

感知二步插值标定方法研究

史明强, 张海翔, 鲁 正, 胡恢军, 喻擎苍*

(浙江理工大学 信息电子学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:为提高标定效率及标定精度,提出了感知二步插值标定方法。该方法抛弃通过人工测量来调整实验平台与标定面之间位置关系的方法,让计算机具备感知 CCD 光轴与标定平面法线间偏差的能力来弥补人工测量的不足。在标定过程中,通过提取图像角点的亚像素坐标,直接建立了成像面上角点与世界坐标之间的对应关系,最后根据已知角点插值得到了平面上任一点的世界坐标,并进行了实际平面符号图的检测试验。试验结果表明:该方法提高了标定速度及标定精度,为三维重建奠定了基础。

关键词:结构光;插值;亚像素;系统标定;三维坐标

中图分类号:TP242.6

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)08-0960-05

Research on two-step susceptible and interpolated calibration algorithm

SHI Ming-qiang, ZHANG Hai-xiang, LU Zheng, HU Hui-jun, YU Qing-cang

(College of Electronics and Information, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at improving the calibrated efficiency and precision, a two-step susceptible calibration algorithm based on the interpolation technique was introduced. In this two-step method, the traditional method which adjusts the position relationship between experimental platform and calibration plane by manual measurements was abandoned, the computer was made to be able to "perceive" the deviation existed between the CCD axis and the normal of calibration the plane, so as to the shortages of artificial measurements were made up. At first, by the sub-pixel coordinations of the extracted corner points, the corresponding relationship between the corner points of imaging plane and the world coordinate was directly established during the calibration. Then the world coordinates of any points in the plane were obtained according to the interpolation of the known corner points. At the same time a experiment was done to test the actual plane symbol graph. The results prove that this method improves the calibrated efficiency and precision, and lay the foundation for 3D reconstruction.

Key words: structured light; interpolation; sub-pixel; system calibration; three-dimension coordinate

0 引 言

在结构光三维检测系统中,摄像机标定是从二维影像获取三维欧氏空间信息必不可少的关键一步。空间物体表面某点的三维几何位置与其在图像中对应点之间的相互关系是由摄像机成像的几何模型决定的,这些几何模型就是摄像机参数。在大多数条件下,这些参数必须通过实验与计算才能得到,这个过程称为是摄像机标定^[1-2]。标定过程就是确定摄像机的几何和光学参数、摄像机相对于世界坐标系的方位。标定

精度的大小,直接影响着检测系统的精度。

为快速高效得到高精度标定结果,本研究提出了本感知二步插值标定法。

1 感知二步插值标定法

传统标定方法^[3-4]大都是从摄像机的内部结构入手,通过求解内外部参数,建立摄像机几何模型,展开标定。而感知二步插值标定法不考虑光源大小及摄像机内外参数,而是基于光线在外空间沿直线传播这一基本原理进行光路标定。系统包括光源、CCD^[5]、标定板和辅助相机,系统坐标如图 1 所示。其中标定板为

收稿日期:2010-12-30

作者简介:史明强(1985-),男,河北新河人,主要从事信号与信息处理方面的研究。E-mail:shimq567@163.com

通信联系人:喻擎苍,男,教授,硕士生导师。E-mail: keyijiaojie@126.com

间隔均等的网格,标定板垂直于 Z 方向并与 OXY 面平行, OZ 交标定板于点 $P(0,0,Z_1)$,将标定板移动一定距离后使 OZ 交标定板于点 $P(0,0,Z_2)$ 。 S_1 为光源侧(非点光源)投影面上的一个点,点 P_1 为点 S_1 所在光线与标定板的交点。 O 为 CCD 侧(非点光源)投影面上的一个点,点 P_2 为点 O 所在光线与标定板的交点。

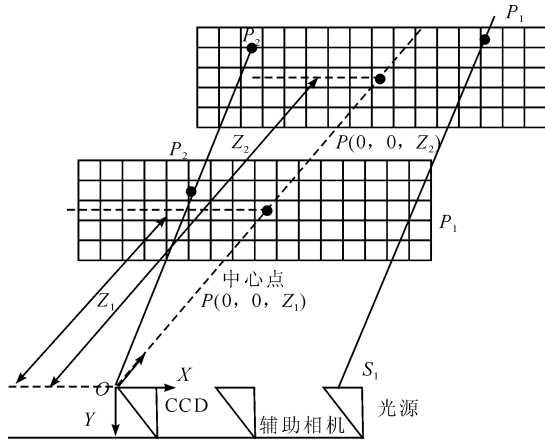


图1 感知二步插值标定原理

感知二步插值标定法以 CCD 相机的光学中心为全局原点, Z 轴垂直,与标准网格建立三维全局坐标系,符合右手规则。本研究调整整个实验平台使得该平台与目标平面平行,且摄像机、辅助相机及投影仪处于同一水平线上。辅助相机平行于 Z 方向拍摄两次,得网格板上已标记的同一点分别在两次相机拍得图片上的坐标,确定该点的光线方程^[6]。如对光线 S_1P_1 ,相机拍摄两次可得同一点 P_1 在两次拍得图片中所在的位置,并根据相机拍摄的不同位置得到深度信息,即可得到两点全局坐标“ (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) ”。那么可标定光源侧光路 S_1P_1 的空间方程和 CCD 侧的光路 OP_2 空间方程:

$$\frac{x - x_{1A}}{x_{2A} - x_{1A}} = \frac{y - y_{1A}}{y_{2A} - y_{1A}} = \frac{z - z_{1A}}{z_{2A} - z_{1A}} \quad (1)$$

$$\frac{x - x_{1B}}{x_{2B} - x_{1B}} = \frac{y - y_{1B}}{y_{2B} - y_{1B}} = \frac{z - z_{1B}}{z_{2B} - z_{1B}} \quad (2)$$

感知二步插值标定法要求光源的发射点与摄像机接收点必须始终处于同一水平线上,并且整个实验平台始终平行于标定平面,由于实验装置在移动过程中,若采用人工测量以及依靠经验来对准,会给系统引入很大的误差。主要包括:①角度偏转产生的误差,如图2所示;②水平偏移产生的误差,如图3所示。

为了得到精度较高的标定结果,本研究抛弃通过人工测量来调整实验平台与标定面之间位置关系的方法,让计算机具备感知 CCD 光轴与标定平面法线间偏差的能力,来弥补人工测量的不足。在标定过程中本

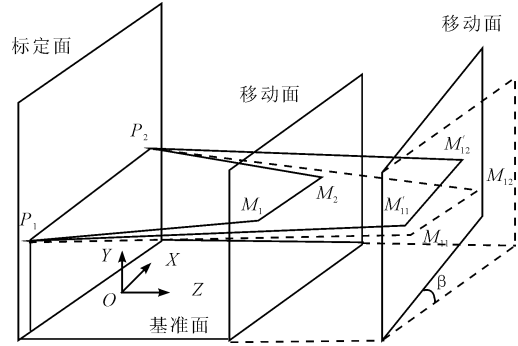


图2 标定引入角度偏转误差示意图

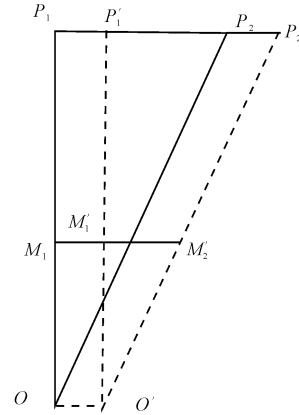


图3 水平偏移产生误差示意图

研究通过提取图像角点的亚像素坐标^[7],直接建立成像面上角点与世界坐标之间的对应关系,采用亚像素云点提取方法的过程为:开始-获取形心坐标-左右搜索采样点-确定亚像素点灰度-曲线拟合求极值点-迭代提取结构光中心线(判断迭代是否结束)-结束的话执行光条中心线断线修补-利用光条中心线相交法提取符号检测点角点坐标,最后根据已知角点插值得到平面上任一点的世界坐标。

1.1 计算机感知

1.1.1 水平偏移感知

为了使移动面在前后两次移动过程中,确保水平方向上尽量不发生偏移,如图4所示,本研究在 CCD 光心处设定“十”字交叉线,每次移动到一个定点后,都必须调整标定板和移动面,使“十”字交叉线中心点 O 与标定板的中心点 O' 重合,即保证移动面与标定面在水平方向上的相对位置不变。

若 CCD 分辨率为 $h \times v$,则“十”字交叉中心点 O 坐标 $(h/2, v/2)$ 。通过上述分析可知,若移动前后 CCD 拍摄的网格图像内点 O' 坐标均为 $(h/2, v/2)$,则说明移动面与标定面在水平方向上的相对位置不变,因此必须确定点 O' 的图像坐标 (x_0, y_0) 。

本研究通过滑轮和顶针调整标定板位置,使标定

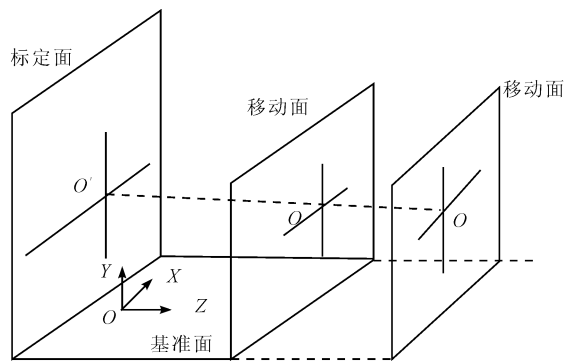


图 4 水平矫正示意图

面中心点 O' 尽量接近 CCD“十”字交叉中心点 O , 然后遍历所有网格图像中每个方格 $Grid_{j,i}$ 的右上角点, 记其坐标为 P' , 找到令 $|OP'| = \sqrt{(O.x - P'.x)^2 + (O.y - P'.y)^2}$ 最小的角点, 则该节点 P' 坐标为点 O' 坐标, 并记录其所落在的 $Grid_{j,i}$ 行列。 $Grid_{j,i}$ ($0 < j < R_w, 0 < i < Col$) 包含以下几个信息:

(1) 方格的有效性: $Grid_{j,i} = \begin{cases} 0 & \text{无效;} \\ 1 & \text{有效;} \end{cases}$

(2) $temp.x, temp.y$ 分别为点 O' 所属的 $Grid_{j,i}$ 行列;

(3) $dist(P, P')$ 为点 P' 到点 P 的距离, 则确定 O' 点坐标算法如下:

($Grid_{j,i} = 1$) { 令: $dist_{min} = 9\ 999\ 999$

($dist(P, P') < dist_{min}$) { $dist_{min} = dist(P, P')$;

记录 $temp.x = i; temp.y = j$; 置 $j = j + 1; i = i + 1$;

-|| ($j > R_w$) $\cap$ ($i > Col$)) }

该算法得到的坐标显示在软件界面上, 本研究不断调整标定面直至坐标显示为预期的数值。

1.1.2 角度偏转感知

在基于摄像机小孔成像模型下, 本研究将移动面作为参照面, 标定面相对于移动面前后移动, 并且把偏转角度转移到标定面上。移动过程中会发生角度偏转, 引起误差。

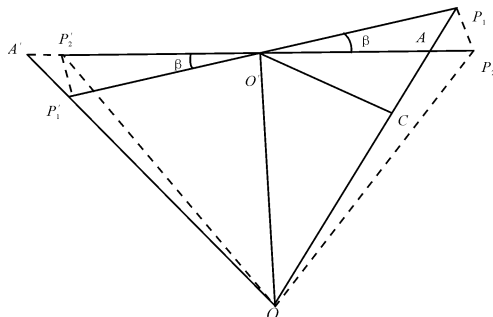


图 5 角度偏转

(1) 偏转角度计算。

如图 5 所示, 当目标平面从 $O'P_2$ 偏转到 $O'P_1$ (偏转角为 β) 后, P_2 点移动到了 P_1 点。假定标定面上发生一个从 O' 到 P_2 的位移, 位移量为 U 。但由于偏移角度 β 的影响, 该位移在标定面上变成了从 O' 到 P_1 的位移量为 U , 并且 $U = U'$ 。在 CCD 成像面上, P_1 点位置显示在 A 点, 标定面上变成了从 O' 到 A 的位移量为 u 。进一步假定 $d_{oo'}$ 且 C 垂直于 OP_1 , 则:

由 $\triangle OO'A$ 可知:

$$\tan \angle O'OA = \frac{d_{O'A}}{d_{OO'}} = \frac{u}{z} \Rightarrow \angle O'OA = \arctan \frac{u}{z} \quad (1)$$

由 $\triangle OO'C$ 可知:

$$\sin \angle O'OA = \frac{d_{O'C}}{d_{OO'}} \Rightarrow d_{O'C} = \frac{zu}{\sqrt{z^2 + u^2}} \quad (2)$$

由 $\triangle O'CA$ 可知:

$$\sin \angle O'P_1C = \frac{d_{OC'}}{d_{O'P_1}} = \frac{zu}{U \sqrt{z^2 + u^2}} \Rightarrow \angle O'P_1C = \arcsin \frac{zu}{U \sqrt{z^2 + u^2}} \quad (3)$$

由三角形内部角和为 π 可知:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \angle O'OA - \angle O'P_1C \quad (4)$$

从上式可见, β 的大小与 z, u, U 有关, 其中 z 的大小可通过实际测量得出, 因此, 要计算 β 的大小, 必须得出 u, U 的值, 即确定点 A 和点 P_2 到 O' 点的位移。

(2) 确定点 A 和点 P_2 坐标 (通过中心点 O' 及网格交点得到)。

(3) 确定 u 和 U 值。

确定了点 A 和点 P_2 的图像坐标后, 下一步将进行单位换算, 使像素单位转换成毫米单位, 从而得到 μ 和 U 的值。令 CCD 分辨率为 $h \times v$, 则:

$$S = P / [h / (n \times 10) \times (d_{std} / d)] \quad (5)$$

式中: P —像素位移; d_{std} —CCD 光心与标定面中心间垂直距离; n —在 d_{std} 距离时网格图像水平中心线上网格列数; d —任意测量距离。

(4) 角度偏转感知敏感性实验。

本研究通过 10 组实验来验证计算机对偏转角度感知的敏感性。本次实验中使用的 CCD 分辨率为 $2\ 048 \times 1\ 536$, $d_{std} = 1\ 500\ \text{mm}$, $d = 3\ 000\ \text{mm}$, $n = 87$, 计算机感知偏移角度与实际测量角度间的误差如表 1 所示。

从表 1 数据分析得出, β 绝对误差平均值为 $0.013\ 8\ \text{mm}$, 相对误差约为 1.04% , 说明利用计算机感知 CCD 光轴与标定平面法线间的偏转角度的方法是有效的。

表1 计算机感知偏移角度与实际测量角度间误差

偏移距离	测量角度	β	β 绝对误差	β 相对误差
-80	4.573 9	4.551 4	0.022 5	0.004 9
-40	2.290 6	2.306 7	0.016 1	0.007 0
-20	1.145 8	1.128 7	0.017 1	0.014 9
10	0.572 9	0.561 9	0.011 0	0.019 2
25	1.432 1	1.423 5	0.007 5	0.005 2
60	3.433 6	3.452 9	0.019 3	0.005 6

2 系统标定

该方法旨在建立点的图像坐标与世界坐标的对应关系。本研究在平面上放置一网格间隔均等的标准网格板作为标定板,确定标定板角点世界坐标^[8],再经过提取标定图像角点坐标,就可以在角点图像坐标与世界坐标之间建立一一对应关系。本研究记录每一角点的图像坐标及世界坐标,其余任意点的坐标可通过插值得到。

2.1 角点世界坐标的确定

根据感知二步插值标定法原理可知,角点的图像坐标和世界坐标的确定是关键。在提取亚像素角点坐标后,接下来要确定角点的世界坐标。该系统使用的标定板是网格间隔均为 10 mm 的标准网格板,在确定 OXY 平面坐标原点 O' 所属网格 $Grid_{\text{temp},y,\text{temp},x}$ 后,以点 O' 为中心向外扩张,所有相邻角点间的世界坐标相差 10 mm,直至扫描完所有的 $Grid_{j,i}$ 。

2.2 二次曲面插值算法

由于本研究得到的只是角点的图像坐标与世界坐标的对应关系,而其他点的世界坐标则需插值得到。非线性插值考虑到透镜成像属于非线性映射,适合于摄像机的非线性模型,所以它更适合一般情况。本研究对标定板中每个网格区域采用二次曲面插值算法^[9-10]。

标定板上点的世界坐标分布及图像点的分布如图 6 所示, T 点是本研究要求的点, t 点是图像中与 T 点对应的像点, S_0, S_1, S_2 和 S_3 点是 T 点的 4 个最近邻特征点, s_0, s_1, s_2, s_3 则是 S_0, S_1, S_2, S_3 点对应的像点,其坐标分别为: $S_0(X_0, Y_0, Z_0), S_1(X_1, Y_1, Z_1), S_2(X_2, Y_2, Z_2), S_3(X_3, Y_3, Z_3), T(X', Y', Z'), s_0(x_0, y_0), s_1(x_1, y_1), s_2(x_2, y_2), s_3(x_3, y_3), t(x', y')$, S_4 点为 S_0, S_1, S_2 和 S_3 点的中心点,其坐标为 $S_4(X_4, Y_4, Z_4)$, s_4 是 S_4 点对应的像点,其坐标为 $s_4(x_4, y_4)$ 。

已知二次曲面方程:标定板上点的世界坐标分布及图像点的分布。

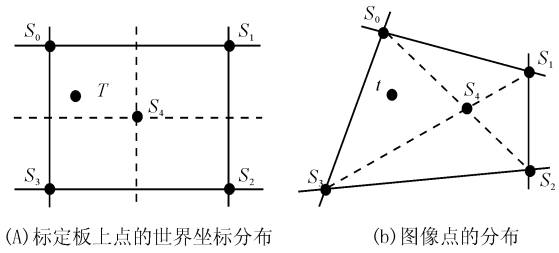


图6 标定板上点的世界坐标分布及图像点的分布

$$f(x, y) = ax^2 + by^2 + cx + dy + e \quad (6)$$

本研究确定 (x', y') 所处网格所对应的周围 4 个采样点和网格中心点,网格中心点的世界坐标 (X_4, Y_4, Z_4) 及网格中心点的图像坐标 (x_4, y_4) :

$$\begin{cases} X_4 = \frac{X_0 + X_1 + X_2 + X_3}{4} \\ Y_4 = \frac{Y_0 + Y_1 + Y_2 + Y_3}{4} \\ Z_4 = \frac{Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3}{4} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_4 = \frac{x_0 + x_1 + x_2 + x_3}{4} \\ y_4 = \frac{y_0 + y_1 + y_2 + y_3}{4} \end{cases} \quad (8)$$

本研究将采样所得的 5 个坐标点及相应的世界坐标代入式(6)即可得:

$$\begin{cases} X_0 = ax_0^2 + by_0^2 + cx_0 + dy_0 + e \\ X_1 = ax_1^2 + by_1^2 + cx_1 + dy_1 + e \\ X_2 = ax_2^2 + by_2^2 + cx_2 + dy_2 + e \\ X_3 = ax_3^2 + by_3^2 + cx_3 + dy_3 + e \\ X_4 = ax_4^2 + by_4^2 + cx_4 + dy_4 + e \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} Y_0 = a'x_0^2 + b'y_0^2 + c'x_0 + d'y_0 + e' \\ Y_1 = a'x_1^2 + b'y_1^2 + c'x_1 + d'y_1 + e' \\ Y_2 = a'x_2^2 + b'y_2^2 + c'x_2 + d'y_2 + e' \\ Y_3 = a'x_3^2 + b'y_3^2 + c'x_3 + d'y_3 + e' \\ Y_4 = a'x_4^2 + b'y_4^2 + c'x_4 + d'y_4 + e' \end{cases} \quad (10)$$

该非线性方程组可以通过高斯消去法求出未知系数 $a, b, c, d, e, a', b', c', d', e'$, 由于平面上标定板网格角点的深度值都相同, Z' 值很容易确定。在确定了二次曲面方程后,则 (x', y') 所对应的世界坐标为:

$$X' = [a \quad b \quad c \quad d \quad e] \begin{bmatrix} x'^2 \\ y'^2 \\ x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Y' = \begin{bmatrix} a' & b' & c' & d' & e' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'^2 \\ y'^2 \\ x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Z' = Z_0 \quad (13)$$

2.3 确定像素点对应网格

二次曲面插值算法相当于得到世界坐标与图像坐标间的变换矩阵,对于任意一点只需找到其所对应的变换矩阵,则可通过坐标变换得到其世界坐标。本研究在利用提取亚像素角点时,可以分别得到网格条纹中心线的曲线方程,根据像素点与网格中心线的位置关系来判断像素点是否落在该网格内。若像素点落在某一网格内,则它们之间的关系必满足下式:

$$\begin{cases} P.x - \sum_{m=0}^2 coeff_m^0 \times P.y^m \leq 0 \\ P.y - \sum_{m=0}^2 coeff_m^1 \times P.x^m \geq 0 \\ P.x - \sum_{m=0}^2 coeff_m^2 \times P.y^m \geq 0 \\ P.y - \sum_{m=0}^2 coeff_m^3 \times P.x^m \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P.x, P.y$ —像素点 P 的坐标; $coeff_m^0$ —右边曲线方程系数; $coeff_m^1$ —上边曲线方程系数; $coeff_m^2$ —左边曲线方程系数; $coeff_m^3$ —下边曲线方程系数。

本研究通过此算法,可确定所有像素点对应的网格。对于亚像素点,若其坐标在网格区域内,则很容易确定它所对应的网格;若其坐标刚好在网格光条纹上,则很难界定它所对应的网格。因此,在实际计算中,本研究先将其坐标进行四舍五入取整运算后,再通过上述算法查找其所对应的网格,当找到所对应的网格开始计算其世界坐标时,仍用亚像素坐标参与计算。

3 实验结果及讨论

实验采用微视 SP-MVC3000 摄像头(1/2 吋逐行扫描彩色摄像机,CCD 尺寸:2 048(h) × 1 536(v),3.2 μm × 3.2 μm 像元),数据传输采用加拿大原装 GigE 模块,匹配 Intel 原装千兆网适配器,无需采集卡。镜头采用日本 CBC 公司 COMPUTAR H6Z0812 手动变焦镜头,厂家给出的焦距标称值为 $f_0 = 12 \text{ mm}$ 。光源测采用 Sony VPL-CX63 投影仪,分辨率为 1 024 × 768。辅助相机为 Canon PowerShot S2 IS 500 万像素的数码

相机,标准网格板自制,采用 2 m × 3 m 的网格模板,其中网格尺寸为 10 mm × 10 mm,标准网格板如图 7 所示,检测用符号网格板如图 8 所示。

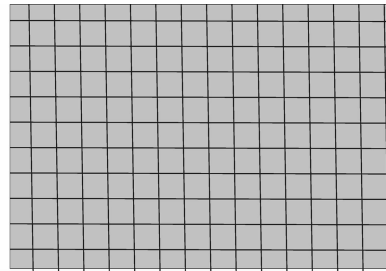


图 7 标准网格板(局部图)

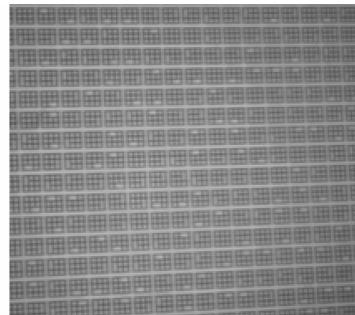


图 8 $z = 1\ 630 \text{ mm}$ 实际平面图

利用标定结果,本研究开展了检测实验,以进行误差分析。检测实验对象为垂直于 Z 轴的平面, Z 值为 1 630 mm。在检测出所有平面数据后,接下来是要从定量的角度对测量误差的大小进行分析。由于重要的是深度信息,本研究只进行 z 值的误差分析。利用 CCD 采集 1 630 mm 符号图像时,由于不能抓拍到所有符号模式,并且符号存在无法识别的情况,在 16 行(本研究中只列出第 16 行的比较图)只有 34 个符号,共 487 个测量点,如图 9 所示。

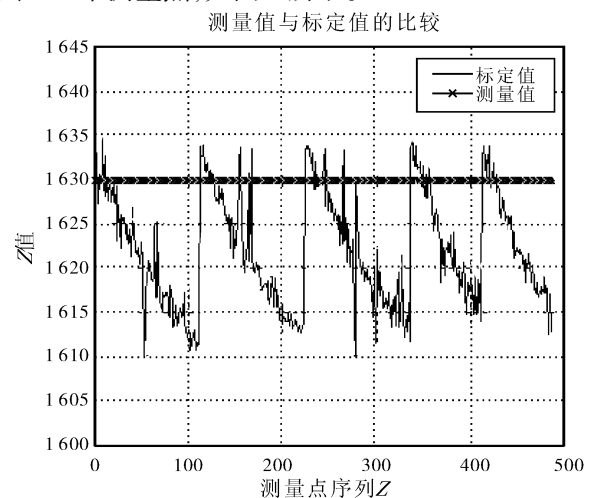


图 9 $z = 1\ 630 \text{ mm}$ 平面测量值与标定值比较

好的编程界面。经实验表明,与传统的基于文本编程相比,该平台易于使用,几乎所有的编程工作都只用鼠标完成;构建程序更快速、更容易,所见即所得;易于维护,组件及它们间的连线可以任意添加、删除和修改,而不用修改源程序代码。

参考文献 (References):

- [1] National Instruments. LabVIEW[EB/OL]. [2008-12-01]. <http://en.wikipedia.org/wiki/labVIEW>.
- [2] WHELAN P F, SADLEIR R J T. A visual programming environment for machine vision engineers[J]. **Sensor Review**, 2004, 24(3):265-270.
- [3] SMITH B J. Conceptual graphs as a visual programming language for teaching programming[C]// Visual Languages and Human-Centric Computing (VL/HCC), 2009. Corvallis: [s. n.], 2009:258-259.
- [4] TU Pin-ying, CHEN W K, CHENG Y C. A Visual Programming Language for Data Transformation[C]. International

Symposium on Computer Science and its Applications, 2008; Australia: [s. n.], 2008.

- [5] 韩秀清,曾晓勤,邹阳,等. 图文法综述[J]. 计算机科学, 2008, 35(8):10-16.
- [6] 徐小良,汪乐宇,周泓. VPP 虚拟仪器元件库的实现框架[J]. 工程设计学报, 2003, 10(2): 75-79.
- [7] 周泓,汪乐宇,陈祥献. 虚拟仪器系统软件结构的设计[J]. 计算机自动测量与控制, 2000, 8(1): 21-24.
- [8] 方林,谢立. 关系图文法及其应用[J]. 软件学报, 1997, 8(2): 87-92.
- [9] 王瑞荣,汪乐宇. 事件并发数据流模型[J]. 软件学报, 2002, 14(3): 409-414.
- [10] 耿晨歌. 面向虚拟仪器系统的可视化编程研究[D]. 杭州:浙江大学仪器系, 1999.
- [11] 王瑞荣. 基于事件触发并发数据流模型的可视化编程语言研究[D]. 杭州:浙江大学仪器系, 2003.

[编辑:李辉]

(上接第 964 页)

经相关计算可得到 z 值的测量均值、均值误差、绝对误差均值、误差标准方差,如表 2 所示^[11]。

表 2 误差分析比较表(单位:mm)

z 值	本研究数据
标准平面值	1 630
测量值均值	1 618.83
绝对误差均值	13.51
误差标准方差	7.15

通过表 2 中的对比数据得出,本研究中以 1 630 mm 作为检测对象,可以看出本研究中的 z 测量值均值为 1 618.83 mm,绝对误差为 13.51 mm,相对误差为 0.83%。在保证标定速度的同时达到了较高的标定精度,达到了预期的目标。

4 结束语

感知二步插值标定方法让计算机具备感知 CCD 光轴与标定平面法线间的偏差能力,本研究通过实验证明了该方法的有效性。在标定过程中该方法不必对摄像机的内外参数和系统结构参数进行标定,而是通过摄取标定板上的已知相对关系点的图像,建立成像面上的角点坐标与世界坐标之间的对应关系,然后根据已知角点插值得到平面上任一点世界坐标来完成系统标定,从而提高了标定速度与标定精度。

参考文献 (References):

- [1] 邱茂林,马颂德,李毅. 计算机视觉中摄像机标定综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1):43-55.
- [2] 韦争亮,钟约先,袁朝龙,等. 单摄像机单投影仪三维测量系统标定技术[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2009, 49(2):202-205.
- [3] 李宏伟. 结构光三维视觉检测关键技术研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工程大学自动化学院, 2006.
- [4] CAI Ji-hua, LIANG Cheng-song. Mathematical model for the system calibration of digital camera[J]. **Mathematics In Practice And Theory**, 2009:40(14):52-59.
- [5] 任延俊,郭霏,姜淑华,等. 基于径向约束的 CCD 相机标定参数的整体优化[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2009, 32(2):13-17.
- [6] 陈工. 基于单目视觉的自主移动机器人检测系统[J]. 机电产品开发与创新, 2007, 20(1):4-6.
- [7] 郝丽俊,程胜. 基于结构光亚像素提取的三维重建[J]. 中国医疗器械杂志, 2009, 33(5):336-338.
- [8] 杜艳可,郝飞龙,段龙江. 系统标定的一种新方法[J]. 机械工程学院学报, 2009, 21(6):75-78.
- [9] 刘超,高井祥,杨化超. 基于平面控制格网的相机标定算法研究[J]. 测量科学, 2009, 134(14):50-52.
- [10] 徐士良. 数值分析与算法[M]. 北京:机械工业出版社, 2007:188-200.
- [11] 张振祥,陈永清. 基于线阵 CCD 的轴承外圈表面缺陷检测[J]. 轻工机械, 2010, 28(4):70-72.

[编辑:张翔]