

二维目标视觉测量的双平行平面标定

刘 昶

(沈阳理工大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要 针对平面目标的单目视觉测量问题,研究了基于双平面模型的相机标定的方法,该方法以多项式形式表达标定板平面坐标和图像坐标的对应关系,多项式系数隐式包含了相机参数和畸变系数,并通过最小二乘法进行估计。研究了利用多项式表达两平面对应关系时可能造成的暗区问题,提出利用图像坐标平移解决该方法的问题。考虑到标定板的厚度,将标定板分别放置在两个与被测平面平行、高度不同的位置,并标定出两个标定板平面与像平面间的关系,在已知被测平面与两个标定平面间距离的条件下,利用透视投影原理计算被测目标的实际尺寸。实验结果验证了该方法的有效性。

关键词 测量;计算机视觉;相机标定;双平面相机模型;畸变校正;最小二乘估计

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1115004

Two Parallel Planes Calibration for Two-Dimensional Object Vision Measurement

Liu Chang

(School of Information Science and Engineering, Shenyang Ligong University,
Shenyang, Liaoning 110159, China)

Abstract A camera calibration method based on two calibration planes model is studied for the monocular vision measurement of planar object. It uses polynomials to describe the correspondence between the measurement plane coordinates and the image coordinates. The polynomial coefficients, which can be estimated by least square method, implicitly include the camera parameters and distortion parameters. A dark area problem caused by polynomial expression of the correspondence between the two planes is studied. An image coordinates translation method is proposed to solve the problem. Considering the calibration board's thickness, the board is put on two locations which are parallel to the measurement plane with different heights, and the relationship between the two calibration planes and the image plane is calibrated respectively. Given the perpendicular distances among the measurement plane and the two calibration planes, the real object size can be computed from perspective projection principle. The experimental results verify the effectiveness of the method.

Key words measurement; computer vision; camera calibration; two calibration planes camera model; distortion correction; least square estimation

OCIS codes 150.1135; 150.1488; 150.3045

1 引 言

在应用计算机视觉技术进行目标尺寸测量时,一般需要对相机进行标定,由于相机成像时都存在一定程度的畸变,当对测量精度要求较高时,必须要考虑畸变的影响。目前比较成熟的相机标定方法主要有 Tsai^[1]的两步法、Zhang^[2]的基于平面的标定方法及相应的改进算法等,这些算法一般都是针对

三维目标视觉测量问题的,能够较精确地标定出相机的内、外参数及畸变参数。虽然文献[3]证明了只要利用具有特殊位置关系的 5 个控制点的一幅图像就可实现相机的畸变参数和内外参数标定,但为了满足对参数精度的要求,一般的方法都需要反复移动标定板或靶标^[2,4],或借助三坐标测量机等高精度测量设备进行靶标定位^[5],再通过多幅图像的特

收稿日期: 2013-05-03; 收到修改稿日期: 2013-06-21

基金项目: 辽宁省教育厅科研项目(L2012062)

作者简介: 刘 昶(1971—),男,博士,副教授,主要从事计算机视觉方面的研究。E-mail: syliuch@126.com

征点对应关系计算得到所需参数,标定过程相对比较复杂。针对某些工业现场条件受限制的情况,特别是在需要根据现场实际情况进行相机安装、镜头调整,标定过程也必须在现场进行的情况,此类标定方法在具体实施上存在一定困难。

为简化现场标定的工作量,文献[6]建立了畸变分离的相机模型,提出将畸变参数独立出来,提前标定的方法。文献[7]对文献[6]的方法进行了改进,通过拉凡格氏法(LM)非线性优化方法标定出畸变系数以及主点坐标,然后对实际像点进行畸变校正,再根据内参数基本约束方程完成余下的相机参数的标定。

对于二维平面目标的视觉测量问题,相机标定重点在于描述测量平面与图像坐标的对应关系,特别是畸变的校正。对于平面目标的畸变校正,文献[8]提出一种利用畸变条件下平面世界坐标与图像坐标的多项式对应关系进行畸变校正的方法,但该多项式描述只有在像平面与测量平面近似平行的条件下才有效,若不平行将出现较大的模型误差,在实际应用中调整像平面与测量平面平行增加了现场标定的复杂度。文献[9]通过图像差分建立畸变场微分方程,提出了相机光学成像系统畸变场微分方程参数的理论计算方法。文献[10]提出一种直接利用标准网格板作为测量基准、使用发生畸变的网格板图像作为校正基准来代替通过建模将外部标准转换为相机内部基准的畸变校正方法。文献[11]针对大视场的相机标定问题,提出一种利用小尺寸标定板进行大视场相机标定的方法,利用坐标的差分进行计算,但要求每次放置标定板时必须尽可能保持平行,给实际应用增加了难度。

文献[12]提出一种双平面相机模型,与传统的针孔相机模型不同,该模型通过建立图像坐标与用两个已统一坐标系的平面的对应关系进行相机标定,并应用于三维重建等问题。文献[13]利用这种

双平面相机模型和双目立体视觉技术,进行空间曲面测量。

本文受文献[12]双平面相机模型的启发,建立了物点坐标与对应点图像坐标间的多项式描述,采用最小二乘法估计多项式参数,从减少现场标定工作量的角度出发,利用两个与测量平面平行的标定平面进行相机标定和平面目标尺寸测量,研究了利用双平面相机模型标定时可能出现的暗区问题,并提出了相应的解决方案。

2 针对平面测量的相机标定

2.1 相机的畸变模型

相机的畸变一般包括径向畸变、切向畸变和薄透镜畸变三种。设图像坐标系为 UOV ,某物点按无畸变透视投影的图像坐标记为 (\hat{u}, \hat{v}) ,受畸变影响的实际图像坐标记为 (u, v) 。另记相机主点坐标为 (u_0, v_0) ,两个方向的像素距分别为 d_u 和 d_v 。若只考虑一阶径向畸变,则两个方向上的径向畸变可近似表示为

$$\begin{cases} \delta_{ur} = (\hat{u} - u_0)d_u \{k_1 [(\hat{u} - u_0)^2 d_u^2 + (\hat{v} - v_0)^2 d_v^2]\} \\ \delta_{vr} = (\hat{v} - v_0)d_v \{k_1 [(\hat{u} - u_0)^2 d_u^2 + (\hat{v} - v_0)^2 d_v^2]\} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 k_1 表示一阶径向畸变系数,但(1)式中的 (\hat{u}, \hat{v}) 坐标值未知。考虑到像素点距离主点较近时径向畸变也比较小,而像素点距离主点较远时 $\hat{u} - u_0$ 与 $u - u_0$ 、 $\hat{v} - v_0$ 与 $v - v_0$ 的值的相对差距也较小,因此(1)式也可近似表示为^[14]

$$\begin{cases} \delta_{ur} = (u - u_0)d_u \{k_1 [(u - u_0)^2 d_u^2 + (v - v_0)^2 d_v^2]\} \\ \delta_{vr} = (v - v_0)d_v \{k_1 [(u - u_0)^2 d_u^2 + (v - v_0)^2 d_v^2]\} \end{cases}. \quad (2)$$

出于同样的原因,两个方向上的切向畸变可近似表示为

$$\begin{cases} \delta_{ut} = p_1 [3(u - u_0)^2 d_u^2 + (v - v_0)^2 d_v^2] + 2p_2 (u - u_0)d_u (v - v_0)d_v \\ \delta_{vt} = 2p_1 (u - u_0)d_u (v - v_0)d_v + p_2 [(u - u_0)^2 d_u^2 + 3(v - v_0)^2 d_v^2] \end{cases}, \quad (3)$$

式中 p_1 、 p_2 表示切向畸变系数。两个方向的薄透镜畸变可近似表示为

$$\begin{cases} \delta_{up} = s_1 [(u - u_0)^2 d_u^2 + (v - v_0)^2 d_v^2] \\ \delta_{vp} = s_2 [(u - u_0)^2 d_u^2 + (v - v_0)^2 d_v^2] \end{cases}, \quad (4)$$

式中 s_1 、 s_2 表示薄透镜畸变系数。

综合(2)~(4)式,物点在图像上的无畸变对应

点坐标 (\hat{u}, \hat{v}) 可表示为

$$\begin{cases} \hat{u} = u + \delta_{ur} + \delta_{ut} + \delta_{up} = \sum_{0 \leq i+j \leq 3} a_{i,j} u^i v^j \\ \hat{v} = v + \delta_{vr} + \delta_{vt} + \delta_{vp} = \sum_{0 \leq i+j \leq 3} b_{i,j} u^i v^j \end{cases}, \quad (5)$$

式中多项式系数 $a_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 隐式包括了相机的内参数

和三种畸变参数。(5)式以多项式的形式表达了图像上无畸变投影点与实际投影点间的对应关系。

2.2 测量平面与像平面的对应

相机采用针孔模型时,在测量平面上建立世界坐标系 $X_wO_wY_w$,记物点坐标为 (x, y) 的点与 UOV 坐标系下点 (\hat{u}, \hat{v}) 构成透视投影点对,它们之间的对应关系可用射影变换描述为

$$t \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

可得

$$\begin{cases} h_1\hat{u} + h_2\hat{v} + h_3 - h_7x\hat{u} - h_8x\hat{v} = x \\ h_4\hat{u} + h_5\hat{v} + h_6 - h_7y\hat{u} - h_8y\hat{v} = y \end{cases}. \quad (7)$$

将(5)式代入(7)式,整理后可得

$$\begin{cases} \sum_{0 \leq i+j \leq 3} c_{i,j}u^i v^j + \sum_{0 < i+j \leq 3} e_{i,j}xu^i v^j = x \\ \sum_{0 \leq i+j \leq 3} d_{i,j}u^i v^j + \sum_{0 < i+j \leq 3} e_{i,j}yu^i v^j = y \end{cases}, \quad (8)$$

式中参数 $c_{i,j}, d_{i,j}$ ($0 \leq i+j \leq 3$) 和 $e_{i,j}$ ($0 < i+j \leq 3$) 共 29 个,可通过 $a_{i,j}, b_{i,j}$ 及 h_1, h_2, \dots, h_8 表达(在此省略具体表达式),其隐式包含了相机的内外参数及畸变参数。(8)式建立了测量平面上的物点坐标 (x, y) 与畸变后图像对应点坐标 (u, v) 间的对应关系约束方程。值得一提的是,该约束方程在形式上与图像坐标系中原点的位置无关,若图像坐标进行了平移,约束方程中的参数值可能改变,但这种多项式关系的形式不变。

(8)式也可写成

$$\begin{cases} x = \frac{\sum_{0 \leq i+j \leq 3} c_{i,j}u^i v^j}{1 - \sum_{0 < i+j \leq 3} e_{i,j}u^i v^j} \\ y = \frac{\sum_{0 \leq i+j \leq 3} d_{i,j}u^i v^j}{1 - \sum_{0 < i+j \leq 3} e_{i,j}u^i v^j} \end{cases}. \quad (9)$$

(9)式说明只要获得约束方程(8)式中的 29 个参数,就可利用图像坐标计算得到对应点在测量平面坐标系的坐标,进而完成对平面物体的测量。

对于二维平面目标测量问题,相机的标定可看作是对约束方程(8)式中的 29 个参数进行参数估计的问题。在测量平面上布置 n 个控制点,它们在 $X_wO_wY_w$ 坐标系下的坐标分别记为 $(x_k, y_k), k = 1, 2, \dots, n$,相机拍摄测量平面的一幅图像,特征提取后上述控制点的对应图像坐标记为 (u_k, v_k) 。由约束方程(8)式,由于存在误差,有

$$\begin{cases} \sum_{0 \leq i+j \leq 3} c_{i,j}u_k^i v_k^j + \sum_{0 < i+j \leq 3} e_{i,j}x_k u_k^i v_k^j = x_k + \varepsilon_k \\ \sum_{0 \leq i+j \leq 3} d_{i,j}u_k^i v_k^j + \sum_{0 < i+j \leq 3} e_{i,j}y_k u_k^i v_k^j = y_k + \delta_k \end{cases}, \quad (10)$$

式中 ε_k 和 δ_k 为约束方程的偏差。(10)式提供了关于这 29 个参数的 $2n$ 个线性约束,取目标函数为

$$\min \{ J = \sum_{k=1}^n (\varepsilon_k^2 + \delta_k^2) \}, \quad (11)$$

且不考虑 $c_{i,j}, d_{i,j}$ 和 $e_{i,j}$ 诸参数间隐式存在的约束关系,应用最小二乘法可获得这 29 个参数的估计值。

2.3 “暗区”现象

记按 2.2 节方法获得的参数估计结果为 $\tilde{c}_{i,j}, \tilde{d}_{i,j}$ 和 $\tilde{e}_{i,j}$,若将图像点 (u, v) 和其对应点世界坐标 (x, y) 代入约束方程,有

$$\begin{cases} \sum_{0 \leq i+j \leq 3} \tilde{c}_{i,j}u^i v^j + \sum_{0 < i+j \leq 3} \tilde{e}_{i,j}xu^i v^j = x + \tilde{\varepsilon}(u, v) \\ \sum_{0 \leq i+j \leq 3} \tilde{d}_{i,j}u^i v^j + \sum_{0 < i+j \leq 3} \tilde{e}_{i,j}yu^i v^j = y + \tilde{\delta}(u, v) \end{cases}, \quad (12)$$

式中 $\tilde{\varepsilon}(u, v)$ 和 $\tilde{\delta}(u, v)$ 分别表示 (u, v) 点对应的以 $\tilde{c}_{i,j}, \tilde{d}_{i,j}$ 和 $\tilde{e}_{i,j}$ 为参数的两个约束方程的偏差,它们是由于参数估计不准确造成的。

记与此组参数对应的(9)式中分母的倒数为

$$g(u, v) = \frac{1}{1 - \sum_{0 < i+j \leq 3} \tilde{e}_{i,j}u^i v^j}. \quad (13)$$

应用(9)式对世界坐标 (x, y) 进行恢复的结果 (\tilde{x}, \tilde{y}) 为

$$\begin{cases} \tilde{x} = g(u, v) \cdot \sum_{0 \leq i+j \leq 3} \tilde{c}_{i,j}u^i v^j \\ \tilde{y} = g(u, v) \cdot \sum_{0 \leq i+j \leq 3} \tilde{d}_{i,j}u^i v^j \end{cases}. \quad (14)$$

则由(12)式可得其与真实值的偏差为

$$\begin{cases} \tilde{x} - x = g(u, v) \cdot \tilde{\varepsilon}(u, v) \\ \tilde{y} - y = g(u, v) \cdot \tilde{\delta}(u, v) \end{cases}. \quad (15)$$

若 $|g(u, v)| < 1$,此偏差将小于对应的约束方程的偏差,反之若 $|g(u, v)| \geq 1$,约束方程的偏差将被放大, $|g(u, v)|$ 的值越大,估计值 (\tilde{x}, \tilde{y}) 越不可靠。

这里将参数估计后,造成 $|g(u, v)| > 1$ 的图像区域称为暗区,称暗区内图像点 (u, v) 对应的 $|g(u, v)|$ 的值(简记为 g) 为该点的世界坐标恢复的暗度。若特征成像在暗区,特别是暗度较高的位置,容易导致对该特征的世界坐标恢复不可靠。在应用所提方法进行相机标定时,在暗度较高的区域不能采用前述的方法简单地进行世界坐标恢复,在

不增加太多工作量的前提下,应尽量采取措施减小暗区范围,或减小暗区内的暗度。

2.4 暗区控制的图像坐标平移法

为对暗度较高的区域内的图像点进行世界坐标恢复,可采用图像坐标平移法进行暗区控制,降低对应点暗度后再应用 2.2 节的方法进行世界坐标恢复,首先给出如下定理。

定理 1: 若将图像坐标系原点平移到 (Δ_U, Δ_V) , 则对于任意事先给定的正数 $\lambda (\lambda > 1)$, 在原图像坐标 (Δ_U, Δ_V) (新坐标系原点) 附近存在一个区域 Ω , 使 $\forall (u, v) \in \Omega, |g(u, v)| < \lambda$ 。

证明: 当图像坐标系原点平移到 (Δ_U, Δ_V) 后, 图像点 (Δ_U, Δ_V) 在新坐标系下的坐标为 $(0, 0)$, 在新坐标系下建立图像点与世界坐标系的多项式约束关系, 由(13)式知此时 $g(0, 0) = 1$, 再由 $g(u, v)$ 函数的连续性可得结论。证毕。

定理 1 说明, 在图像坐标平移后的原点附近, 一定存在一个区域, 该区域内的所有像素点所对应的暗度不会特别大, 也就是说在该区域内图像点对应的物点进行世界坐标估计时, 误差不会被放大特别多。因此, 若标定图像出现暗区且暗区内暗度较高, 可采用图像分块和坐标平移的方法解决, 具体方法为: 将原始图像分成 M 个区域, 在每个区域内分别建立图像坐标系, 其原点为该区域中心, 再按 2.2 节中的方法为每个区域建立图像坐标与世界坐标的多项式对应关系, 在对物点的世界坐标进行恢复时, 根据物点的像所在的图像区域选择相应的多项式进行计算。

这种图像分块和坐标平移法, 在进行两种坐标对应时, 多项式数量由一个增加到 M 个, 但这些多项式系数的计算仍然是利用同一幅标定图像, 并没有增加标定过程的诸如摆放标定板、图像获取等现场工作量, 只是在一定程度上增加了后期数据处理的工作量。

3 相机的双平行平面标定

实际应用中在测量平面上直接布置控制点可能存在困难, 一种可行的做法是在测量平面上放置一块厚度均匀的标定板(如棋盘格标定板), 考虑到标定板存在一定厚度, 标定板平面上的特征实际不在测量平面上, 对此可采用如下双平行平面法进行标定。

将标定板分别放置在与测量平面平行的两个位置上, 如图 1 所示, 在两个标定平面上分别建立世界坐标系 $X_W^{(1)} O_W^{(1)} Y_W^{(1)}$ 和 $X_W^{(2)} O_W^{(2)} Y_W^{(2)}$, 并进行两次

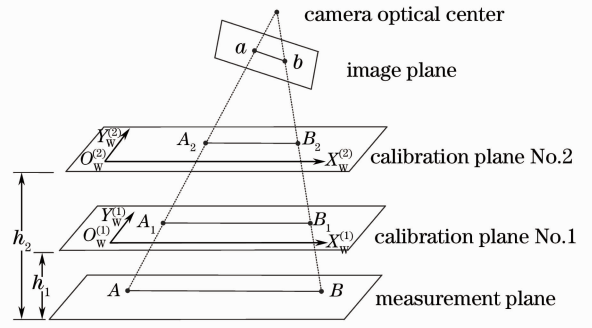


图 1 双平行平面标定示意图

Fig. 1 Illustration of two parallel planes calibration
 前述标定过程, 分别获得两个标定平面上的世界坐标与图像坐标的对应关系。记测量平面上两点 A 、 B 在像平面和两个标定平面上的上的透视投影点分别为 a 、 A_1 、 A_2 和 b 、 B_1 、 B_2 , 利用 a 、 b 两点在畸变图像中的坐标和标定结果可分别得到 A_1 、 B_1 和 A_2 、 B_2 分别在 $X_W^{(1)} O_W^{(1)} Y_W^{(1)}$ 和 $X_W^{(2)} O_W^{(2)} Y_W^{(2)}$ 坐标系下的坐标, 进而计算得到它们之间的距离 $|A_1 B_1|$ 和 $|A_2 B_2|$ 。若已知两个标定平面与测量平面之间的有向距离 h_1 和 h_2 , 由于三个平面平行, 利用透视投影原理得到 A 、 B 两点间的距离为

$$|AB| = \frac{h_2 |A_1 B_1| - h_1 |A_2 B_2|}{h_2 - h_1} \quad (16)$$

双平行平面标定法是针对平面目标尺寸测量问题的一种相机标定方法, 该方法只要求将标定板放置在与测量平面平行的两个位置, 并测量出两个标定平面与测量平面之间的距离, 就可实现目标的尺寸测量, 这在实际应用中比较容易实现。从标定过程看, 并不要求像平面与测量平面平行, 对相机安装要求较低, 且每个标定平面的标定过程只利用标定板的一幅图像, 现场工作量比较小。这里的标定原理与文献[12]中的双平面相机模型有相似之处, 但对于一般的双平面模型, 虽然不要求两个平面平行, 但要求两个平面必须建立统一的世界坐标系, 而这里针对平面目标测量问题, 由于平面上的距离测量与世界坐标系的旋转和平移无关, 并不要求在两个标定平面上统一世界坐标系, 因此所提方法只要求标定板的两个位置平行即可, 对两个坐标系的旋转和平移不作要求, 现场工作量比较少。

4 实验结果及分析

4.1 暗区控制效果实验

为验证所提的标定方法对平面目标尺寸测量的有效性及图像坐标平移法对暗区控制的有效性, 进

行如下实验。

采用 Basler piA640-210gm 相机, 配 Avenir 6 mm 镜头, 拍摄了一幅棋盘格高精度标定板图像, 如图 2(a) 所示, 图像为 8 bit 灰度图像, 图像尺寸为 640 pixel \times 480 pixel, 该标定板有 144 个角点(12 行 \times 12 列), 相邻角点间横纵两方向距离均为 10 mm, 该幅图像用于对相机标定, 世界坐标系方向依照标定板上角点分布方向设定, 原点位于左下角角点处。图 2(b)~(f) 是按参数估计结果计算出的暗区图像, 反映了暗区的分布情况, 图中的圆圈表示对相应特征点进行世界坐标恢复时误差的大小, 圆圈的半径越大, 表示误差越大。图 2(b) 是图像坐标原点选在左上角时暗区的分布情况, 从误差分布结果看, 误

差较大的点基本都出现在暗度较高的区域内; 图 2(c) 是没有对图像进行分块处理, 只将图像坐标原点平移到图像中心后的暗区分布, 从结果看, 暗区面积有所减小, 但仍然存在暗度较大的区域; 图 2(d) 是将图像分成 $M=4$ 个相等的矩形区域, 采用图像坐标平移法分别标定后得到的暗区分布图, 从结果看, 暗区面积进一步减小, 并且暗度均不大于 5; 图 2(e) 是将图像分成 $M=16$ 个相等的矩形区域, 采用图像坐标平移法标定后得到的暗区分布图, 从结果看, 暗区面积没有明显的减小, 但暗度均不大于 2; 图 2(f) 是将图像分成 $M=64$ 个相等的矩形区域, 采用图像坐标平移法分别标定后得到的暗区分布图, 从结果看, 暗区和暗度均没有明显的进一步减小。

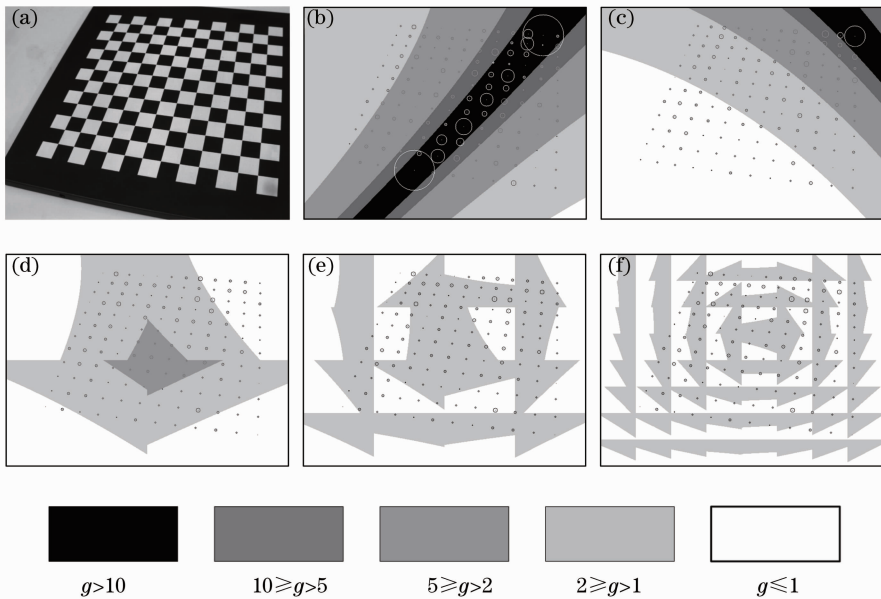


图 2 暗区随图像分块和坐标平移的变化。(a) 标定板图像; (b) 暗区分布(无平移); (c) 暗区分布($M=1$); (d) 暗区分布($M=4$); (e) 暗区分布($M=16$); (f) 暗区分布($M=64$)

Fig. 2 Dark area comparison using image partition and coordinates translation method. (a) Calibration board image; (b) dark area (no translation); (c) dark area ($M=1$); (d) dark area ($M=4$); (e) dark area ($M=16$); (f) dark area ($M=64$)

采用以上几种方法, 反向求出各角点的世界坐标, 并与真值进行对比, 结果如表 1 所示。

表 1 误差对比结果

Table 1 Error comparison results

Method	Mean error /mm	Maximum error /mm
No translation	0.0465	0.4702
$M=1$	0.0330	0.2420
$M=4$	0.0292	0.0639
$M=16$	0.0295	0.0602
$M=64$	0.0295	0.0617

从实验结果看, 对图像进行适当的区域划分并应用图像坐标平移法, 确实能提高估计精度, 若将全

图的暗度控制在 2.0 以下, 已经能达到较好的结果, 过多地进行区域划分实际意义并不大。

4.2 双平行平面标定和测量实验

为验证双平行平面标定的测量效果, 进行如下实验。

本实验所用相机和标定板同 4.1 节实验, 将标定板先放置在桌面上拍摄一幅图像, 再将其分别用铝板垫高 10 mm 和 20 mm, 保证标定板平面与桌面近似平行, 各拍摄一幅图像, 三幅图像如图 3(a)~(c) 所示, 在移动标定板的过程中, 保持相机与桌面的相对位置不变。以图 3(a) 的标定板平面作为测

量平面,图 3(b)和(c)两幅图像作为标定图像。采用类似 4.1 节实验的过程进行两次相机标定,均取 $M=16$;再利用从图 3(a)图像中提取出的角点坐标估计每个角点与其右侧和上方相邻角点间的距离(最右一列和最上一行除外);最后利用(15)式计算测量平面上的角点间距离。该标定板角点分布为 12

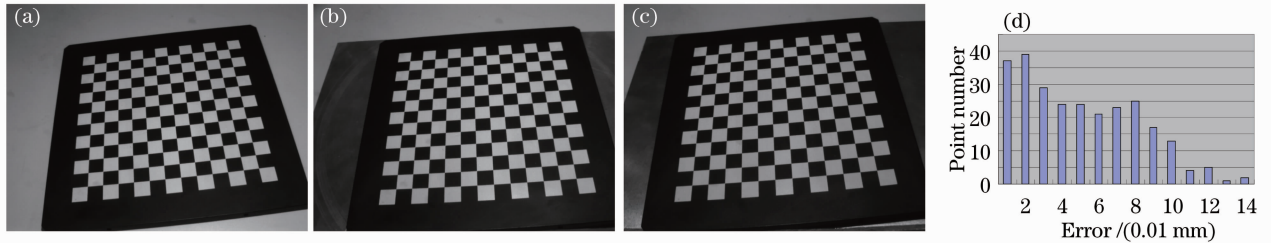


图 3 二维目标测量实验结果。(a)测量平面图像;(b)标定平面 1 图像;(c)标定平面 2 图像;(d)测量误差分布($M=16$)

Fig. 3 Two-dimensional object measurement experimental results. (a) Measurement plane image; (b) calibration plane No. 1; (c) calibration plane No. 2; (d) measurement error ($M=16$)

世界坐标恢复和距离计算的误差除依赖于标定精度外,还与图像拍摄质量、角点提取算法的准确度有很大关系。在以上两个实验中,角点提取均采用 OpenCV 中的棋盘格角点提取算法,实验中并没有利用标定板上角点的平行、垂直分布的特性进行世界坐标校正,实验结果能反映出所提方法在基于点特征的距离测量中的实际效果。

5 结 论

本文利用平面世界坐标系中的物点坐标和带畸变的图像对应点坐标间存在的多项式对应关系,应用最小二乘原理对多项式的系数进行估计,从而完成了相机的标定并用于平面目标测量。该标定方法不要求像平面与测量平面平行,过程简单,现场工作量大,比较适合工业现场条件比较苛刻的场合。在测量平面不易布置控制点的情况下,提出应用双平行平面标定的方法,该方法只需将标定板安放在与测量平面平行的两个位置,测量获得三个平面间的距离后,利用拍摄到的两幅标定板图像进行相机标定,实现对测量平面上的目标的测量。研究了可能出现的暗区问题,并提出应用图像分块和坐标平移解决该方法的问题,实验证明该方法在不增加现场工作量的情况下能达到较高的测量精度。虽然提出的标定方法中多项式参数较多,存在“过参数化”倾向,但确实起到了在保证较高测量精度的前提下极大地简化标定过程现场工作量的作用,对工业应用中的平面目标单目视觉测量具有一定的指导意义。

行、12 列,因此可计算得到共 264 组距离数据,距离的准确值为 10 mm,计算出的最大误差为 0.138 mm,平均误差为 0.045 mm,计算值与准确值的误差分布情况如图 3(d)所示,其中误差在 0.05 mm 以内的数量占总数的 58%,误差在 0.1 mm 以内的占 95%。

参 考 文 献

- 1 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 J Robotics Automation, 1987, 3 (4): 323-344.
- 2 Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 3 Xue Junpeng, Su Xianyu. Camera calibration with single image based on two orthogonal one-dimensional objects [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0115001.
薛俊鹏, 苏显渝. 基于两个正交一维物体的单幅图像相机标定 [J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0115001.
- 4 Liu Zhen, Shang Yanna. Novel calibration method for stereo vision sensor using flexible target [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0315001.
刘震, 尚砚娜. 立体视觉传感器的一种灵活靶标新标定方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0315001.
- 5 Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan, et al.. Camera calibration technique of wide-area vision measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0915001.
杨博文, 张丽艳, 叶南, 等. 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.
- 6 Zhou Fuqiang, Cai Feihua. Camera calibration method based on non-metric distortion correction [J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 228-232.
周富强, 蔡斐华. 基于非量测畸变校正的摄像机标定方法 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 228-232.
- 7 Chen Tianfei, Ma Zi, Li Peng, et al.. A camera calibration method based on non-metric distortion correction [J]. Control and Decision, 2012, 21(2): 243-251.
陈天飞, 马孜, 李鹏, 等. 一种基于非量测畸变校正的摄像机标定方法 [J]. 控制与决策, 2012, 21(2): 243-251.
- 8 Liao Shizhong, Gao Peihuan, Su Yi, et al.. A geometric rectification method for lens camera [J]. J Image and Graphics, 2000, 5(7): 593-596.
廖士中, 高培焕, 苏艺, 等. 一种光学镜头摄像机图像几何畸变的修正方法 [J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(7): 593-596.
- 9 Wang Fuzhi, Huang Dagui. Accurate distortion correction study based on differential images [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2010, 31(2): 377-382.

- 王富治, 黄大贵. 基于图像差分的精密畸变校正研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 377-382.
- 10 Su Chengzhi, Wang Enguo, Hao Jiangtao, *et al.*. Distortion correction for images in planar metrology [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 161-167.
- 苏成志, 王恩国, 郝江涛, 等. 平面几何测量中的图像畸变校正[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 161-167.
- 11 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.
- 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.
- 12 Wei Guoqing, Ma Songde. Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments [J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(5): 469-480.
- 13 Liu Peng, Liu Weijun. Research on 3D measurement of free form surface based on computer vision technique [J]. Computer Engineering, 2005, 31(4): 58-61.
- 刘 鹏, 刘伟军. 基于计算机视觉的自由曲面三维测量技术研究[J]. 计算机工程, 2005, 31(4): 58-61.
- 14 J Weng, P Cohenn, M Herniod. Calibration of stereo cameras using a non-linear distortion model [C]. Atlantic: Proc 10th Int Conf on Pattern Recognition, 1990. 246-253.

栏目编辑: 何卓铭