

一种线结构光测量系统误差补偿方法*

许 铀, 熊会元, 宗志坚
(中山大学工学院, 广东 广州 510006)

摘要: 针对提高线结构光测量系统测量精度, 提出了一种误差补偿方法。该方法通过计算标定后的标定点点计算坐标值和实际坐标值之间的残差, 利用插值的方法建立相机每个像素点所对应的物点残差数据库, 在测量过程中根据残差数据库计算每个亚像素测量点的残差, 从而实现了对测量结果的误差补偿。实验通过对 Tsai 算法和多项式拟合算法两种模型的测量结果运用该补偿方法进行了修正和比较, 表明本方法能在一定程度上提高线结构光测量系统的精度、满足精密测量的要求, 并且适用于多种标定方式。

关键词: 残差修正; 插值; Tsai 标定; 多项式拟合

中图分类号: TP242.6⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2010)04-0011-05

A Residual Error Correcting Method of Structured-light Stripe Measuring System

XU You, XIONG Huiyuan, ZONG Zhijian

(School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: A correcting method was described to improve the accuracy of line structured-light measurement system. According to the errors between the actual object spots calibrated and the object spots calculated from the calibration approach, the database of camera's pixel-object-error is established by interpolation. The result of measurement can be corrected by using the database. Tsai's calibration and polynomial fitting were used in the experiments, and the results are corrected by the method and analyzed. The experiments show that the correcting method is effective and applicable to a variety of calibration methods and the precision is suitable for the requirement of measurement.

Key words: residual correction; interpolation; Tsai's calibration approach; polynomial fitting

线结构光坐标传感器具有非接触、柔性好、测量精度高等优点, 被广泛应用于社会各个领域^[1-3]。

测量的基本问题之一是如何实现较高的精度, 因此提高摄像机测量精度也就成了光学坐标测量系统的关键技术^[4]。本文针对进一步提高线结构光测量系统在测量中的精度, 提出一种误差补偿的方法, 并把该方法用在 Tsai 算法和多项式拟合算法上, 进行了测量实验和对比。

1 线结构光视觉传感器测量模型

如图 1 所示, 将传感器激光面定义为 $Z = 0$ 的

世界坐标系 XOY 平面, 摄像机图像平面上每个点都和 XOY 平面上的点一一对应。确定摄像机图像平面坐标 (u, v) 和世界坐标系 XOY 平面上对应点 $(x_w, y_w, 0)$ 的关系称为线结构光坐标传感器的标定。

标定原理可分为两类方法^[5]: 一类是基于摄像机标定两步法: 即是首先不考虑畸变情况下求解摄像机内外参数的初值, 然后在考虑畸变情况下非线性优化内外参数, 如文献 [6]; 另一类则为直接标定方法: 即不需标定摄像机内外参数, 由传感

* 收稿日期: 2009-06-02

基金项目: 广东省科技攻关资助项目 (0602B2006022)

作者简介: 许铀 (1983 年生), 男, 博士生; 通讯作者: 熊会元; E-mail: xionghy@mail.sysu.edu.cn

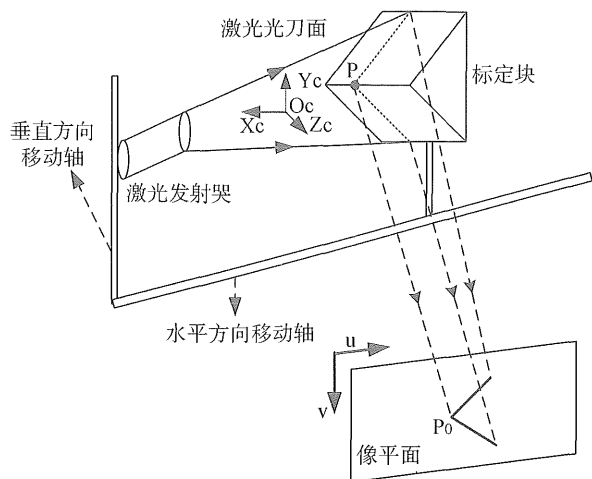


图 1 标定系统模型
Fig. 1 Calibration system model

器 CCD 的像点坐标直接反算出该点的三维坐标, 如文献 [7-8] 等。Tsai 测量模型在已知摄像机参数前提下通过迭代的方式求出内外参数的理想值, 是摄像机标定两步法的经典算法^[9]。由于已知的摄像机参数不一定与实际运用时的相同, 且该算法只考虑了一阶径向畸变, 因此这种算法计算精度还不是很高; 多项式拟合测量模型是一种直接建立摄像机图像平面坐标和世界坐标系 XOY 平面上对应点的坐标转换多项式参数方程。该方式操作简单, 在有限的景深范围内具有较好的精度, 但是对于大景深的范围, 理想值和多项式拟合值存在着较大的误差^[10]。

2 标定模型的误差补偿方法

为了提高测量结果的精度, 文献 [4] 通过标定像点的残差建立了空间参考网络数据库, 然后对利用该数据库中数据修正测量点的残差。但是该方法仅仅是针对双目立体视觉的范畴, 并不适用于线结构光传感器的误差补偿; 文献 [10] 通过提取不同景深位置固定直线的测量误差, 对线结构光测头进行高度方向上的误差补偿, 然后进一步提取高度误差补偿后测量结果的误差值, 进行二次补偿与修正。该方法虽然能提高测量精度, 但是过程比较繁琐, 并且仅适用于多项式拟合测量模型。

本文提出了一种误差补偿方法, 该方法不仅可以提高线结构光测量精度, 而且适用于多种标定测量模型。

2.1 标定算法的物坐标值残差

实际上, 无论是两步法或者直接标定法, 实际计算出来的对应点世界坐标值与实际坐标值会存在

一定的偏差, 即残差。

对应点世界坐标值的残差 ($\Delta x, \Delta y$) 可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta x = x_w - x'_w \\ \Delta y = y_w - y'_w \end{cases} \quad (1)$$

其中, (x_w, y_w) 为实际坐标值, (x'_w, y'_w) 为计算坐标值。

2.2 物点残差的修正方法

为了修正物点的残差, 本文可以采用以下步骤:

1) 建立标定物方残差数据集。

在标定完成后, 可以得到标定点的图像平面坐标 (u_i, v_i)、标定点的实际坐标 (x_{wi}, y_{wi}) 和计算坐标 (x'_{wi}, y'_{wi}), 由式 (1) 得到标定物方世界坐标值的残差 ($\Delta x_i, \Delta y_i$)。建立像点与对应世界坐标残差数据集。

2) 建立测量残差修正数据库。

建立残差修正的数据库可根据步骤 1) 建立的残差数据集使用如下方法:

如图 2, 设 P_i 为图像中某一像素点 (u_i, v_i), P_1, P_2, P_3, P_4 为距离 P_i 最近的 4 个标定物点。做直线 $y = v_i$ 分别交 P_1P_4, P_2P_3 于 a_1, a_2 ; a_1, a_2 的世界坐标残差分别由 P_1 和 P_4, P_2 和 P_3 通过插值的方法得到:

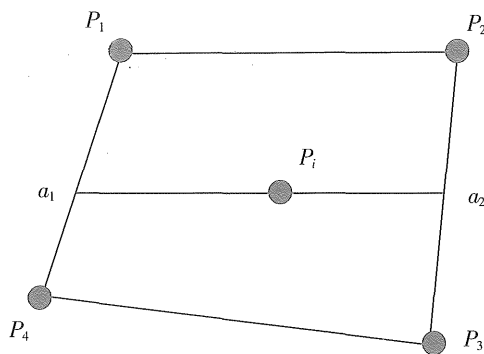


图 2 插值求残差

Fig. 2 Interpolation calculating residual

$$\begin{aligned} \Delta x_{a_1} &= \frac{|a_1P_1|}{|P_1P_4|} \Delta x_{P_4} + \frac{|a_1P_4|}{|P_1P_4|} \Delta x_{P_1} \\ \Delta y_{a_1} &= \frac{|a_1P_1|}{|P_1P_4|} \Delta y_{P_4} + \frac{|a_1P_4|}{|P_1P_4|} \Delta y_{P_1} \\ \Delta x_{a_2} &= \frac{|a_2P_2|}{|P_2P_3|} \Delta x_{P_3} + \frac{|a_2P_3|}{|P_2P_3|} \Delta x_{P_2} \\ \Delta y_{a_2} &= \frac{|a_2P_2|}{|P_2P_3|} \Delta y_{P_3} + \frac{|a_2P_3|}{|P_2P_3|} \Delta y_{P_2} \end{aligned} \quad (2)$$

P_i 在直线 a_1a_2 上, 可以通过插值求出 P_i 的世

界坐标残差

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= \frac{|a_1 p_i|}{|a_1 a_2|} \Delta x_{a_2} + \frac{|a_2 p_i|}{|a_1 a_2|} \Delta x_{a_1} \\ \Delta y_i &= \frac{|a_1 p_i|}{|a_1 a_2|} \Delta y_{a_2} + \frac{|a_2 p_i|}{|a_1 a_2|} \Delta y_{a_1} \end{aligned} \quad (3)$$

通过上述方法，可插值求得图像中每个像素点相应的世界坐标残差，从而建立测量残差修正数据库。

3) 测量点物坐标值残差的修正。

线结构光测量主要是通过采集投射于测量目标上的光刀轮廓线在图像中的信息，求出该光刀轮廓线的实际位置。本文采用全分辨率精确提取方法采集光刀轮廓线的中心位置^[11]。

全分辨率精确提取条纹中心方法对提取到的任意光刀点坐标值，总能达到亚像素的级别。因此，对任意测量点，可根据步骤 2) 建立的数据库找到与其相邻的四个象素位置所对应的残差，采取图 2 所示的方式插值计算测量点所对应的世界坐标值残差，从而达到误差补偿的目的。

3 实验结果与分析

本实验采用 Watec 902B 摄像机镜头以及西安华科线半导体线激光器，以 Matlab 验证本文算法。在摄像机拍摄范围 (50 mm × 30 mm) 内采集了 422 个点 (其分布如图 3 所示)。

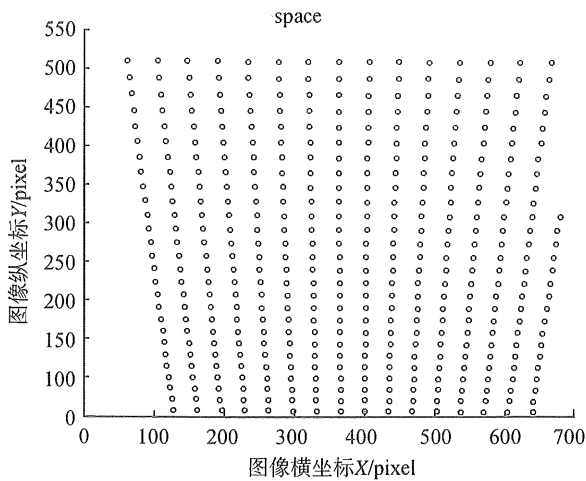


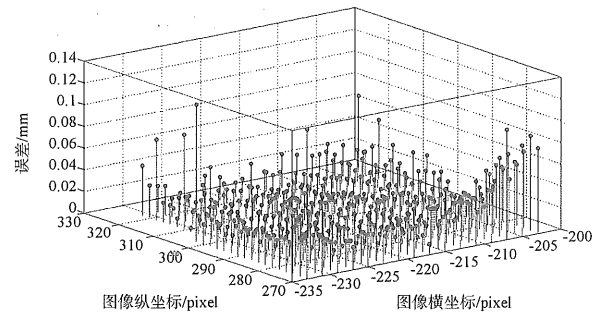
图 3 标定点图像分布图

Fig. 3 Location of the calibrating points

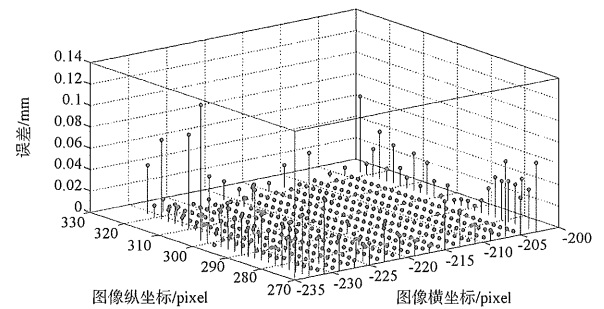
利用 Tsai 标定算法和多项式拟合算法分别对其进行标定，并利用标定结果 (如表 1 所示) 反求标定点世界坐标值，利用本文提出的方法进行误差补偿，补偿前后的重复定位误差分布如图 4 和图 5 所示，平均误差如表 2 所示。

表 1 两种算法标定结果

Table 1 Result of tow calibration models		
Tsai 参数	多项式拟合参数	
焦距 $f=32.718\ 735$	x 方向系数	y 方向系数
畸变系数 $k_1 = 1.062\ 347E-004$	-1.945 738E+02	2.614 968E+02
位移矩阵	-6.011 518E-02	-1.794 536E-04
$t_1 = -213.687\ 240$	-1.402 614E-02	1.557 712E-01
$t_2 = -137.512\ 264$	-4.591 216E-06	1.101 612E-05
$t_3 = 466.144\ 265$	3.317 644E-05	-2.208 018E-07
旋转矩阵	5.360 754E-06	-8.507 985E-05
$r_1 = -0.999\ 921$	1.387 122E-08	-3.526 324E-08
$r_2 = -0.007\ 419$	1.120 511E-08	-5.949 36E-09
$r_3 = -0.010\ 121$	-8.943 033E-09	-1.416 482E-08
$r_4 = 0.005\ 662$	1.277 761E-08	2.281 260E-08
$r_5 = 0.453\ 041$	-1.777 393E-11	4.900 642E-11
$r_6 = -0.891\ 472$	-1.454 365E-11	1.535 509E-11
$r_7 = 0.011\ 199$	-1.688 676E-11	5.906 971E-12
$r_8 = -0.891\ 459$	-1.426 760E-11	3.812 771E-11
$r_9 = -0.452\ 963$	-2.981 108E-11	1.739 208E-11
图像中心	7.903 511E-15	-2.550 586E-14
$u_0 = 346.528\ 487$	1.136 772E-14	-1.039 203E-14
$v_0 = 343.854\ 822$	1.420 073E-16	-4.680 222E-16
像素尺寸	1.449 226E-14	-9.900 683E-15
$dx = 0.008\ 6$	1.604 066E-14	-2.756 748E-14
$dy = 0.008\ 3$	1.901 943E-14	-1.394 099E-14



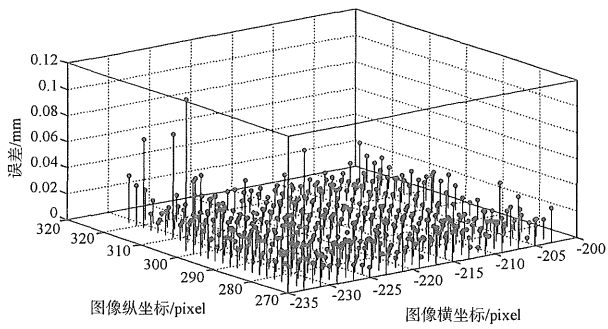
(a) Tsai 算法补偿前误差分布图



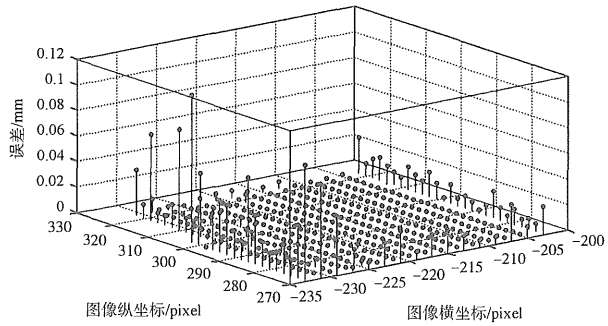
(b) Tsai 算法补偿后误差分布图

图 4 Tsai 算法误差补偿前后误差分布图

Fig. 4 Changes in error distribution of Tsai's calibration



(a) 多项式拟合算法补偿前误差分布图



(b) 多项式拟合算法补偿后误差分布图

图 5 多项式算法误差补偿前后误差分布图

Fig. 5 Changes in error distribution of polynomial fitting

表 2 两种算法误差补偿前后的重复误差精度单位

TSAI 算法重复误差精度		多项式算法重复误差精度	
补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
2.158 1E-02	6.118 3E-03	1.289 2E-02	4.113 8E-03

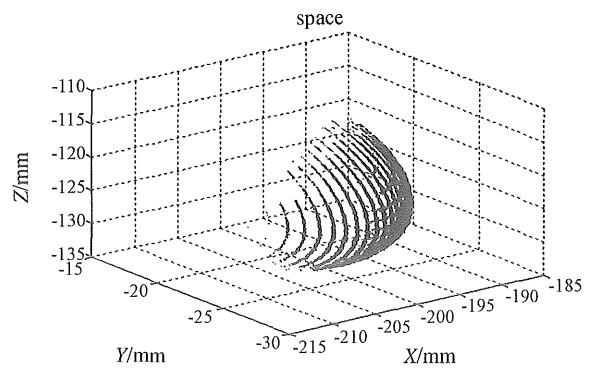
因为标定精度的好坏会影响测量的结果，所以在本文中采用 CIMCORE 公司生产的直径为 25.401 45 mm 的标准球，将线结构光测头放置于在 CMM 平台上，经过单摄像机标定及外参数标定^[12]后，对标准球进行测量。通过拟合球半径与实际半径做比较验证其误差，两种算法在误差补偿前后的结果如表 3 所示，两种方式误差补偿后测得的球形如图 6 所示。由结果可见，两种算法的计算结果在通过本文提出的误差补偿后，都能起到减少误差的作用。

4 结 论

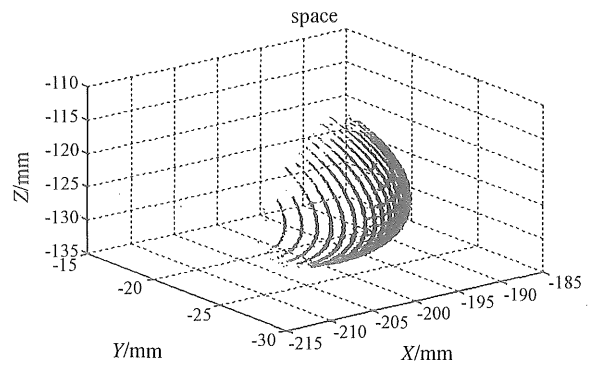
本文针对提高线结构光测量系统精度，提出了一种利用插值建立残差修正数据库对测量结果进行误差补偿的方法，减少了测量时所造成的误差。目前，这种误差补偿方法的理想范围为 50 mm × 30 mm

表 3 两种算法误差补偿前后测量结果

	TSAI 算法	多项式拟合法
实际球半径	12.700 725	12.700 725
补偿前球半径	12.701 941	12.692 799
补偿前绝对误差	1.216 388e-003	7.926 265e-003
补偿后球半径	12.701 818	12.701 272
补偿后绝对误差	1.093 085e-003	5.471 480e-004
补偿提高率	10.136 802%	93.097 027%



(a) Tsai 算法补偿后重构图



(b) 多项式拟合算法补偿后重构图

图 6 修正后球的三维重构图

Fig. 6 Reconstruction results of a standard ball

的空间，实验证明该方法能对结构光测量系统使用时出现的误差起到一定的修正作用。该误差补偿方法不仅适用于 Tsai 标定算法和多项式拟合标定算法，也可以运用到其他标定算法的误差补偿当中。

参考文献:

[1] SON S, PARK H, LEE K H. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42 (8): 889-897.

[2] NHON H T, JONATHAN L, BRADEN C F, et al. Accurate measurement of cartilage morphology using a 3D la-

- ser scanner [C]//Computer Vision Approaches to Medical Image, 2006:37-48.
- [3] XIE Z X, WANG J G, JIN M. Study on a full field of view laser scanning system [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 33-43.
- [4] 郝继贵, 王大为, 王鑫, 等. 光学坐标测量系统中的关键技术 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36 (3): 296-299.
- [5] WANG Z Y, LI H W, LI D P, et al. A direct calibration method for structured light [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation Niagara Falls, 2005: 1283-1287.
- [6] 徐德, 王麟琨, 谭民. 基于运动的手眼系统结构光参数标定 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26 (11): 1101-1105.
- [7] 李清泉, 王植, 李宇光. 基于线结构光的3维目标测量与多分辨率建模 [J]. 测绘学报, 2006, 35 (11): 371-378.
- [8] FENG T, LI X, JI G, et al. A new laser-scanning sensing technique for underwater engineering inspection [J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1996, 10 (4): 363-368.
- [9] ROGERY T. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]//IEEE Conference of Computer Vision and Pattern Recognition, 1986: 364-374.
- [10] 丁建军, 蒋庄德, 李兵, 等. 线结构光扫描测头误差分析与补偿方法 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (3): 286-290.
- [11] 熊会元, 宗志坚, 陈承鹤. 线结构光条纹中心全分辨率精确提取方法 [J]. 光学精密工程, 2009, 17 (5): 1057-1062.
- [12] XIONG H Y, XU Y, ZONG Z J. Accurate extrinsic calibration method of line structured-light sensor based on standard ball [C]//IST 2009 International Workshop on Imaging Systems and Techniques Proceedings, 2009: 193-197.

(上接第5页)

参考文献:

- [1] GAHEGAN M. What is Geocomputation? [J]. Transactions in GIS, 1999, 3(3): 203-206.
- [2] GOODCHILD M F. Geographical information science [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1992, 6:31-47.
- [3] 黎夏, 叶嘉安, 刘小平, 等. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 250-258.
- [4] CLARKE K C, HOPPEN S, GAYDOS L. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 247-261.
- [5] WU F, WEBSTER C J. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1998, 25: 103-126.
- [6] WU F L. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16: 795-818.
- [7] LI X, YE H A G. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16: 323-343.
- [8] LI X, YE H A G. Data mining of cellular automata's transition rules [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2004, 18: 723-744.
- [9] 黎夏, 刘小平, 李丹, 等. 基于耦合的地理模拟优化系统 [J]. 地理学报, 2009, 64(8): 1009-1018.
- [10] LI X, HE J Q, LIU X P. Intelligent GIS for solving high-dimensional site selection problems using ant colony optimization techniques [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2009, 23(3/4): 399-416.
- [11] LI X, HE J Q, LIU X P. Ant intelligence for solving optimal path-covering problems with multi-objectives [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2009, 23(7): 839-857.
- [12] VERDIELL A, SABATINI M, MACIEL M C, et al. A mathematical model for zoning of protected natural areas [J]. International Transactions in Operational Research, 2005, 12: 203-213.