

基于 Tsai 算法的摄像机标定可视化操作平台研究与应用

马涛

(南京康尼电气技术有限公司,江苏 南京 210038)

摘要:针对现有 Tsai 算法在实施摄像机标定时人机交互不足、操作灵活性差的缺点,开发了基于 Visual C++ 6.0 的 Tsai 算法标定可视化操作平台。该平台可以通过人机交互自由选择标定点的分布区域和数量,通过测距实验重点分析了标定点数及其位置分布对标定结果的影响,并根据实验结果对 Tsai 标定点的合理选择提出了建议,从而解决了现有算法实施中标定点选择固化、缺乏合理性判断依据的问题。实验结果验证了该平台的应用提高了 Tsai 算法的操作灵活性。

关键词:Tsai 算法;VC;可视化;双目立体视觉;标定

中图分类号:TP18 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)06-0195-04

Research on Visualization Platform for Camera Calibration Based on Tsai Algorithm and Its Application

MA Tao

(Nanjing Kangni Electrical Technology Co., Ltd., Nanjing 210038, China)

Abstract: In view of the disadvantages of existing Tsai algorithm, that it is lacking in human-computer interaction and poor operating flexibility in implementation of camera calibration, Tsai algorithm calibration visualization platform is developed in this paper based on Visual C++ 6.0, and it is applied in the experiment on binocular stereo vision calibration and location. The experimental analysis is focused on the impact of the number and position distribution of calibration points on the result for calibration values. According to the experiment results, suggestions on reasonable choice of Tsai calibration points are proposed, and the improved operation flexibility for Tsai algorithm is validated by the experiment.

Keywords: Tsai algorithm; VC; visualization; binocular stereo vision; calibration

0 引言

在机器视觉和工业测量等领域中,摄像机标定是一个基本步骤,随着技术环节的发展,对标定精度和方便性的要求也在不断提高。目前一般采用有标定块的传统标定方法,其典型代表有直接线性变换法(DLT)、Tsai 两步法、张正友平面法等^[1],其中 Tsai 两步法计算量适中,实验要求低,计算精度高,是目前最常用的标定方法。Tsai 算法在使用中需要对平面标定板图像进行角点提取,并选择其中若干角点做为标定点,以生成对应的图像与世界坐标数据供后续计算。由于算法本身并未限制标定点个数的多少及其位置的分布,使得标定点的选择具有较大的灵活性,因此 Tsai 算法在使用中赋予了一定的人机交互操作空间,而现有的 Tsai 算法多采用 matlab 或 C 语言来实现^[2-4],其标定点的选择多固化于程序中,无人机交互的可视化操作界面。如果需要对标定图像或标定点进行选择上的变动,势必需要修改程序本身,给操作和应用带来很大不便,无法体现操作的灵活性。同时,由于程序固化,对标定点选择的合理性及其对标定结果造成的误差影响缺乏适当的判断依据。

为解决现有 Tsai 算法实施标定时人机交互不足、操作灵活性差的问题,本文利用 Visual C++ 6.0 开发了 Tsai 标定算法的可视化操作平台,并将其应用于双目立体视觉系统中。该平台可灵活选择 Tsai 算法标定点数及其不同的位置分布,通过测距实验分析了标定结果的影响因素,验证了平台的可操作性。

1 Tsai 算法的实现

1.1 Tsai 两步法的摄像机模型

Tsai 两步法是基于径向排列约束实现的,它采用带有一阶径向畸变的针孔摄像机模型^[5-6],这是针对一般针孔摄像机模型的修正。设空间中特征点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 在摄像机坐标系下的坐标为 (X_c, Y_c, Z_c) , $p_u(x_u, y_u)$ 是在理想针孔摄像机模型下 P 点的图像坐标, $p_d(x_d, y_d)$ 是由径向畸变引起偏离的 P 点实际图像坐标。则该模型满足:

$$\begin{cases} x_d = x_u(1 + kr_d^2) \\ y_d = y_u(1 + kr_d^2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $r_d^2 = x_d^2 + y_d^2$, k 为一阶径向畸变系数。

1.2 Tsai 两步法的实现步骤

Tsai 两步法标定的第一步是利用最小二乘法求解超定线性方程, 求出摄像机外部参数; 第二步求解摄像机内部参数, 如果摄像机无透镜畸变, 可由一个超定线性方程解出。如果存在一个以二次多项式近似的径向畸变, 则可用一个三变量的优化搜索求解^[7]。

由于采用的是平板标定物, 即对于所有特征点可取 $Z_w = 0$ 。设平移向量 $T = [t_x, t_y, t_z]^T$, 旋转矩阵 $R = [r_{11} \ r_{12} \ r_{13}; r_{21} \ r_{22} \ r_{23}; r_{31} \ r_{32} \ r_{33}]$, 则:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & t_z \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(2)展开得:

$$\begin{cases} X_c = r_{11}X_w + r_{12}Y_w + t_x \\ Y_c = r_{21}X_w + r_{22}Y_w + t_y \\ Z_c = r_{31}X_w + r_{32}Y_w + t_z \end{cases} \quad (3)$$

根据径向平行约束条件, 由式(3)得:

$$\frac{x_d}{y_d} = \frac{X_c}{Y_c} = \frac{r_{11}X_w + r_{12}Y_w + t_x}{r_{21}X_w + r_{22}Y_w + t_y} \quad (4)$$

将式(4)整理得:

$$[y_d X_d, y_d Y_w, -x_d X_w, -x_d Y_w, y_d] \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{21} & r_{22} & r_x \\ t_y & t_y & t_y & t_y & t_y \end{bmatrix}^T = x_d \quad (5)$$

1) 计算旋转矩阵 R 、平移参数 t_x 和 t_y

若已知 n 个特征点的空间坐标 $(X_i, Y_i, Z_i)^T$ 和对应的以 mm 为单位的图像坐标 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n (n > 5)$, 由式(4)可构造矩阵 A , 每行为 a_i , 则

$$a_i = [y_i X_i, y_i Y_i, -x_i X_i, -x_i Y_i, y_i] \quad (6)$$

设 $l = [l_1, l_2, l_3, l_4, l_5]$ 是需要求的中间参数向量, 其中旋转参数 $r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}$ 和平移参数 t_x 分别与 t_y 之比构成 l 的各个元素, 即:

$$l_1 = r_{11}/t_y, l_2 = r_{12}/t_y, l_3 = r_{21}/t_y, \\ l_4 = r_{22}/t_y, l_5 = t_x/t_y。$$

设向量 $b = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 包含了 n 组对应点的图像横坐标 x_i , 因为 A 和 b 是已知的, 从线性方程 $Al = b$ 解出未知的中间参数向量 l , 下面就可根据 l 计算出旋转参数和平移参数。

设 $L = l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + l_4^2$, 计算平移参数 t_y^2 。

$$t_y^2 = \begin{cases} \frac{L - [L^2 - 4(l_1 l_4 - l_2 l_3)^2]^{1/2}}{2(l_1 l_4 - l_2 l_3)^2}, & \text{if } (l_1 l_4 - l_2 l_3) \neq 0 \\ \frac{1}{l_1^2 + l_2^2}, & l_1^2 + l_2^2 \neq 0 \\ \frac{1}{l_3^2 + l_4^2}, & l_3^2 + l_4^2 \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

设 $t_y = (t_y^2)^{1/2}$, 然后根据求得的 l 值计算 4 个旋转参数和平移参数 t_x :

$$r_{11} = l_1 t_y, r_{12} = l_2 t_y, r_{21} = l_3 t_y, r_{22} = l_4 t_y, t_x = l_5 t_y,$$

其余旋转参数可由旋转矩阵 R 的性质求出。

2) 计算有效焦距 f 、径向畸变 k 和平移参数 t_z

一般地, 对于某一特征点有:

$$\begin{cases} x_u = f \frac{X_c}{Y_c} = f \frac{r_{11}X_w + r_{12}Y_w + r_{13}Z_w + t_x}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + r_{33}Z_w + t_z} \\ y_u = f \frac{X_c}{Y_c} = f \frac{r_{21}X_w + r_{22}Y_w + r_{23}Z_w + t_x}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + r_{33}Z_w + t_z} \end{cases} \quad (8)$$

因为所有特征点的 $Z_w = 0$, 结合式(1)与式(8)可得:

$$\begin{cases} \frac{x_d}{1 + k r_d^2} = f \frac{r_{11}X_w + r_{12}Y_w + t_x}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + t_z} \\ \frac{y_d}{1 + k r_d^2} = f \frac{r_{21}X_w + r_{22}Y_w + t_x}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + t_z} \end{cases} \quad (9)$$

为避免非线性方程, 令 $M = r_{11}X_w + r_{12}Y_w + t_x$, $N = r_{21}X_w + r_{22}Y_w + t_y$, $L = r_{31}X_w + r_{32}Y_w$, 则式(9)可写为:

$$\begin{cases} x_d / (1 + k r_d^2) = f M / (L + t_z) \\ y_d / (1 + k r_d^2) = f N / (L + t_z) \end{cases} \quad (10)$$

进一步整理式(10)得到关于 f, k 和 t_z 的线性方程组。对于 N 个特征点, 用最小二乘法解超定线性方程组即可求出结果。

到此为止, 通过分步标定已求解出全部摄像机内外参数。

2 平台设计及操作步骤

本文设计的摄像机标定系统流程功能框图如图 1 所示。

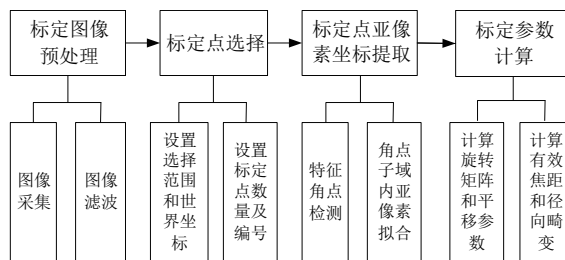


图 1 摄像机标定流程功能模块框图

标定流程包括标定图像预处理、标定点选择、标定点亚像素坐标提取、标定参数计算等 4 个基本步骤, 每个步骤对应一个基本功能模块, 每个基本步骤包含相应的子功能模块, 下面将着重阐述各功能模块的实现过程。

2.1 标定图像预处理

本文所采用的图像采集系统包括 2 台 1/3"SONY XC-ES50CE CCD 工业摄像机, 2 台 Computar M0814-MP2 8mm 焦距镜头和大恒 DH CG410 图像采集卡。该系统可满足双目视觉图像采集的需求。基于上述系统, 开发了基于 MFC 工程的 Tsai 算法摄像机标定程序。

为了应用 Tsai 算法, 利用计算机制作 1 张 8×8 的正方形的棋盘格平面图样, 其中每个正方形的尺寸为 20mm×20mm, 取每个正方形顶点作为特征点, 共 81 个特征点。在实际应用中, 为降低计算量, 选择部分特征点作为标定。

本系统采用 2 台相机从不同角度分别采集同一标定板的两幅图像, 分别称为左图像和右图像, 如图 2 所示。

采集完成后,根据实际情况,可对采集到的图像进行平滑去噪声等基本预处理。

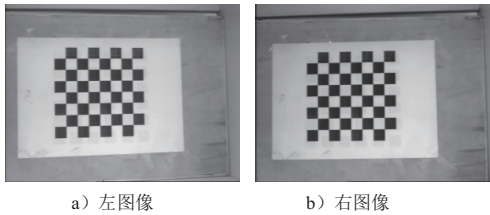


图2 双摄像机采集的同一标定板图像

2.2 标定点选择

Tsai 两步法需要提取标定板上的 n 个角点作为标定点用于计算。一般来说, n 的大小没有严格规定, 根据公式(5)可知, 为了通过最小二乘法解出线性方程 $AI=b$ 中的未知参数向量 I , 则 $n>5$ 。在实验中可分别取不同的 n 来分析最终标定结果的精度。同样, Tsai 两步法也没有限定标定点的选择位置, 但摄像机相对于标定板平面的位置关系必须满足下面两个重要的条件: 1) 世界坐标系中的原点不在视场范围内; 2) 世界坐标系中的原点不会投影到图像上接近图像平面坐标系的 y 轴。

上述两个条件对标定点的选择及其世界坐标系坐标的设置有一定的约束, 以左摄像机的标定为例, 具体实现如下:

1) 框选标定点的选择范围

如图 3 所示, 框选除边缘角点外的区域作为标定点的选择范围, 共 $7\times 7=49$ 个角点作为备选标定点供后续选择。

2) 世界坐标设置

备选标定点范围确定后, 为备选点设置世界坐标, 为满足摄像机相对于标定板平面位置关系的两个重要条件, 设置图 3 左上角点 P_A 世界坐标为 $(300, 300)$, 单位: mm。其他备选点以左上点为基准即可确定各自的世界坐标值。

3) 设置标定点数量及编号

确定设置的标定点数 n , 例如取 $n=16$ 。当 n 设置后, 在备选标定点范围内直接点选需要的角点, 如图 3 所示编号 1~16, 被选中的角点即为确定用于后续计算的标定点。标定点被选中的同时, 计算出其对应的世界坐标和图像坐标值。

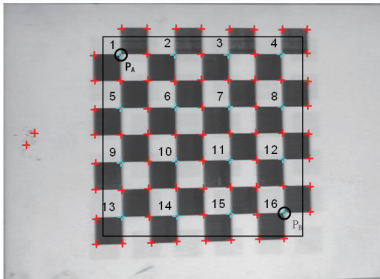


图3 标定点的选择

2.3 标定点亚像素级坐标提取

标定点(即标定板方格的角点)提取的目的是为了确定每个特征点在图像中的精确位置, 再结合其对应的空间坐标进行标定。由于特征点的图像坐标值是求解摄像机

参数必不可少的已知条件, 所以特征点提取对于摄像机标定很重要, 特征点提取的好坏会直接影响标定精度。

本文采用 Harris 角点检测法^[8-9]提取特征角点, Harris 算子只用到一阶差分, 计算简单且速度快, 其稳定性和可靠性都比较高。Harris 角点的探测精度是像素级的, 但一般来说角点的位置并不恰好位于某像素位置, Harris 角点提取的是近似值, 这对后续计算会带来误差。为此本系统在 Harris 角点检测的基础上, 通过对角点子域的像素灰度进行拟合内插, 获取亚像素角点坐标。OpenCV 中提供了函数 `cvGoodFeaturesToTrack` 和 `cvFindCornerSubPix` 用于亚像素角点检测^[10], 本文通过 VC++6.0 与 OpenCV 混合编程实现了亚像素角点检测算法。

2.4 标定参数计算

根据所使用摄像机提供的参数, 在计算中设定 x, y 方向像素间距均为 0.0043 mm , 图像中心坐标为 $(384, 288)$, x 方向像素传感器数 N_{cx} , x 方向像素数 N_{fx} 和图像尺度因子 s_x 均取 1。将上述设定参数作为 Tsai 算法的输入数据, 代入到公式(6)中, 为了求解 Tsai 算法中的大量方程组及矩阵运算, 引入 matlab 引擎, 采用 VC 与 matlab 相结合的编程方法^[11], 提高运算精度和效率, 得出的标定计算结果如表 1 所示。

表1 左、右摄像机的标定结果

计算参数	左摄像机	右摄像机
光心坐标/Pix	384.458 0, 288.299 3	384.196 7, 288.099 2
旋转矩阵 R	-0.991 4 -0.018 2 -0.129 4	0.013 8 -0.999 3 0.035 0
	-0.130 0 0.032 0.990 9	-0.999 2 -0.011 8 0.037 9
	0.015 4 -0.995 0 0.097 8	0.036 6 0.098 3 0.994 5
平移向量 T/mm	405.601 3	404.493 8
	356.734 1	356.912 8
	-451.222 1	-364.595 9
有效焦距 f/mm	3.797 138	4.286 318
径向畸变系数 k	0.009 911	0.003 298

3 实验验证与分析

为了分析标定点数量及其分布的不同选择对标定结果的影响, 分别做如下 2 组实验。

3.1 实验 1 标定点数 n 的影响

图 2 中左图像上标定号按图 3 所示为 1~16, 右图像取点与之对应。在实验中分别取 $n=6, 8, 12, 16$ 。为了验证标定结果的准确性, 进一步结合双目立体匹配和定位算法, 完成点 P_A 和 P_B 的测距实验。经过 Harris 角点提取, 得该两点在左、右两幅图像上的图像坐标分别为(单位: Pix):

左图像: $P_A:(196.778, 176.620)$,

$P_B:(417.021, 390.742)$;

右图像: $P_A:(200.547, 191.530)$,

$P_B:(418.104, 404.652)$;

实际距离 $d_0=169.705\text{ 6 mm}$ 。实验结果如表 2 所示。

表 2 不同标定点数 n 的标定及测距结果

计算项		标定点 n			
		$n=6$	$n=8$	$n=12$	$n=16$
左摄像机	O_{c1}/Pix	384.707	384.458	384.413	384.941
		288.479	288.299	288.040	288.053
	f_1/mm	5.206 32	3.797 14	3.502 45	3.213 42
	k_1	0.012 58	0.009 91	0.008 55	0.018 37
右摄像机	O_{c2}/Pix	384.376	384.196	384.011	383.752
		288.159	288.099	287.948	287.934
	f_2/mm	9.204 68	4.286 32	4.759 61	4.344 20
	k_2	0.004 79	0.003 29	0.002 46	-0.003 4
d/mm		167.811 4	168.077 7	169.139 7	169.461 6
测距	$ \Delta d /\text{mm}$	1.894 2	1.627 9	0.565 9	0.244 0
	$(\Delta d /d_0)/(\%)$	1.12	0.96	0.33	0.14

表 2 中: O_{c1} 、 f_1 、 k_1 和 O_{c2} 、 f_2 、 k_2 分别表示左、右摄像机的光心坐标、有效焦距和径向畸变系数; d 为计算测得 P_A 和 P_B 两点的距离; $|\Delta d|$ 和 $|\Delta d|/d_0$ 分别代表绝对与相对距离误差。实验 1 结果表明, 当点数 n 越大时, 标定结果精度越高, 测距结果误差越小, 但考虑到 n 点数越大, 计算量也越大, n 不宜取得过大, 取 $n=12\sim 16$ 左右较为适宜。

3.2 实验 2 标定点位置分布的影响

在点数 n 取相同值, 如 $n=8$ 时, 分析不同的位置分布对测量结果的影响, 给出 4 种不同的位置分布(图 4)。

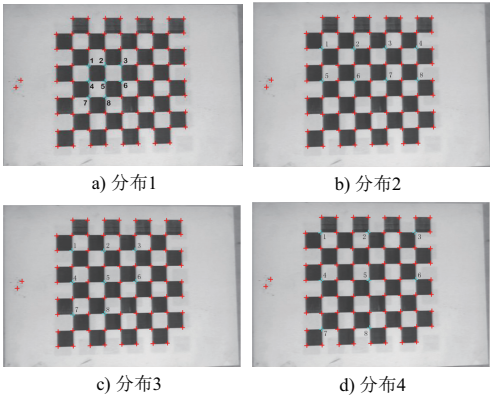


图 4 标定点的不同位置分布

对 4 种分布进行标定及测距实验, 所得结果见表 3。

表 3 标定点不同位置分布的标定及测距结果

计算项		标定点 n			
		分布 1	分布 2	分布 3	分布 4
左摄像机	O_{c1}/Pix	375.614	384.291	384.866	384.803
		287.086	288.128	288.032	288.086
	f_1/mm	0.263 32	4.703 49	3.643 95	3.538 42
	k_1	0.502 52	0.010 44	0.014 02	0.013 28
右摄像机	O_{c2}/Pix	384.716	383.184	383.882	383.713
		287.935	287.765	287.986	287.995
	f_2/mm	6.868 49	2.258 95	7.463 15	4.949 12
	k_2	0.022 57	-0.020 65	-0.000 69	-0.001 65

续表 3

计算项		标定点 n			
		分布 1	分布 2	分布 3	分布 4
d/mm		162.159	168.517	170.008	169.419
测距	$ \Delta d /\text{mm}$	7.5464	1.1891	-0.3019	0.2862
	$(\Delta d /d_0)/(\%)$	4.45	0.70	0.18	0.17

实验 2 结果表明, 不同标定点位置分布对结果的影响较大, 分布 1 取点过于紧密, 计算误差较大; 分布 2 分布在 2 行 4 列上, 分布 3、4 均匀分布在 3 行 3 列上, 与分布 2 相比, 3、4 组取点行列分布更加均匀, 精度也更高。分布 4 比分布 3 更分散, 但由于取点都比较均匀, 计算结果相似。以上结果表明, Tsai 算法在取点时需要保持相邻点之间的一定间隔, 并尽可能使行列分布均匀。

4 结语

本文针对现有 Tsai 算法在实施中图像标定点选择固化、操作灵活性差的缺点, 开发了基于 Visual C++ 6.0 的 Tsai 算法可视化操作平台。该平台通过标定点选择功能模块的应用, 可实现标定点的自由选择, 从而提高了 Tsai 算法操作的灵活性。通过双目立体视觉的标定和测距实验, 分析 Tsai 标定点数及其分布对标定结果的影响, 得出如下结论:

- 1) Tsai 标定点数取 12~16 较为适宜。
- 2) Tsai 算法在取点时应使点的行列分布均匀, 相邻点之间保持一定间隔。

值得指出的是, 本文对标定点位置分布的特点只得到了定性的分析结论, 未进行定量计算分析, 可进一步对标定点位置分布规律做深入研究。

参考文献:

[1] 徐德, 谭民, 李原. 机器人视觉测量与控制[M]. 第 3 版. 北京: 国防工业出版社, 2016.

[2] 聂亮, 李育蒙. 基于 Tsai 算法的光电系统畸变图像的标定和校正[J]. 价值工程, 2016, 35(7): 180-181.

[3] 马喜平, 李迪, 姚侠楠, 等. 基于 Tsai 两步法的视觉点胶系统相机标定方法[J]. 自动化与仪表, 2018, 33(5): 1-4, 18.

[4] 吴媛, 杨富超. 基于 Tsai 的阴影恢复新算法在 SMT 焊点三维重建的应用[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(6): 1651-1654.

[5] 田原娜, 李骊洋, 潘敏凯. 基于 Tsai 法的摄像机标定反推修正模型[J]. 东北电力大学学报, 2013, 33(3): 19-22.

[6] 王鹏, 施伟斌, 孔维行, 等. 基于非线性优化模型的数码相机标定算法[J]. 数据通信, 2014(1): 47-50.

[7] 赵宣铭. 一种基于 Tsai 法的摄像机改进标定法[J]. 西安工程大学学报. 2011, 25(4): 560-565.

[8] 汪海洋, 陈德林, 帅一师, 等. 基于灰度差预处理的改进 Harris 角点检测算法[J]. 电子技术与软件工程, 2019(9): 72-73.

[9] 赵瑞朋, 李炎炎, 龙伟, 等. 基于角点检测的二维图像边缘平直化算法研究[J]. 机械工程师, 2018(10): 44-46.

[10] 布拉德斯基(美). 学习 OpenCV 3[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.

[11] 董建婷, 王杰. VC++调用 Matlab 实现图像处理的 3 种常用方法比较[J]. 现代电子技术, 2012, 35(16): 46-49.