

蜂巢模型标记的飞机蒙皮小型损伤定位方法

于之靖¹, 李鑫¹, 李雁玲¹, 李泽川², 诸葛晶晶^{1*}

¹中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300;

²中国民航大学航空工程学院, 天津 300300

摘要 提出一种基于蜂巢模型标记的飞机蒙皮小型损伤定位方法。利用 CCD 相机对损伤位置进行拍摄, 对图像进行亚像素级处理, 得到相应的坐标。根据调和共轭原理和交比不变性可求得实际位置, 实现准确定位。以实际位置为主基点进行基点传递, 利用蜂巢模型的无限性与无缝隙外扩性, 实现蒙皮表面其他基点与主基点的特征对比与匹配, 进而完成对飞机蒙皮破损的精确检测。对比实验的结果表明: 本文方法具有精度高、耗时少等特点, 能有效地实现飞机蒙皮的破损检测定位。

关键词 相干光学; 飞机蒙皮破损检测; 蜂巢模型; 交比不变性; 无限与无缝隙外扩性

中图分类号 TP391.4; TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.180301

Minor Damage Location Method for Aircraft Skins Based on Marked Honeycomb Model

Yu Zhijing¹, Li Xin¹, Li Yanling¹, Li Zechuan², Zhuge Jingchang^{1*}

¹Electronic Information and Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

²Aeronautical Engineering College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract A location method for minor damages of aircraft skins based on a marked honeycomb model is proposed. A CCD camera is used to capture the damage location, and the image is processed at sub-pixel level to obtain its coordinates. According to the principles of harmonic conjugation and the invariance of cross-ratios, the actual position of the damage can be determined to achieve accurate positioning. Then, based on this, the base point is transmitted and the infinite and seamless extensibility of the honeycomb model are used to compare and match of main base points and other base points on the surface of the aircraft skin so as to achieve accurate detection of the aircraft skin damage. The comparative experimental results show that the proposed method has high accuracy and less time consuming, and can effectively realize damage detection and location for aircraft skins.

Key words coherence optics; detection of aircraft skin damage; honeycomb model; invariance of cross ratio; infinite and seamless extensibility

OCIS codes 030.6140; 030.6610; 100.4550

1 引言

飞机蒙皮是通过螺钉或者铆钉固定在飞机表面, 其构成了飞机的气动外形, 且承受着大部分的应力。在飞机的起降环节中, 飞机蒙皮将反复进行收缩和膨胀, 这极易造成疲劳损伤, 特别是在螺钉或铆钉周围容易形成细小裂纹。此外, 化学腐蚀还将造成蒙皮结构的损伤。当这些损伤累积到一定程度就

会影响蒙皮结构的强度甚至引起飞行事故, 故需定期对飞机蒙皮进行结构检测与修理, 以保证飞行安全。而在对飞机蒙皮进行损伤检测的过程中, 对飞机蒙皮复杂曲面的破损点的检测定位成为关键的一步。

当前应用较为广泛的方法是无损检测 (NDT), 其技术优点是不改变被检测对象的状态和使用性能^[1]。借鉴于此原理, 利用立体视觉测试技术能够

收稿日期: 2019-01-21; 修回日期: 2019-03-04; 录用日期: 2019-04-09

基金项目: 中国民航大学中央高校基本科研业务费项目 (3122017005)

* E-mail: 12315414@qq.com

对表面损伤进行检测,该技术适用于对大型工件的非接触式测量,其自动化程度高、针对性强^[2]。在运用立体视觉测试技术时,最关键的一点就是对飞机蒙皮表面破损点的定位检测,目前常采用控制点标记破损处以实现定位检测。由于蒙皮破损部位分布不均以及有些损伤部位具有较高的隐蔽性,在进行破损点检测时,首先需要在被测蒙皮表面和周围布置控制点。控制点的实现形式主要有主动发光点、圆形编码点、圆形记点以及位置编码点等^[3]。一般的控制点都选用圆形特征,这主要是因为该特征具有丰富的几何属性、较强的抗噪性,以及较高的辨识度。目前主要采用亚像素算法对圆形特征进行定位,该类算法主要包括灰度加权质心算法^[4-5]和高斯曲面拟合算法^[6-7]等。但受到单一圆形特征的局限性影响,在控制点的设置时一般都采用同心圆,同心圆拥有更加丰富的几何特性,并且提供了可以计算实际圆心的空间约束信息^[8]。经过 Kim 等^[9-12]的研究,已经形成了比较完备的理论支撑,但是在实际的应用过程中,同心圆控制点的布置表现出一定的缺陷,如同心圆接触布置时存在一定的空隙,该空隙不仅增加了测量的面积,还加大了定位的误差,降低了精度。

在基于精确定位及弥补上述缺陷的基础上,本文提出一种计算过程简单、效率高的蜂巢模型控制点定位算法。该算法采用圆的内接正六边形原理进行定位设计,因为正六边形之间可以做到无缝隙连接,故能提高测量的精度,且可利用圆的几何信息以及投影的椭圆性质进行分析。在对其投影进行亚像素处理后,仅需要计算交比方程,算法的计算量小、计算过程简单。

2 基于亚像素处理的蜂巢模型定位方法

运用圆控制点进行定位,能够保证圆与其在曲面上投影的椭圆之间的对应关系。基于此原理分析圆的内接正六边形,由于正六边形的6个点都位于圆周,故其同样具有圆的性质。首先需要对已知圆形及其投影形成的椭圆模型进行原理分析,再结合正六边形蜂巢模型的优点来进行优化设计^[13]。

2.1 基于圆形的蜂巢模型分析

设定 x - y 平面为圆的平面,在此平面中圆的特征满足圆的标准方程,即

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2, \quad (1)$$

式中: (x_0, y_0) 为圆心坐标; r 为半径。

其等效矩阵形式为

$$\mathbf{p}^T \mathbf{B} \mathbf{p} = \mathbf{0}, \quad (2)$$

$$\text{式中: } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & -y_0 \\ -x_0 & -y_0 & x_0^2 + y_0^2 - r^2 \end{bmatrix}, \text{ 为圆的矩阵形式; } \mathbf{p} = [x \quad y \quad 1]^T.$$

同理,椭圆的方程与矩阵形式为

$$\begin{cases} ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f = 0 \\ \mathbf{p}^T \mathbf{C} \mathbf{p} = \mathbf{0} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\text{式中: } \mathbf{C} = \begin{bmatrix} a & c/2 & d/2 \\ c/2 & b & e/2 \\ d/2 & e/2 & f \end{bmatrix} a, b, c, d, e, f \text{ 均为椭圆方程系数。}$$

当圆在物空间 x - y 平面上,且圆心坐标位于坐标原点时,即 $x_0 = 0, y_0 = 0$,令 $\mathbf{p}_{sc} = [x_s \quad y_s \quad 1]^T$ 为圆周上的一个任意点,得到

$$\mathbf{p}_{sc}^T \mathbf{C}_s \mathbf{p}_{sc} = \mathbf{0}, \quad (4)$$

$$\text{式中: } \mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -r^2 \end{bmatrix}.$$

根据小孔成像模型,该点在图像坐标系下的坐标 \mathbf{p}_{ic} 可表示为

$$s \mathbf{p}_{ic} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & t_x \\ r_{12} & r_{22} & t_y \\ r_{13} & r_{23} & t_z \end{bmatrix} \mathbf{p}_{sc} = \mathbf{H} \mathbf{p}_{sc}, \quad (5)$$

式中: s 为相机坐标系参数; γ 为扭曲因子; u_0, v_0 为像平面坐标原点; t_x, t_y, t_z 为平移矩阵系数; f_x, f_y 为单位转换系数; $r_{11}, r_{21}, r_{12}, r_{22}, r_{13}, r_{23}$ 为旋转矩阵系数。

$$\text{令 } \mathbf{H}^{-1} = \left(\begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & t_x \\ r_{12} & r_{22} & t_y \\ r_{13} & r_{23} & t_z \end{bmatrix} \right)^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & h_{31} \\ h_{12} & h_{22} & h_{32} \\ h_{13} & h_{23} & h_{33} \end{bmatrix}, \text{ 结合(4)式和(5)式,可得}$$

$$s \mathbf{C}_i = (\mathbf{H}^{-1})^T \mathbf{C}_s \mathbf{H}^{-1}, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{p}_{ic}^T \mathbf{C}_i \mathbf{p}_{ic} = \mathbf{0}$, \mathbf{C}_i 为系数矩阵。(6)式中的 \mathbf{C}_i 符

$$\text{合椭圆矩阵的形式 } \begin{bmatrix} a(r) & c(r)/2 & d(r)/2 \\ c(r)/2 & b(r) & e(r)/2 \\ d(r)/2 & e(r)/2 & f(r) \end{bmatrix},$$

这说明空间圆在像平面内的投影是一个椭圆。椭圆方程的系数 a, b, c, d, e, f 为圆半径 r 的函数,其表

达式为

$$\begin{cases} a(r) = h_{11}^2 + h_{12}^2 - h_{13}^2 r^2 \\ b(r) = h_{21}^2 + h_{22}^2 - h_{23}^2 r^2 \\ c(r) = 2(h_{11}h_{21} + h_{12}h_{22} - h_{13}h_{23}r^2) \\ d(r) = 2(h_{11}h_{31} + h_{12}h_{32} - h_{13}h_{33}r^2) \\ e(r) = 2(h_{31}h_{21} + h_{32}h_{22} - h_{33}h_{23}r^2) \\ f(r) = h_{31}^2 + h_{32}^2 - h_{33}^2 r^2 \end{cases} \quad (7)$$

由椭圆圆心计算公式可知,圆心是关于圆半径 r 的函数,其计算公式为

$$\begin{cases} e_x(r) = [c(r)e(r) - 2b(r)d(r)] / \\ [4a(r)b(r) - c(r)^2] = \\ (m_1 r^2 + n_1) / (m r^2 + n) \\ e_y(r) = [c(r)d(r) - 2a(r)e(r)] / \\ [4a(r)b(r) - c(r)^2] = \\ (m_2 r^2 + n_2) / (m r^2 + n) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: m_1, m_2, m, n_1, n_2, n 分别为 $h_{11}, h_{12}, \dots, h_{33}$ 的函数。

在(8)式中,当 r 置零时, (c_x, c_y) 为实际的圆心,其可表示为

$$\begin{cases} c_x = n_1/n \\ c_y = n_2/n \end{cases}, \quad (9)$$

椭圆圆心和实际圆心的斜率可以表示为

$$k = \frac{e_y(r) - c_y}{e_x(r) - c_x} = \frac{\left(\frac{m_2 r^2 + n_2}{m r^2 + n} - \frac{n_2}{n}\right)}{\left(\frac{m_1 r^2 + n_1}{m r^2 + n} - \frac{n_1}{n}\right)} = \frac{m_2 n - n_2 m}{m_1 n - n_1 m} \quad (10)$$

由(10)式可知,斜率 k 不随圆半径 r 变化,这表明椭圆圆心和实际圆心都在同一直线上,并且该直线通过实际的圆心。该原理同样适用于圆的内接正六边形,由于正六边形的6个点都位于圆周,所以连接对角的两个点的线必过实际的圆心。

此外,蜂巢模型的无限性和无缝隙外扩性,使得

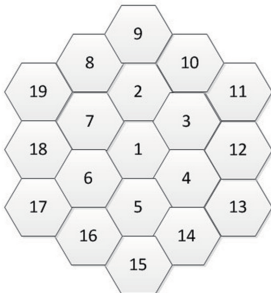


图1 蜂巢模型的基本点传递模型

Fig. 1 Basic point transfer model of honeycomb model

该模型可实现基点对比传递,其传递模型如图1所示。第一基点位于蜂窝正六边形1处,通过对蜂窝基点1的控制点定位,可快速进行基点位置1的特征提取和识别;基点2为基点1的相邻基点,通过对基点2进行检测和定位,能够与基点1进行良好的特征匹配与对比;以此类推,蜂巢模型无限外扩,且边缘连接紧密,可进行基点与基点的特征匹配与识别。这也是正六边形有别于其他多边形的特点,故蜂巢模型能够快速地完成对飞机蒙皮表面破损点的定位和检测。

2.2 飞机蒙皮损伤的亚像素图像处理

综上所述,圆控制点投影到相机平面上的图形为椭圆,因此内接正六边形的6个投影点也位于椭圆的圆周上,其性质符合椭圆方程,运用亚像素处理的图像提取方法进行图像处理。在进行实际检测时,需要安装照明源,本实验使用如图2所示的六边形RRT(Retro-Reflective Target)反光标记点,由于反光标记点具有同向高反射效应,设置较小的相机曝光时间就可以获得清晰的图像,之后可对图像进行亚像素处理^[14]。

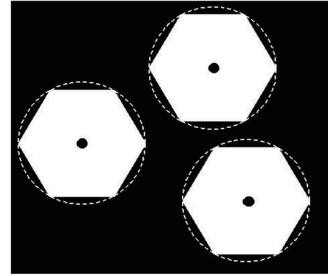


图2 RRT 反光标记点

Fig. 2 RRT reflective marks

亚像素处理方法的步骤为:1)布置好控制点,对采集到的原始图像进行二值化以及形态学处理后,再采用自适应中值滤波的方法滤除噪声,从而得到特征控制点的像素边缘,如图3所示;2)对得到的亚像素级边缘运用最小二乘法进行方程拟合,可以得到正六边形的中心坐标,对于每个像素边缘点,可沿

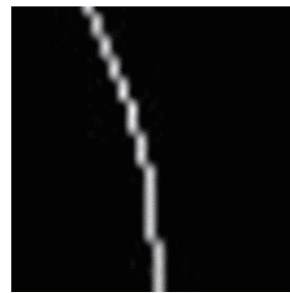


图3 特征控制点的像素边缘

Fig. 3 Pixel edge of feature control point

着该点到中心的方向计算出径向灰度梯度^[15],如图4所示,可利用双线性插值法求得亚像素点的灰度值,通过灰度加权质心算法求得亚像素点的边缘,如图5所示;3)运用最小二乘法对步骤2)得到的亚像素点的边缘进行拟合,从而获得精度更高的方程以及中心坐标。

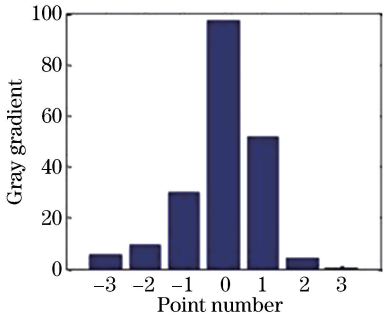


图4 径向灰度梯度

Fig. 4 Radial grayscale gradient

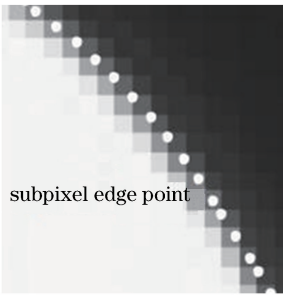


图5 亚像素边缘点

Fig. 5 Subpixel edge point

2.3 蜂巢控制点定位方法

图6为圆内接正六边形的投影示意图,对应的大小写字母表示同一特征的投影关系,如 a_1 是 A_1 的投影, O_1 点为发光原点,虚线为光束。物平面内正六边形 $A_1B_1C_1D_1E_1F_1$ 在像平面的投影为多边形 $a_1b_1c_1d_1e_1f_1$ 。图7为正六边形中某一对角线的交比不变性原理示意图,线段 E_1B_1 为正六边形中任一对角线,并且 E_1 、 B_1 两点位于正六边形的外接圆上,因此, E_1B_1 的中心 P_1 即为圆心。同理,在像平面内所形成的投影线段 e_1b_1 也符合该性质,

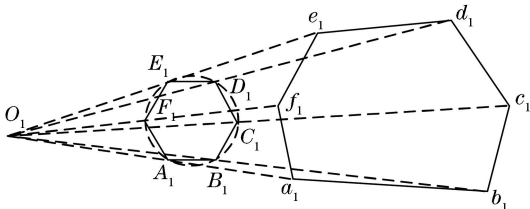


图6 圆内接正六边形投影示意图

Fig. 6 Diagram of projection of circular inscribed hexagon

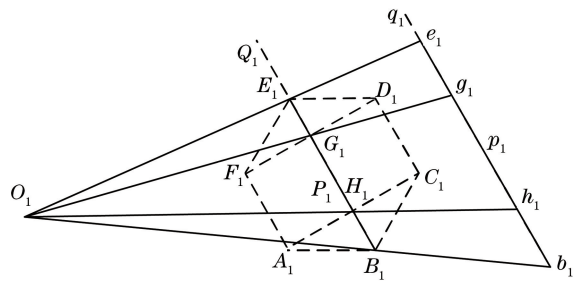


图7 正六边形中的交比不变性原理

Fig. 7 Cross ratio invariance principle in hexagon

e_1 、 b_1 为不规则多边形 $a_1b_1c_1d_1e_1f_1$ 中的两点,且 $a_1b_1c_1d_1e_1f_1$ 为正六边形的投影,所以 e_1 、 b_1 即为外接圆所形成的椭圆投影上的两点,符合椭圆拟合方程的性质, p_1 为 e_1b_1 线段的中点(实际圆心的投影)。 G_1 、 H_1 分别为 F_1D_1 、 A_1C_1 与 E_1B_1 的交点,由正六边形的性质可知, P_1 应为 G_1H_1 的中点。上述分析结论也适用于投影图像,点 e_1 、 g_1 、 h_1 、 b_1 的坐标均可通过联立方程求解。

在物平面内,点 Q_1 位于线段 E_1B_1 无限远处。同样地,在像平面内,点 q_1 也位于线段 e_1b_1 无限远处。点 Q_1 和点 q_1 为消隐点。在像平面内,利用调和共轭点的性质以及交比不变性可实现对正六边形控制点的精确定位。对于调和共轭点,如果 p_a 、 p_b 、 p_m 和 p_∞ 是4个共线点,且满足交比方程 $\{p_a, p_b; p_m, p_\infty\} = -1$,则 p_a 和 p_b 分别为 p_m 和 p_∞ 的调和共轭点。如果 p_m 为 p_a 和 p_b 的中点,那么 p_∞ 为消隐点。由调和共轭点的性质可得

$$\{E_1, B_1; P_1, Q_1\} = \{G_1, H_1; P_1, Q_1\} = -1. \quad (11)$$

由交比不变性可得

$$\{e_1, b_1; p_1, q_1\} = \{g_1, h_1; p_1, q_1\} = -1. \quad (12)$$

由于点 p_1 位于线段 e_1b_1 内,故 p_1 就是所求中心的实际投影。

由此定位方法分析可知:1)边界点的提取。利用亚像素处理提取边缘,由于边界点符合外接圆投影形成的椭圆曲线的性质,可以利用椭圆拟合与直线交点得到方程。2)计算经过中心直线以及交点的坐标。在像空间内计算中心的连线,以及该线的交点。3)提取实际中心。根据调和共轭原理和交比不变性,利用(12)式求解实际位置。依照上述步骤经过亚像素处理以后,仅需求解直线方程、交点和交比方程即可完成处理^[16]。

3 实验验证

实际测量装置如图8所示,其由精密平移台、

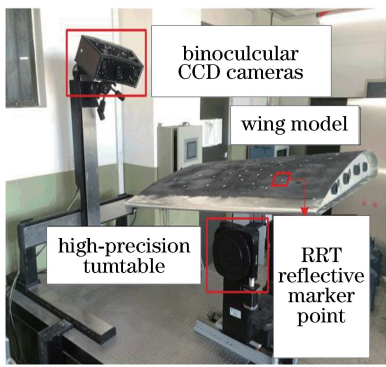


图 8 实验装置图

Fig. 8 Diagram of experimental device

主控计算机、高速双目 CCD 相机, 以及破损机翼蒙皮模型等组成。其中高速 CCD 相机的型号为 IMPERX 4M, 感光尺寸为 2/3, 分辨率为 2060 pixel × 2056 pixel。在进行实验时, 需先装好照明源, 使用如图 2 所示的六边形 RRT 反光标记点(同向高反射效应), 设置较小的相机曝光时间, 以保证实验可以获得清晰的图像。实验的操作原理如图 9 所示, 使用 CCD 相机进行飞机蒙皮表面损伤的图像采集, 通过传输系统将得到的图像传入图像处理模块, 对得到的图像进行预处理以及形态学操作, 运用相应的算法完成特征提取与检测识别, 对比分析实验结果, 从而得到高精度

的结果。

在实验前期的准备工作中, 还需考虑到各种非测量性误差对测量的精度造成的影响, 如镜头畸变误差、图像拼接误差, 以及相机的定位误差等。对于镜头畸变误差, 主要通过亚像素技术提取图像点的实际坐标, 较为精确地求出畸变系数, 在实际的测量过程中根据畸变系数进行镜头的矫正, 以提高实际测量的定位精度。对于图像拼接误差, 在预处理阶段主要用去噪、边缘检测, 以及小波变换等基本操作对所得图像进行处理, 而在图像配准时, 则采用基于特征点匹配的匹配策略, 找出拼接图像中的特征点与参考图像中的对应位置, 确定变换关系, 建立变换模型和统一坐标, 进行图像的融合重构, 获得平滑的高精度图像。

在实际检测过程时, 对机翼蒙皮表面破损点设置控制点, 控制点布置模型如图 10 所示。结合机翼蒙皮形态测试实验的结果, 选取外接圆半径为 50 mm 的正六边形模型控制点。尽管蜂巢模型定位方法的计算与相机内外参数及其他信息无关, 但为了保证对比实验的科学有效性, 需要设置统一的相机内外参数, 确保实验环境的同一性, 从而消除其他因素对实验结果的影响。

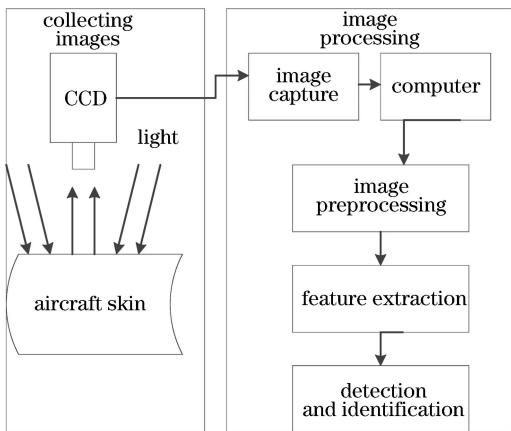


图 9 实验过程原理示意图

Fig. 9 Schematic of experimental process

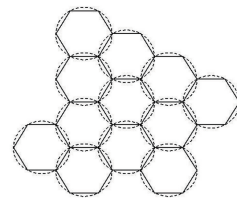


图 10 破损蒙皮表面控制点布局模型
Fig. 10 Control point layout model of damaged skin

飞机蒙皮表面的损伤情况可分为裂纹、腐蚀、撞击和划痕。在具体的实验中, 由图像采集环节得到的损伤样本图像如图 11 所示。筛选出损伤明显的图像, 分别采取中值滤波、高斯高通滤波, 以及改进的自适应中值滤波对图像进行预处理。实验结果表明采用自适应中值滤波处理的效果最佳, 对 4 种损



图 11 飞机蒙皮表面的损伤情况。(a) 正常蒙皮; (b) 裂纹; (c) 腐蚀; (d) 撞击; (e) 划痕

Fig. 11 Damage to surface of aircraft skin. (a) Normal skin; (b) crack; (c) corrosion; (d) strike; (e) scratch

伤进行滤波处理后的 3×3 模板如图 12 所示。

分别采用蜂巢模型定位方法、文献[9]的算法和文献[11]的算法对预处理后的撞击损伤图像进行定位分析。实验中分别对飞机蒙皮的 4 处损伤位置进

行控制点中心坐标解算,选取具有代表性的 4 组实验数据列于表 1 中,同时给出了每组实验中 3 种算法对应的最优理论值,并与实验数据进行比对。实验结果如表 1 所示。

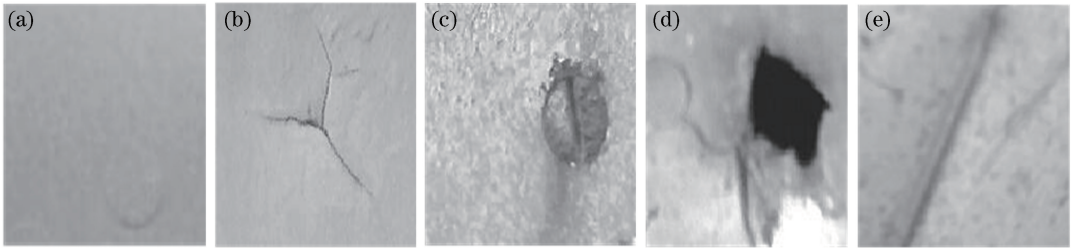


图 12 自适应中值滤波处理后的 3×3 模板图像。(a)正常蒙皮;(b)裂纹;(c)腐蚀;(d)撞击;(e)划痕

Fig. 12 3×3 template images after adaptive median filtering. (a) Normal; (b) crack; (c) corrosion; (d) strike; (e) scratch

表 1 3 种不同算法下的 4 组控制点中心坐标结果

Table 1 Center coordinate results of four groups of control points under three different methods

pixel

Experimental group	Positioning method	Data result	Theoretical optimal value
1	Honeycomb model location method	(1157.38,1349.27)	(1157.64,1348.75)
		(1156.95,1348.94)	
		(1157.73,1350.12)	
		(1158.08,1349.23)	
	Method in Ref. [11]	(581.82,349.36)	(582.42,350.37)
		(582.24,350.03)	
		(581.43,348.97)	
		(581.12,348.62)	
	Method in Ref. [9]	(217.60,145.39)	(218.85,146.38)
		(216.92,144.88)	
		(217.05,144.98)	
		(217.83,145.64)	
2	Honeycomb model location method	(597.60,344.36)	(597.64,344.25)
		(597.82,344.57)	
		(598.05,343.98)	
		(596.89,345.35)	
	Method in Ref. [11]	(1851.03,1247.87)	(1852.76,1241.28)
		(1851.37,1248.24)	
		(1850.72,1247.48)	
		(1851.65,1248.56)	
	Method in Ref. [9]	(654.78,864.63)	(665.68,875.13)
		(655.21,865.02)	
		(655.68,865.43)	
		(654.38,864.19)	

Experimental group	Positioning method	Data result	Theoretical optimal value
3	Honeycomb model location method	(800.16, 675.26)	(800.37, 674.96)
		(799.89, 675.03)	
		(799.60, 674.69)	
	Method in Ref. [11]	(801.75, 675.57)	(525.09, 481.23)
		(514.76, 483.87)	
		(515.09, 484.23)	
		(515.46, 484.61)	
		(515.78, 484.97)	
		(1264.53, 1027.86)	
	Method in Ref. [9]	(1264.87, 1028.22)	(1267.74, 1030.12)
		(1265.33, 1028.76)	
		(1265.69, 1029.14)	
4	Honeycomb model location method	(1697.61, 1144.36)	(1697.43, 1144.27)
		(1698.10, 1144.77)	
		(1697.32, 1145.16)	
	Method in Ref. [11]	(1696.95, 1143.84)	(1466.18, 980.63)
		(1456.47, 987.39)	
		(1456.68, 987.63)	
		(1456.89, 987.87)	
		(1457.12, 988.23)	
		(1733.64, 1368.59)	
	Method in Ref. [9]	(1734.12, 1368.93)	(1745.22, 1370.47)
		(1734.44, 1369.29)	
		(1733.23, 1368.27)	

通过分析控制点中心坐标结果, 并对比理论最优值中心坐标, 可知本文所提的蜂巢模型定位方法的结果更接近理论最优结果, 且其精度更高, 误差值更小。

选取多次实验中的 50 次实验结果, 并计算其误差值, 得到如图 13(a) 所示的结果。记录实验中 3 种方法处理图像所用的时间, 统计 50 组时间结果制成图 13(b) 所示的折线图。为了使实验的数据结果

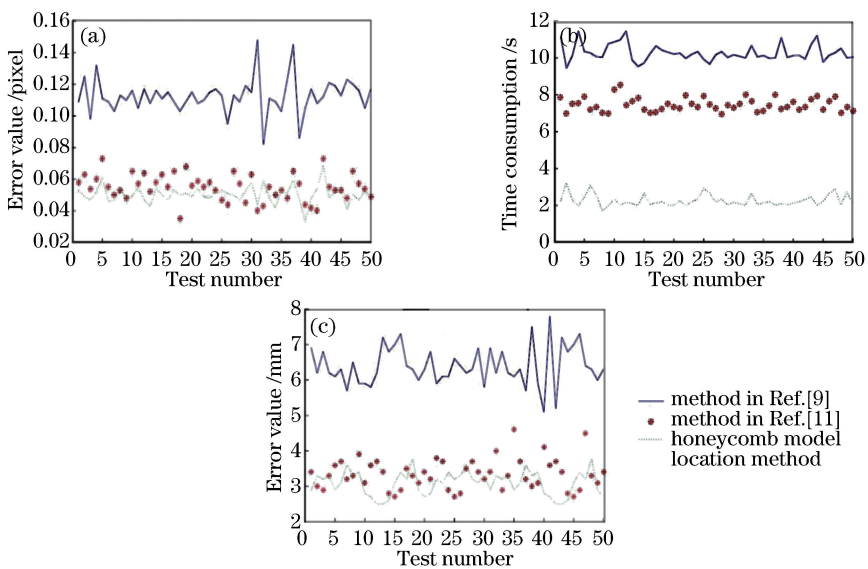


图 13 3 种算法的误差值与时间消耗。(a) 图像中误差; (b) 时间消耗; (c) 相对真值误差

Fig. 13 Error values and time consumptions of three algorithms. (a) Error in image; (b) time consumption; (c) relative truth error

表现得更加明确,将所得到的像素误差值转化为相对的空间真值误差,得到如图 13(c)所示的结果。

由图 13 可知:文献[9]所提方法的像素误差约为 0.12 pixel,而文献[11]所提方法与本文方法的精度可提高到 0.05 pixel。对于相对空间真值误差,文献[9]为 6.3 mm,文献[11]为 3.4 mm,而本文方法的相对空间真值误差降低到 3.1 mm。对于算法所用时间,文献[11]与文献[9]所提方法的时间消耗均值分别为 7.53 s 和 10.14 s,而本文方法的计算时间仅为 2.26 s,优于前两种方法。因此,蜂巢模型定位方法具有计算时间短、精度优、效率高的特点。

4 结 论

提出一种飞机蒙皮表面复杂曲面损伤点的定位检测方法。理论分析及实验结果表明:蜂巢模型定位算法具有计算时间短、效率高、计算过程简单等优点。采用的内接正六边形可有效消除圆形接触布置时存在的空隙,减少测量面积和定位误差。此外,根据蜂巢模型基点间的传递法,通过对比相邻的基点与主基点的相似度,定位检测基点所在六边形区域的表面异样。相比于其他两种视觉检测方法,本文方法的定位精度与广度均明显提高,并且对于其他复杂曲面的损伤定位检测研究也有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Wang H. Aircraft skin damage detection and life cycle analysis method based on machine vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013: 8-13.
王昊. 基于机器视觉的飞机蒙皮损伤检测与寿命分析方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013: 8-13.
- [2] Ren Y J, Zhu J G, Yang X Y, *et al.* On-line calibration technique of robot flexible visual inspection system[J]. Robot, 2009, 31(1): 82-87.
任永杰, 郝继贵, 杨学友, 等. 机器人柔性视觉检测系统现场标定技术[J]. 机器人, 2009, 31(1): 82-87.
- [3] Zhu J G, Yu Z J. Principle of vision metrology[M]. Beijing: China Machine Press, 2012: 31-48.
郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 31-48.
- [4] Lian Y Y, Zhang C, Xie Z T. Accuracy analysis for sub-pixel location of star image [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2015, 32(6): 578-582.

- 连月勇, 张超, 谢宗特. 星点亚像元细分定位精度分析[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(6): 578-582.
- [5] Zhang J, Hao Y C, Liu D. Investigation on the mechanism and positioning error of multi-star spots extraction of iteratively weighted center of gravity algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0204001.
张俊, 郝云彩, 刘达. 迭代加权质心法机理及多星定位误差特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0204001.
- [6] Wang H Y, Fei Z H, Wang X L. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1672-1677.
王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1672-1677.
- [7] Jia R M, Ma X L, Hao Y C. Research on star subdivision location method based on skewed normal distribution[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 051002.
贾瑞明, 马晓蕾, 郝云彩. 基于偏正态分布的星点细分定位方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 051002.
- [8] Kim J S, Gurdjos P, Kweon I S. Geometric and algebraic constraints of projected concentric circles and their applications to camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(4): 637-642.
- [9] Kim J S, Kweon I S. A new camera calibration method for robotic applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2001: 778-783.
- [10] Jiang G, Quan L. Detection of concentric circles for camera calibration [C] // Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05), October 17-21, 2005, Beijing, China. New York: IEEE, 2005, 1: 333-340.
- [11] Chen X Y, Hu Y, Ma Z, *et al.* The location and identification of concentric circles in automatic camera calibration[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 54: 185-190.
- [12] Huang H F, Zhang H, Cheung Y M. The common self-polar triangle of concentric circles and its application to camera calibration [C] // 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE, 2015: 4065-4072.
- [13] Li R Q, Wang Z, Cui C, *et al.* Diffraction of vortex

- beam by regular hexagonal multi-hole array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1005002.
- 李润泉, 王智, 崔粲, 等. 正六边形多孔阵列的涡旋光衍射[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1005002.
- [14] Lu R S, Wu A, Zhang T D, *et al.* Review on automated optical (visual) inspection and its applications in defect detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815002.
- 卢荣胜, 吴昂, 张腾达, 等. 自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815002.
- [15] Xu D G, Li X X, Yang C H, *et al.* Crack extraction from sagger bottom based on sector neighborhood difference histogram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 815018.
- 徐德刚, 李翔鑫, 阳春华, 等. 基于扇形邻域差异直方图的匣钵裂纹检测[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 815018.
- [16] Han Y C, Hou H, Bai Y R, *et al.* A closed point cloud edge extraction algorithm using edge coefficient [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 111003.
- 韩玉川, 侯贺, 白云瑞, 等. 一种基于边缘系数的闭合点云边缘提取算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 111003.