2008, 37(S1):1-5.
ZHANG G X. Development orientations of coordinate measuring techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S1):1-5. (in Chinese)
- [2] ZHU J G, LI Y J, YE S H. Calibration of line structured light vision system based on camera's projective center[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(5):584-591.
- [3] ROBERT J H, PAULO H P, ZHANG G X, et al.. *Coordinate Measuring Machines and Systems* [M]. America: CRC Press, 2011.
- [4] 陈刚,车仁生,叶东,等. 一种基于立体模板的双目

实际像点相对于其拟合直线的单点平均误差为 1.641 pixel, 相当于 $1.641 \times 0.00345 = 56.615 \times 10^{-4}$ mm, 单区域算法修正后单点平均误差为 4.36×10^{-4} mm, 分区域算法修正后单点平均误差相比单区域算法降低了 20% 左右, 由此说明分区域算法对像点的修正更准确。

5 结 论

本文针对工业视觉测量系统中的相机标定问题,提出了一种移动光靶标的分区域标定方法。首先改进传统 Tsai 算法,建立了 14 参数的目标函数,利用非线性方程组最小二乘解的广义逆迭代法求解优化参数,收敛速度和精度。然后,利用分区域标定思想将像平面按对称结构分成 N 个区域,分别对各子区域进行相机参数标定。使用相机时,按相同区域划分模板,采用相应子区域的相机参数对像点进行修正。标定点采集摒弃了传统标定物,利用三坐标测量机带动圆形 LED 光靶标实现了全自动精确三维标定点采集。CMM 移动形状为梯形台,以保证每个截面的像点能充满相机视场。标定实验表明,分区域标定法的精度优于单区域标定法,20 000 个标定点的总误差降低了 17% ($N=8$),单点平均误差降低了 20% 左右;且随分割区域数的增加,精度逐渐提高,应用时可根据实际情况选择不同的区域划分方式。这一相机标定法可以应用于工业视觉测量,特别是大工件测量领域。

视觉传感器现场标定方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6):626-631.

CHEN G, CHE R SH, YE D, et al.. Stereo vision sensor field calibration method based on volume template[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 626-631. (in Chinese)

- [5] 黄凤山,钱惠芬. 三坐标测量机驱动的摄像机标定技术[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4):952-957.
HUANG F SH, QIAN H F. Camera calibration technology driven by three-coordinate measuring machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 952-957. (in Chinese)

- [6] 刘全国. 大视场光电测量系统的精密几何标定和畸变校正的研究[J]. 光学精密工程, 1994, 2(4): 110-120.

- LIU J G. Study on high accurate geometric calibration of precision photoelectronic measuring system with large field of view and distortion correcting[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994, 2(4):110-120. (in Chinese)
- [7] QIU M L, MA S D, LI Y. Overview of camera calibration for computer vision[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(1):43-55. (in Chinese)
- [8] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [9] 黄凤山,刘书桂,彭凯,等. 光笔视觉测量系统结构参数的自标定与仿真[J]. 光电子·激光, 2006, 17(6):705-708.
- HUANG F SH, LIU SH G, PENG K, *et al.*. Self-calibration and simulation of the structure parameters in a light-pen vision measurement system[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(6):705-708. (in Chinese)
- [10] MAYBANK S J. A theory of self-calibration of a moving camera [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1992, 8(2):123-151.
- [11] JIN J, LI X F. Efficient camera self-calibration method based on the absolute dual quadric[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2013, 30(3):287-292.
- [12] KWON H, PARK J, KAK A C. A new approach for active stereo camera calibration[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007:3180-3185.
- [13] 朱熹,李醒飞,徐颖欣. 摄像机的一种主动视觉标定方法[J]. 光学学报, 2010, 30(5):1297-1303.
- ZHU X, LI X F, XU Y X. Camera calibration technique based on active vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5):1297-1303. (in Chinese)
- [14] YE D, XU Q Y, CHE R S. Camera calibration technique for vision measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):883-890.
- [15] 杨博文,张丽艳,叶南. 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):0915001-1-9.
- YANG B W, ZHANG L Y, YE N. Camera calibration technique of wide-area vision measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9):0915001-1-9. (in Chinese)
- [16] FAUGERAS O. *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint* [M]. USA: MIT Press, 1993.
- [17] 钟海燕. 非线性最小二乘广义逆迭代算法及收敛性证明[J]. 广东工学院学报, 1990, 7(1):14-23.
- ZHONG H Y. An iteration algorithm of generalized inverse of matrix for nonlinear least-square problem and its proof of convergence[J]. *Journal of Guangdong Institute of Technology*, 1990, 7(1):14-23. (in Chinese)
- [18] 刘书桂,李蓬,那永林. 基于最小二乘原理的平面任意位置椭圆的评价[J]. 计量学报, 2002, 23(4):245-247.
- LIU SH G, LI P, NA Y L. Evaluation of the form error of ellipse based on least-square method[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002, 23(4):245-247. (in Chinese)

作者简介:



刘书桂(1954—),男,湖南华容人,教授,博士生导师,1982年于陕西机械学院获得学士学位,1988年于东京工业大学获得博士学位,主要从事智能坐标测量、自动测量与控制、传感与信息处理等方面的研究。E-mail:sgliu@tju.edu.cn

通讯作者:



姜珍珠(1989—),女,云南大理人,硕士,2011年于四川大学获得学士学位,主要从事坐标测量与控制、三维图形建模方面的研究。E-mail: zhenzhu@tju.edu.cn