

文章编号 1004-924X(2010)10-2244-10

用于三维变形测量的数字图像相关系统

唐正宗, 梁 晋, 肖振中, 郭 成

(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:针对材料力学实验中的三维变形测量,提出并实现了一种基于双目立体视觉、摄影测量术和数字图像相关法的便携式三维变形测量系统。研究了该系统涉及的双目摄像机标定,图像相关算法,三维重建,以及三维位移、应变计算等关键技术。提出了一种基于摄影测量术的摄像机标定算法,该算法采用 10 参数镜头畸变模型,不需要高精度标定板即可实现摄像机的高精度标定。利用最小二乘非线性优化算法实现了数字图像的高精度匹配,针对非线性优化初值难求的问题,提出了一种基于种子点的初值计算方法,为非线性优化提供了可靠的初值。最后,介绍了三维重建以及计算三维位移、三维应变的方法。实验结果表明,标定结果的重投影误差为 0.03 pixel,图像匹配的误差约为 0.02 pixel,静态外形及位移的测量精度为 0.05%,应变的测量精度优于 0.5%。与传统的测量方法相比,本文提出的系统可以更准确、全面、直观地实现对位移场、应变场的测量。

关键词:三维变形测量;立体视觉;数字图像相关;摄像机标定;摄影测量;种子点;

中图分类号:TP391;TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101810.2244

Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement

TANG Zheng-zong, LIANG Jin, XIAO Zhen-zhong, GUO Cheng

(Mechatronics & Information Research Institute of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the problem of the three-dimensional deformation measurement in mechanics experiments, a new deformation measurement system based on stereo vision, photogrammetry and a digital image correlation method is proposed and implemented. The key technologies applied in the system are studied, including binocular camera calibration, image correlation algorithms, three-dimensional reconstruction and the calculations of three-dimensional displacement and strain. Firstly, a new camera calibration algorithm based on the photogrammetry is proposed, in which a 10 parameter lens distortion model is adopted to achieve a reliable camera calibration result without any accurate calibration pattern. Then, the high precision image correlation is realized by using a least-square nonlinear optimization algorithm. To solve the problem in calculating initial values for the nonlinear optimization, a method based on seed points is proposed to provide a reliable initial value for the least-square nonlinear optimization. Finally, the approaches used for three-dimensional reconstruction and calculating three-dimensional displacement and strain are presented in detail. Experimental results show

收稿日期:2010-01-22;修订日期:2010-03-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50975219);江苏省科技支撑计划资助项目(No. BE2008058)

that the RMS error of the calibration result is 0.03 pixel, the accuracy of image correlation is about 0.02 pixel, and the measurement accuracies for the static profile, displacement and the strain are 0.05% and better than 0.5%, respectively. Compared with the traditional measurement method, the system can be more accurate, comprehensive and intuitive to achieve the measurement for displacement field and strain fields.

Key words: three-dimensional deformation measurement; stereo vision; digital image correlation; camera calibration; photogrammetry; seed point

1 引言

材料力学实验过程中经常需要测量材料在各种载荷下的表面变形场,但传统的应变片、引伸计等方法量程有限,而且只能测量单个方向的应变,已经不能满足测量需要。数字图像相关方法(Digital Image Correlation Method, DIC)首先由 M. A. Sutton 等人提出^[1],由于该方法具有非接触、精度高、全场测量、实验设备简单等优点,在材料力学性能测试领域得到了广泛的应用。最初,对于 DIC 的研究和应用多集中在二维变形的测量,称为二维 DIC^[2]。为了实现三维变形的测量, P. F. Luo 等^[3]在 1993 年提出了基于双摄像机的三维 DIC。从三维 DIC 的原理可以看出,该方法的关键技术有 2 个:双目摄像机的标定和数字图像相关匹配。

摄像机的标定是确定摄像机内外参数的过程,摄像机的标定精度直接影响到最终的测量结果。Luo 等^[3]利用精确移动的数字散斑图像对摄像机进行标定。Helm 等^[4]利用带网格的平板对摄像机进行标定。陈刚等^[5]提出了一种基于立体模板匹配的双目摄像机标定方法。孙军华等^[6]提出了一种用于大视场双目摄像机标定的方法。另外,机器视觉界的张正友算法^[7]也是常用的标定算法。上述算法对标定板的制造精度都有较高的要求,本文提出了一种基于摄影测量的摄像机标定方法,该方法不需要高精度的标定板,只需要将标定板上任意 2 个标志点的准确距离作为比例尺,就可以准确地标定出摄像机的内、外参数,该方法采用 10 参数的镜头畸变模型,比其它方法更有利于提高摄像机的标定精度。

数字图像相关匹配是指寻找两幅数字图像上对应点的过程。目前常用的算法是牛顿-拉斐逊算法^[8](Newton-Raphson, N-R)和最小二乘迭代

算法^[9](Iterative Least Squares Algorithm, ILS),改进的 N-R 算法等同于 ILS 算法,但后者在原理上更简单明了。两种算法都属于非线性优化问题,其收敛性都依赖于初值的选取,精度较差的初值会导致迭代次数增加,甚至不收敛或收敛错误。陈华等^[10]提出了一种基于遗传算法的数字图像相关算法,潘兵等^[11]提出了一种基于差分算法的数字图像相关算法,这些算法不需要选取初值,然而计算效率很低,很少见于实际使用。本文的方法是,首先在待匹配图像中计算一个或几个种子点,然后基于变形的连续性,利用种子点来预测其临近点相关参数,可以更准确地为 ILS 算法提供初值。

近几年,基于双目立体视觉和数字图像相关方法的三维变形测量系统在国外已经出现并广泛应用于实验力学的各个领域,如德国 GOM 公司的 ARAMIS 系统,美国 CSI 的公司的 VIC-3D 系统,这些系统的价格都非常昂贵。相比之下,国内对该方法的研究比较滞后,更没有成型的系统出现。本文结合双目立体视觉、摄影测量技术和数字图像相关技术,提出并实现了一种用于三维变形测量的数字图像相关系统,实验结果证明本文提出的系统完全满足材料力学实验的测量需求,与传统的测量方法相比具有明显的优势。

2 双目立体视觉原理

双目立体视觉的基本原理与人类双目视觉的立体感知过程类似,即从 2 个视点观察同一物体得到不同视角下的感知图像,通过计算分析不同图像中同一像点的视差来获取物体表面的三维形状信息^[12]。图 1 为双目立体视觉模型, $O_w-X_wY_wZ_w$ 为物方世界坐标系, $O_1-X_1Y_1Z_1$ 为左摄像机坐标系, $O_2-X_2Y_2Z_2$ 为右摄像机坐标系, $O-XY$ 为像平面坐标系。物方点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 在

左右摄像机中对应的像点分别为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$, 直线 O_1P_1 和直线 O_2P_2 相交于 P 点。如果已知 P_1 和 P_2 的图像坐标和摄像机的内、外参数(内参数包括摄像机的焦距, 主点坐标以及各种畸变参数, 外参数是指左右两个摄像机坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T}), 就可以利用三角测量原理^[13] 求得 P 点在物方世界坐标系下的三维坐标。

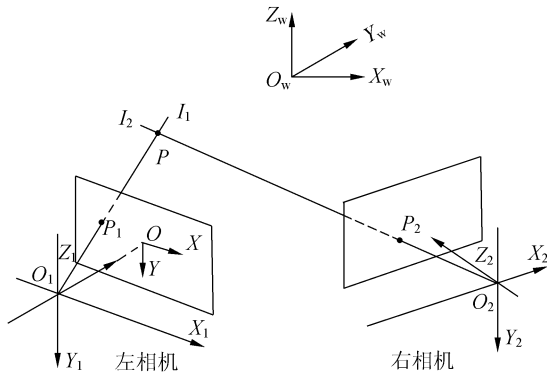


图 1 双目立体视觉模型
Fig. 1 Stereo vision model

3 摄像机标定算法

3.1 摄像机成像模型

物体点经过摄像机镜头摄影后成像到像平面上, 理想的投影成像模型是几何光学中的小孔成像模型, 在摄影测量中被表述为共线方程, 在实际情况下还需要考虑摄像机镜头的各种畸变, 则共线方程如下^[14]:

$$x - x_0 + d_x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}, \quad (1)$$

$$y - y_0 + d_y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}, \quad (2)$$

其中: (X, Y, Z) 为物方点世界坐标, (X_s, Y_s, Z_s) 为投影中心坐标, (x, y) 为图像点坐标, (x_0, y_0) 为主点坐标, f 表示焦距, (d_x, d_y) 为畸变量。

世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}.$$

3.2 镜头畸变模型

摄像机的内方位参数包括主点坐标 (x_0, y_0) , 焦距 f 以及各种镜头畸变。镜头畸变包括径向畸变, 离心畸变和薄棱镜畸变等。为了降低计算的复杂度, 多数研究者的标定算法通常只考虑二阶径向畸变, 这势必降低标定精度。本文的标定算法将所有可能的畸变都考虑在内, 所采用的畸变模型为:

$$d_x = A_1 x r^2 + A_2 x r^4 + A_3 x r^6 + B_1 (r^2 + 2x^2) + 2xyB_2 + E_1 x + E_2 y, \quad (3)$$

$$d_y = A_1 y r^2 + A_2 y r^4 + A_3 y r^6 + B_2 (r^2 + 2y^2) + 2xyB_1, \quad (4)$$

其中: A_1, A_2, A_3 为径向畸变参数, B_1, B_2 为切向畸变参数, E_1, E_2 为薄棱镜畸变参数。再加上 2 个主点坐标 (x_0, y_0) 及焦距 f 共 10 个内参数, 本文称之为 10 参数摄像机畸变模型。

3.3 基于摄影测量的摄像机标定

摄像机的标定是指确定其内、外方位参数的过程。如前所述, 传统的像机标定^[4,7,15] 通常都需要利用高精度的标定板, 通过标定块已知的三维点的坐标与对应的图像点坐标的关系来计算像机的内、外参数, 因此标定块的制作误差会导致标定精度的下降。基于摄影测量方法的摄像机标定方法不需要高精度的标定板, 只需要将标定板上任意一对标识点的准确距离作为比例尺就可以准确地计算出摄像机的内、外方位参数。

将共线方程(1)、(2)线性化后可以得到相应的误差方程^[16]:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X}_1 + \mathbf{B}\mathbf{X}_2 + \mathbf{C}\mathbf{X}_3 - \mathbf{L}, \quad (5)$$

其中: \mathbf{V} 是像点坐标残差, $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$ 分别为内方位参数、外方位参数和物方点坐标的改正数, $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 分别是它们对应的偏导数矩阵, \mathbf{L} 是观测值, 也就是图像点坐标。对于误差方程(5), 如果以图像坐标作为观测值, 把摄像机内、外方位参数和物方点坐标都当作未知数来求解, 该过程称之为光束平差。如果已知内、外方位参数求物方点坐标, 该过程称之为前方交会, 对应的误差方程简化为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{C}\mathbf{X}_3 - \mathbf{L}. \quad (6)$$

同样, 如果已知物方点坐标和内方位参数求外方位参数, 该过程称之为后方交会, 对应的误差方程简化为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{X}_2 - \mathbf{L}. \quad (7)$$

对于方程(5)、(6)、(7)均可以通过标准的最

小二乘算法来求解。基于摄影测量的摄像机标定是后方交会、前方交会、光束平差交叉进行的过程,其中后方交会、前方交会为光束平差算法提供计算初值。这个过程属于多参数非线性优化,所有的内、外方位参数和物体点三维坐标被不断地优化直到达到理想的精度。图 2 为所用的印有环形编码点和非编码点的标定板,其上标志点的距离是未知的,仅需要对角线上一对编码点的准确距离作为比例尺。标定的过程如下:

- (1) 用 2 个摄像机从 8 个不同方位拍摄标定板,距离为 360 mm 左右,共获得 16 幅图片。
- (2) 识别编码点和非编码点。首先对图像进行边缘提取,然后经过亚像素提取、椭圆拟合等步骤获得椭圆的中心,对于编码点还需要识别其编号。
- (3) 利用编码点对前 2 幅图片进行相对定向,并重建编码点三维坐标。这个时候的三维坐标与真实值存在一个比例关系,但整个模型的相对坐标是准确的。
- (4) 利用后方交会计算其余图片的外方位参数。并利用前方交会计算所有非编码点的三维坐标。在这些过程中,内方位参数均使用理论值作为已知数。
- (5) 利用光束平差迭代优化所有内、外方位参数以及标志点的三维坐标,最后加入比例尺,得到真实的三维坐标。
- (6) 利用计算得到的外方位参数计算左右摄像机坐标的旋转矩阵 R 以及平移矩阵 T 。

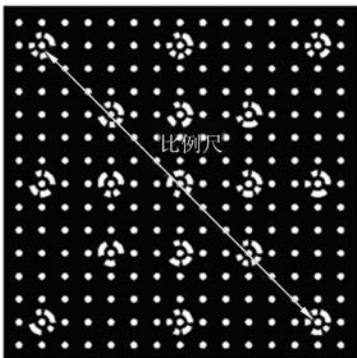


图 2 带编码点的标定板

Fig. 2 Calibration plate with coded points

4 数字图像相关方法

4.1 数字图像相关模型

数字图像相关方法是匹配两幅图像上对应点的方法。如图 3 所示,其中一幅作为参考图像,另外一幅作为待匹配图像,在参考图像中,取以待匹配点 (x, y) 为中心的 $(2M+1) \times (2M+1)$ 大小的矩形子图像,在待匹配图像中,通过一定的搜索方法,并按照某一相关函数进行相关计算,寻找与选定的子图像相关系数最大的以 (x', y') 为中心的子图像,则点 (x', y') 即为点 (x, y) 在待匹配图像中的对应点。

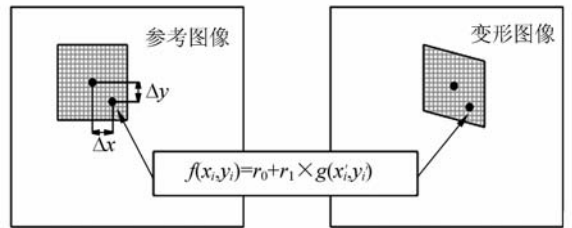


图 3 数字图像相关原理图

Fig. 3 Basic principle of digital image correlation

在进行相关匹配时,左右图像需按照某一映射函数进行计算,本文采用常用的一阶映射函数,其中包含旋转、平移、正应变和剪切应变等分量^[9]:

$$\begin{cases} x_i' = x_0 + \Delta x + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ y_i' = y_0 + \Delta y + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{cases}, \quad (8)$$

其中: u, v 分别为子图像中心点变形后的位移, $\Delta x, \Delta y$ 分别为 (x_i, y_i) 与子图像中心点在 x, y 方向上的距离。

那么点 (x_i, y_i) 的灰度值 $f(x_i, y_i)$ 与点 (x_i', y_i') 的灰度值 $g(x_i', y_i')$ 的关系可以表示为:

$$f(x_i, y_i) - e(x_i, y_i) = r_0 + r_1 \times g(x_i', y_i'), \quad (9)$$

其中: $e(x_i, y_i)$ 为噪声部分,变量 r_0, r_1 用于补偿由于光照引起的灰度差异。另外由于 (x_i', y_i') 为非整数像素,在计算过程中需要通过双三次样条插值来计算其灰度值 $g(x_i', y_i')$ 。

4.2 最小二乘迭代算法

为了求解非线性方程(9),在点 (x_i', y_i') 对其进行泰勒分解并去掉高于一阶的项,可得误差方程:

$$f(x, y) - e(x, y) = g(x', y') + g_x' du + g_x' \Delta x du_x + g_x' \Delta y du_y + g_y' dv + g_y' \Delta x dv_x + g_y' \Delta y dv_y + dr_0 + g(x', y') dr_1. \quad (10)$$

利用(10)式进行非线性迭代求解,需要给出未知数的初值,通常的办法是通过粗匹配得到 u 、 v 的初值,而其余的未知数按式(11)给出。

$$u_x = u_y = v_x = v_y = r_0 = 0, r_1 = 1. \quad (11)$$

设未知数的改正数向量为 \mathbf{x} , 偏导数矩阵为 \mathbf{A} , 观察值的向量(参考图片与待匹配图像像素值的差)为 \mathbf{l} , 假设子图像的像素数目为 n , 则对应的误差方程组为:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \mathbf{x}, \quad (12)$$

其中: $\mathbf{x}^T = [du, du_x, du_y, dv, dv_x, dv_y, dr_0, dr_1]$ 。

利用最小二乘的方法求解方程(12)可得:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}).$$

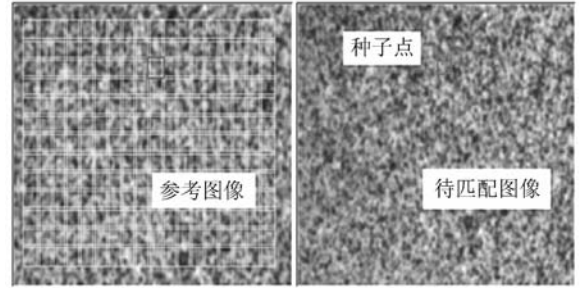
其中 \mathbf{P} 为权值,一般情况下可以令 \mathbf{P} 为单位矩阵,也即所有的观测量的权值相等。求得 \mathbf{x} 之后,对未知数进行更新,并重复上述过程,直到改正数 \mathbf{x} 小于一定的阈值。

4.3 相关参数初值的求解

如前所述,非线性迭代算法要求有比较准确的未知数初值,初值不准确会导致迭代次数增加甚至迭代不收敛。如图 4(a)所示,在散斑计算前,通常需要在参考图像中选取计算区域并划分子图像,对于每一个待匹配点,为了求取其相关参数初值,传统的方法是,先利用整数像素的粗匹配得到 u 、 v 的初值,其余参数则按式(11)取固定的初值,因为粗匹配计算量很大,所以这种方法效率很低,而且粗匹配只考虑了参数 u 和 v ,因此得到的初值精度不高,直接会影响后续的非线性优化计算效率。

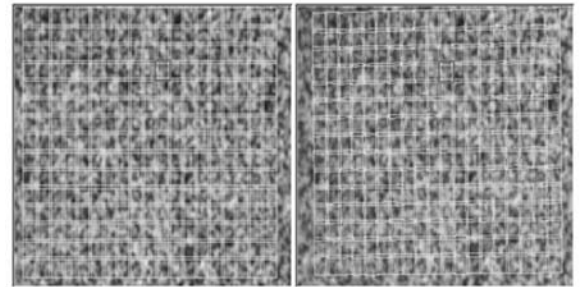
本文提出了一种基于种子点的初值计算方法。如图 4(a)所示,计算区域划分完毕后,选取其中一个或几个子图像作为种子点,首先利用传统的方法对种子点进行匹配,即先用粗匹配求取种子点的相关参数初值,然后用 ILS 算法对其进行精确匹配,因为种子点数量较少,因此粗匹配计算量可以忽略不计。种子点匹配完毕后,利用变形的连续性,根据种子点的临近点(上、下、左、右共 4 个临近点)与种子点在参考图像上的距离,通过公式(8)可以得到临近点在待匹配图像上的位置初值,通常这个初值与其实际位置非常接近。利用该中心点位置与其在参考图像上的中心位置

相减作为 u 、 v 的初值,其余相关参数取与种子点相同,以此作为 ILS 算法的初值对临近点优化匹配。利用种子点将这 4 个临近点匹配成功后,这 4 个点又可以作为种子点为其它点提供相关参数的初值,如此不断向外扩散,直至所有的点匹配完毕,如图 4(b)所示。



(a) 种子点匹配完毕

(a) Calculated seed point



(b) 所有点匹配完毕

(b) Calculated all points

图 4 利用种子点进行相关匹配

Fig. 4 Calculating correlation parameters by seed points

5 三维重建及三维位移/应变的计算

5.1 三维重建

三维重建涉及的是变形过程中的多个状态,每个状态包含左右 2 幅图像。如图 5 所示,整个相关匹配过程中,所有状态的左图像都以状态 1 (未变形状态)的左图像为参考图像进行相关匹配,所有状态的右图像都以该状态的左图像为参考图像进行相关匹配。匹配完毕后,对于任意一个状态的左右两幅图像,利用标定得到的摄像机

内、外参数,按照三角测量原理就可以重建对应的三维点坐标。

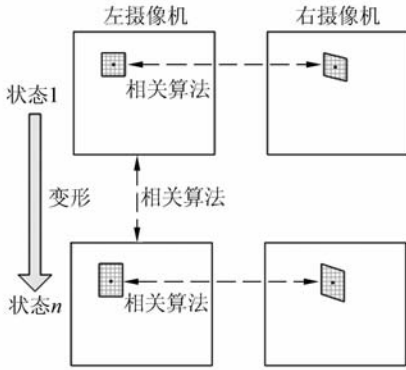


图 5 三维重建的相关匹配过程

Fig. 5 Correlation progress of three dimensional reconstruction

5.2 三维位移/应变的计算

按照 5.1 节的方法将所有状态进行三维重建后,以状态 1 作为参考状态,变形过程中任意一个状态的三维点坐标减去参考状态的三维点坐标就得到该状态的三维位移。

如图 6 所示,为了求取 P 点变形后的应变,在变形前的参考状态中,利用 P 点周围的 4 个点与 P 点建立 4 个三角形。对于每一个三角形,根据其变形前后的边长变化可以获得基于柯西-格林张量的拉格朗日应变。取 4 个三角形的应变平均值作为点 P 的应变。

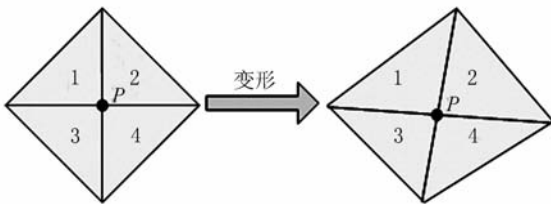


图 6 三维应变计算

Fig. 6 Calculation of three dimensional strain

6 实验及分析

图 7 为所开发的三维数字图像相关系统(XJTUDIC),所使用的摄像机为 2 个 CMOS 数字摄像机(分辨率为 1 280×960,位深度为 8),为了保证 2 个摄像机在采集图像时保持同步,系统使用数据采集卡为摄像机提供硬件触发。另外为了保

证图像的清晰,使用 2 个 25 W 的 LDE 灯作为光源。



图 7 XJTUDIC 的硬件组成

Fig. 7 Hardware of XJTUDIC

6.1 摄像机标定及图像匹配实验

利用 3.3 节所述的标定方法对系统进行标定,图 8 为标定过程中两幅图片的检测结果。

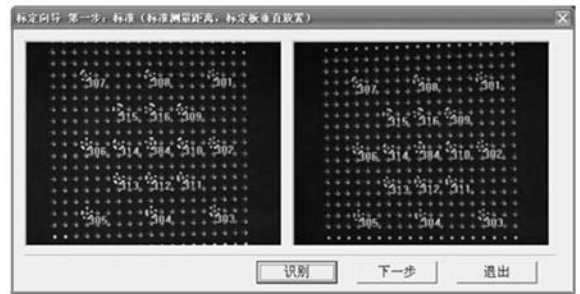


图 8 标定图片及标志点检测结果

Fig. 8 Detection results of calibration images and points

标定完成后,对任一物方点 $p(X, Y, Z)$, 利用标定得到的摄像机内、外参数,根据方程(1)、(2)可以计算得到标志点在图像上的理想坐标值 (x_i, y_i) 。假设该点通过图像检测得到的实际坐标为 (x_r, y_r) ,那么该点对应的重投影误差为 $e = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2}$ 。对所有 225 个点的在 16 幅图像上的重投影误差求平均,即得到平均重投影误差 $\bar{e} = \frac{1}{16 \times 225} \sum_{i=1}^{16} \sum_{n=1}^{225} e_{i,n}$, \bar{e} 越小说明标定参数对摄像机模型

的描述越准确,标定结果也就越可靠。本文方法标定结果的平均重投影误差为 0.03 pixel 左右,远低于张正友算法的 0.33 pixel^[7],可以看出本文的算法具有较高的测量精度。

利用第 4 节所述方法进行图像匹配,得到匹

配结果后,本文使用极限约束来验证匹配算法的精度。假设 m 和 m' 为左、右两幅图像的对点,则存在如下关系: $m'^T Fm=0$,其中 F 为双目立体视觉中的基础矩阵,即理想情况下 m' 点在 Fm 表示的直线上。设 ϵ 为 m' 点到直线 Fm 的距离,对于实际的匹配结果 $\epsilon \neq 0$, ϵ 越大表明匹配误差越大。表 1 为部分点的匹配结果及误差,表中 $(L_{px}, L_{py}), (R_{px}, R_{py})$ 分别为左右图像点的 x, y 坐标, ϵ 为匹配误差,单位为 pixel。从表中可以看到平均匹配误差 ϵ 为 0.022 9 pixel,匹配效果良好。

表 1 图像点匹配结果及匹配误差

Tab.1 Correlation results of image points and correlation errors

	L_{px}	L_{py}	R_{px}	R_{py}	ϵ
1	627.083	406.982	578.214	452.133	0.0089
2	645.936	406.831	596.435	450.123	0.0320
3	664.811	406.681	615.312	447.316	0.0158
4	683.652	406.629	634.183	444.951	0.0389
5	702.406	406.422	653.114	442.855	0.0219
6	721.227	406.228	672.222	440.61	0.0390
7	740.033	406.138	691.843	438.327	0.0260
8	758.978	406.08	711.099	436.363	0.0142
9	627.124	425.625	575.681	470.38	0.0025
10	646.098	425.538	594.75	468.818	0.0300
average					0.0229

6.2 标准圆柱外形测量实验

标准圆柱的半径为 50.12 mm(三坐标测量机结果),在其表面喷涂散斑之后,使用 XJTUDIC 系统测量其三维外形,对于静态的外形测量,仅需要拍摄一个状态的左右 2 幅图像即可。将 XJTUDIC 系统计算得到的三维点云导入 IM-AGEWARE 软件进行圆柱拟合(图 9),并求取其半径。共进行 2 次测量,在划分图像时,子图像分别取 $15 \times 15, 25 \times 25, 35 \times 35$,最终获得 6 组计算结果,如表 2 所示,与标准值 50.12 mm 相比,单次测量的最大误差为 0.035 mm,平均误差为 0.024 mm,因此 XJTUDIC 系统测量静态外形的相对精度(平均误差与标准值的比值)为 0.05%。

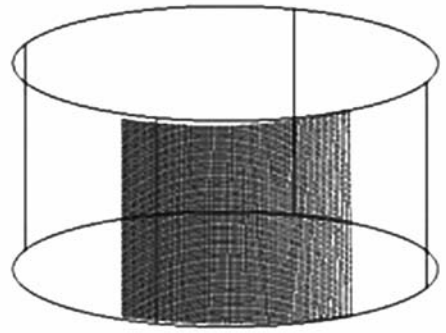


图 9 点云及圆柱拟合结果

Fig. 9 Point cloud and result of cylinder fit

表 2 标准圆柱体测量半径

Tab.2 Measured radii of standard cylinders (mm)

	测量值	误差	标准值	平均偏差	相对误差
15×15-1	50.085	0.035			
25×25-1	50.136	0.016			
35×35-1	50.126	0.006	50.12	0.024	0.05%
15×15-2	50.147	0.027			
25×25-2	50.094	0.026			
35×35-2	50.088	0.032			

6.3 平移实验

利用三维位移台将一块喷有散斑的平板平移一定的距离(11 mm),通过 XJTUDIC 系统测量其三维位移,在划分图像时,子图像取 15×15 ,共计算得到平板上 228 个点的三维坐标及位移向量,得到的三维点及其位移向量显示在系统软件的 OpenGL 三维空间中,如图 10 所示。这些点位移按位置从上到下,从左到右的顺序,其三维位移大小变化曲线如图 11。与标准只 11 mm 相比,单点的最大误差为 0.011 mm,平均误差为

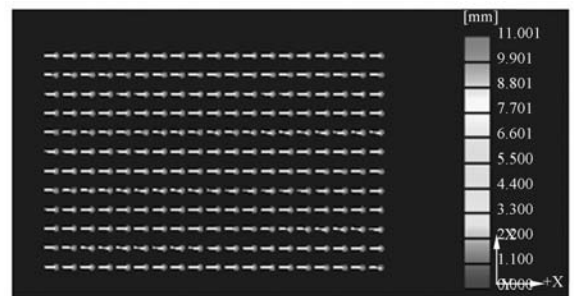


图 10 OpenGL 空间中显示的三维点及其位移向量
Fig. 10 3D points and their displacement vectors in OpenGL

0.005 mm,因此 XJTUDIC 系统测量位移的相对精度(平均误差与标准值的比值)为 0.05%。

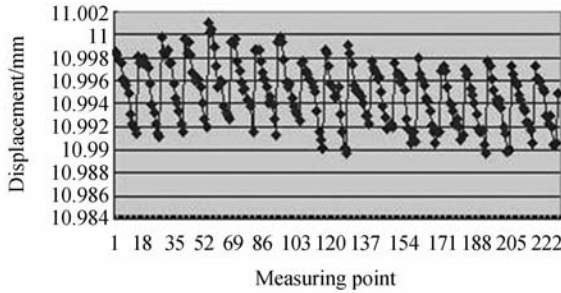


图 11 位移大小变化曲线

Fig. 11 Curve of displacement magnitude

6.4 单向拉伸实验

单向拉伸实验在瑞格尔公司(Riger Corporation)制造的 RGM4100 型电子万能试验机上进行,该试验机最大拉伸力为 100 kN。试件的尺寸如图 12(中间虚线框内为计算区域),材料为 45 号钢。

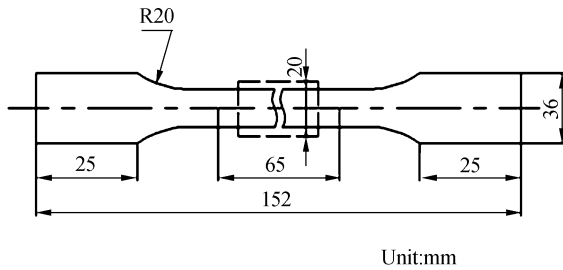


图 12 试件尺寸

Fig. 12 Specimen size

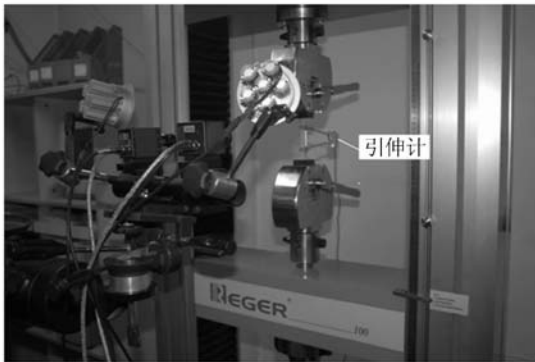


图 13 拉伸实验现场

Fig. 13 Tensile test scene

图 13 为拉伸实验现场,为了验证 XJTUDIC 系统的应变测量精度,拉伸过程中同时使用电子

引伸计测量试件的应变,该引伸计的标距为 50 mm,可测量的最大应变为 50%,应变测量精度为 0.5%。实验过程中设置试验机的拉伸速度为 5 mm/min,摄像机拍摄帧率为 1 frame/s。为了实现与引伸计数据的统一,XJTUDIC 系统每采一帧图像的同时使用串口同步地采集试验机的所有数据(包括力,位移,应变等)。

整个实验过程中共采集 340 个状态,由于引伸计只能测量试件在标距范围内的平均应变,而 XJTUDIC 系统计算得到的是全场各个点的应变值,为了便于与引伸计测量结果进行对比,本文只取前 120 个均匀变形的状态,并将 XJTUDIC 系统计算得到的该区域所有点的应变求平均值。如图 14 所示,将每一个状态下引伸计和 XJTUDIC 系统测得的应变值分别作为一个点的 x, y 坐标,共得到 120 个点,利用这 120 个点进行直线拟合,得到的直线方程为 $y=0.996 1x+0.005$,由此可以看出两者测量偏差约为 0.4%,由于所使用的电子引伸计本身的测量精度为 0.5%,所以 XJTUDIC 系统的应变测量精度不低于 0.5%。

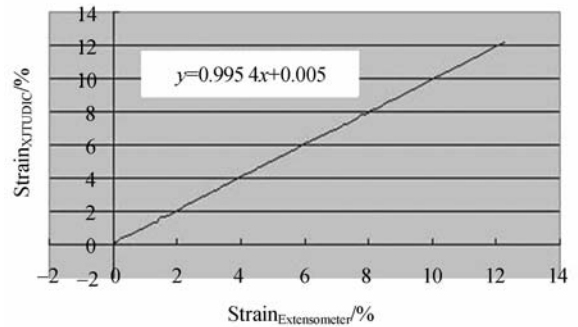


图 14 引伸计与 XJTUDIC 测量结果对比

Fig. 14 Comparison of measurement results of extensometer and XJTUDIC

如前所述,由于引伸计测量的是其标距范围内的平均应变,因此当试件发生不均匀变形时,引伸计的测量结果就不能准确反映每一个点的应变信息,而 XJTUDIC 系统得到的是全场的三维应变信息,因此可以真实地反映每个点的应变信息,如图 15 为试件发生颈缩时 XJTUDIC 的应变测

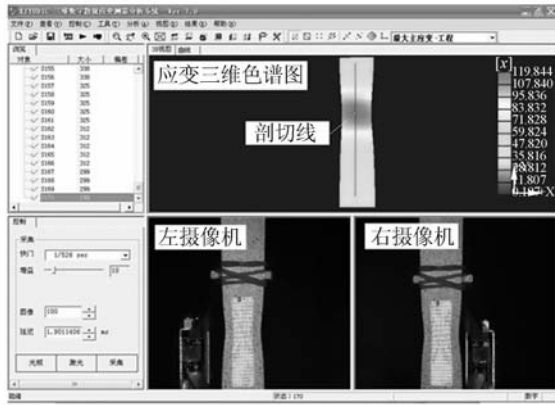


图 15 发生颈缩时 XJTUDIC 的应变测量结果

Fig. 15 Strain measurement result of XJTUDIC with necking

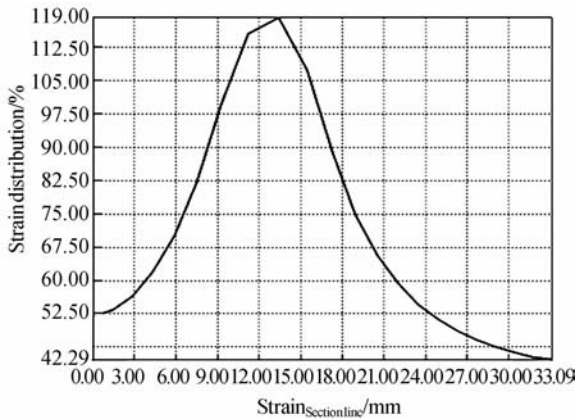


图 16 沿剖切线方向的应变变化曲线

Fig. 16 Strain distribution along section line

量结果,从三维色谱图上可以清楚地看到试件各处的应变分布,发生颈缩处的应变远远高于其它位置,高达 119%。沿试件的轴线进行剖切(图 15),可以得到应变沿着剖切方向的变化曲线(图 16),相比传统的应变测量方式,XJTUDIC 系统更能全面、准确、直观地反映试件的三维应变。

7 结 论

针对材料力学实验中对三维变形场的测量需求,本文基于立体视觉、摄影测量技术和数字图像相关方法,提出了并实现了一种便携式三维应变测量系统。对系统所涉及的关键技术进行了研究,包括立体视觉三维重建、摄像机标定、图像相关匹配技术和三维应变的计算等。重点描述了摄影测量方法的摄像机标定技术和基于种子点的图像匹配方法。实现结果表明,标定结果的重投影误差为 0.03 pixel,图像匹配的误差约为 0.02 pixel,静态外形及位移的测量精度为 0.05%,应变的测量精度不低于 0.5%。与传统的测量方法相比,本文系统的测量结果能够更准确、全面、直观地实现对三维位移场、应变场的测量,因此可以更好地满足材料力学实验对三维变形的测量要求。

参考文献:

- [1] SUTTON M, MCNEILL S, HELM J, *et al.*. Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision[J]. *Photomechanics*, 2000,77:323-372.
- [2] PAN B, QIAN K M, XIE H M, *et al.*. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. *Measurement Science & Technology*, 2009,20(6): 062001.
- [3] LUO P, CHAO Y, SUTTON M, *et al.*. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision [J]. *Experimental Mechanics*, 1993, 33 (2): 123-

132.

- [4] HELM J, MCNEILL S, SUTTON M. Erratum: improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement[J]. *Optical Engineering*, 1997,36(8):2361-2361.
- [5] 陈刚, 车仁生, 叶东, 等. 一种基于立体模板的双目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)
- [6] 孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视场双目立体视觉传感器的现场标定[J]. *光学精密工程*, 2009,17 (3):633-640.

- SUN J H, WU Z Y, LIU Q ZH, *et al.*. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 633-640. (in Chinese)
- [7] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [8] BRUCK H, MCNEILL S, SUTTON M, *et al.*. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction[J]. *Experimental Mechanics*, 1989, 29(3): 261-267.
- [9] PAN B, ASUNDI A, XIE H, *et al.*. Digital image correlation using iterative least squares and point-wise least squares for displacement field and strain field measurements [J]. *Opt. Lasers in Eng.*, 2009, 47(7-8): 865-874.
- [10] 陈华, 叶东, 陈刚, 等. 遗传算法的数字图像相关搜索法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10): 1633-1637.
- CHEN H, YE D, CHEN G, *et al.*. Digital image correlation search method based on genetic algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1633-1637. (in Chinese)
- [11] 潘兵, 谢惠民. 基于差分进化的数字图像相关方法[J]. *光电子·激光*, 2007(1): 100-103.
- PAN B, XIE H M. Digital image correlation method with differential evolution[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007(1): 100-103. (in Chinese)
- [12] OZTURK A, HALICI U, ULUSOY I, *et al.*. 3D face reconstruction using stereo images and structured light [C]. *IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference, SIU 2008, Aydin*, 2008: 1-4.
- [13] 马颂德, 张正友. 计算机视觉-计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- MA S D, ZHANG ZH Y. *Computer Vision Algorithms and Theoretical Calculation Based* [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [14] LUHMANN T, ROBSON S, KYLE S, *et al.*. *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*[M]. UK: Whittles Publishing, 2006.
- [15] TSAI R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- [16] 冯文灏. 工业测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- FENG W H. *Industrial Measurement* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004. (in Chinese)

作者简介:



唐正宗(1982—),男,山东日照人,博士研究生,2005年、2008年于西安交通大学分别获得学士、硕士学位,主要从事三维光学测量方面的研究。E-mail: nevret@gmail.com



肖振中(1980—),男,山东济宁人,博士研究生,2003年、2006年于西安交通大学分别获得学士、硕士学位,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail: xice@stu. xjtu. edu. cn

导师简介:



梁晋(1968—),男,河南郑州人,博士,副教授,博士生导师,1990年、1993年、2001年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机电控制、机器视觉等方面的研究。E-mail: liangjin@mail. xjtu. edu. cn



郭成(1948—),男,山东潍县人,博士,教授,博士生导师,1975年、1981年、1999年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事冲压件质量控制与模具 CAD/CAE/CAM/PDM、金属材料近净成形和先进材料制备与成形过程控制方面的研究。E-mail: guocheng@mail. xjtu. edu. cn