

基于后方定位的飞机蒙皮损伤视觉检测全局 三维重建方法

吴军^{1,2}, 李鑫³, 刘少禹¹, 李雁玲³, 于之靖^{3*}

¹中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;

²天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

³中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

摘要 利用机器视觉进行飞机蒙皮损伤检测是提高其自动化水平的有效手段,其中飞机蒙皮全局三维重建是检测过程的关键步骤,可定位损伤部位的精确位置。为解决当前技术所存在的设备复杂、拼接精度低、处理效率低等问题,提出一种基于后方定位并结合结构光对飞机蒙皮进行快速三维重建的方法。通过结构光三维测量系统对飞机蒙皮局部区域进行三维重建,采用后方摄像机同步观测结构光系统,并对其空间位姿进行定位。在空间位姿数据的辅助下,将结构光系统每次测量的飞机三维形貌数据融合至定位摄像机坐标系下,实现对大飞机蒙皮三维形貌的快速、高精度非接触式测量,这为飞机蒙皮损伤的自动化视觉检测提供了有效的技术支持。

关键词 机器视觉; 三维重建; 视觉定位; 数据融合; 蒙皮损伤检测

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1115002

Global Three-Dimensional Reconstruction Method for Visual Detection of Aircraft Skin Damage Based on Rear Positioning

Wu Jun^{1,2}, Li Xin³, Liu Shaoyu¹, Li Yanling³, Yu Zhijing^{3*}

¹Aeronautical Engineering College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

²State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

³Electronic Information and Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract It is an effective method to improve the automation level of aircraft skin damage detection by using machine vision. The global three-dimensional (3D) reconstruction of aircraft skins is the key step in the detection process to locate the exact location of the damaged parts. In order to solve the problems of complex equipment, low splicing accuracy, and low processing efficiency in current technology, this paper proposes a rapid 3D reconstruction method for aircraft skins based on rear positioning and combined with structured light. The 3D reconstruction of the local area of aircraft skins is conducted by using the structured light 3D measurement system, and the rear camera synchronously observes the structured light system to determine its spatial position and posture. With the help of spatial pose data, the 3D topography data of the aircraft measured by the structured light system is fused into the positioning camera coordinate system to realize the rapid and high-precision non-contact measurement of the 3D topography of the large aircraft skin. This method provides effective technical support for the automatic visual inspection of aircraft skin damage.

Key words machine vision; three-dimensional reconstruction; visual positioning; data fusion; skin damage

收稿日期: 2020-12-16; 修回日期: 2021-01-05; 录用日期: 2021-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(52005500)、中央高校科研基本业务费(3122019088)、天津市教委科研计划项目(2018KJ242)

* E-mail: hityuzj@163.com

detection

OCIS codes 150.0155; 100.3020; 100.4994; 150.1835

1 引言

飞机蒙皮损伤检测是飞机检修过程中的一个重要环节,国际上常用的无损检测技术有超声检测、磁粉检测、射线检测、渗透检测、涡流检测等技术^[1-2],但利用专业仪器设备的无损检测技术仅在 10% 的检测中发挥作用,目视检测却是飞机蒙皮表面检测的主要方式。随着自动化检测技术的发展,机器视觉检测方法被应用到飞机蒙皮表面损伤检测中,利用机器视觉的飞机蒙皮损伤检测可以显著提高检测速度与检测精度^[3-5]。但以往研究只检出损伤却无法进行定位,无法按照飞机结构维修手册要求判定损伤程度,利用三维重建技术建立飞机三维形貌可以弥补这一缺陷,为飞机蒙皮损伤检测提供定位依据。受限于摄像机视觉传感器的视场范围,结构光系统可测量的区域范围是有限的^[6],只能测量待测物表面局部区域的三维形貌,不能通过单次测量获得大尺寸飞机蒙皮结构的全局三维信息。为了实现飞机蒙皮的快速高精度的全局三维形貌重建,需要将待测表面划分成多个测量区域,并采用结构光三维重建技术从多个不同位置对飞机进行三维重建,从而将每次重建的三维点云数据进行融合。

将结构光三维重建与近景摄影测量技术相结合,是大尺寸物体三维重建的有效方法。Reich 等^[7]结合摄影测量和条纹投影方法完成复杂物体的三维重建,通过使用条纹分析的相移方法和光学三角测量的组合确定出局部视图形貌在传感器坐标系下的三维坐标,并且依据每个传感器的位置和目标形状的匹配关系,在全局坐标系中变换每个传感器测量的形状点云,以解决将局部视图彼此匹配的问题。但这种方法需要粘贴圆形标志点,过程繁琐,在大尺寸飞机结构上粘贴标志点困难,测量不易实现。刘晓利等^[8]利用三节点光学测量传感器网络,同时完成整体测量系统在大尺度测量空间的现场标定以及各个三维测量节点传感器的标定,并采用多传感器标定信息与最近邻迭代(ICP)方法相结合的多视点深度测量数据的匹配方法,实现了对大型薄壳表面的检测。这种方法需要多个传感器和 ICP 方法进行匹配,而且需要粘贴靶标,无法实现真正意义上的无接触测量,且对于表面特征不明显的待测飞机,ICP 方法并不适用,不能进行准确的拼接。Xiao 等^[9]提出了一种

基于逆向摄影的结构光测量技术,在结构光三维测量系统上安装辅助的反向摄像机,用反向摄像机反向观测作为定向靶标的大型液晶显示器。根据反向摄像机对液晶定向靶标的多次成像约束,将所有结构光系统单次测量的三维数据统一在定向靶标坐标系下,以实现大尺寸空间、高精度、高分辨率的三维测量。但这种方法需要大型 LCD 液晶显示器,无疑增加了三维测量的设备要求,且反向摄像机与三维重建摄像机难以进行坐标系统一,实现困难。当结构光测量系统位姿扭矩过大时,反向摄像机并不能拍摄到 LCD 液晶显示器,成像约束信息丢失,无法完成重建。

本文提出基于后方摄像机视觉定位并结合结构光三维重建的方法,该方法通过结构光系统投影格雷码编码条纹信息,完成局部区域的三维重建^[10],同时采用后方摄像机对结构光系统进行视觉定位,利用位姿传递将所有结构光系统单次重建的三维数据统一在后方定位摄像机坐标系下,实现大尺寸飞机全局快速高精度三维重建,获得飞机整体的三维形貌数据。该方法省去了粘贴靶标以及点云数据特征匹配等一系列操作,避免了粘贴靶标的繁琐以及数据匹配时迭代误差的引入,实现了对飞机的快速无接触高精度三维形貌测量。

2 测量原理

后方摄像机视觉定位的大尺寸飞机全局三维重建是将结构光三维重建与近景摄影测量技术相结合的方法,其中结构光三维重建利用投影格雷码将条纹编码到待测飞机表面,通过摄像机拍摄经待测飞机表面调制的变形条纹并对变形条纹进行分析,利用摄像机和投影仪所构建的三角几何关系唯一确定飞机表面任一点的空间几何位置,实现对飞机表面局部区域的三维重建。格雷码结构光三维重建原理如图 1 所示^[11-12]。

在利用结构光系统进行局部三维重建的同时,利用后方定位摄像机对结构光系统的各个子位置进行精确的视觉定位,在定位信息的辅助下,结构光系统坐标系下的局部三维重建点云数据都可以被统一到同一个定位摄像机坐标系下,通过对所有局部点云数据结果进行融合,完成了空间坐标系的统一,重建出飞机全局三维形貌数据。后方摄像机视觉定位全局三维重建原理如图 2 所示。

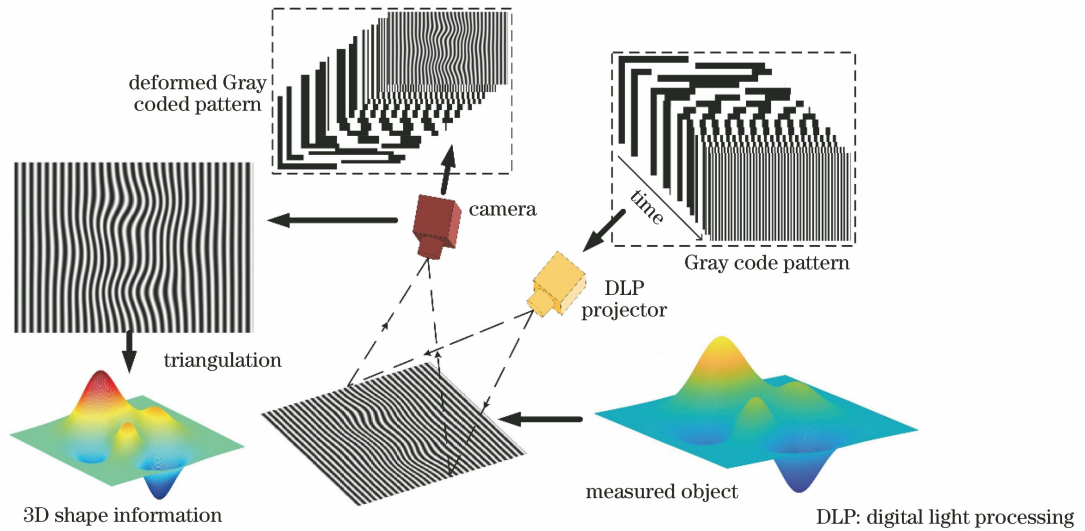


图 1 格雷码结构光三维重建原理图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D reconstruction of Gray code structured light

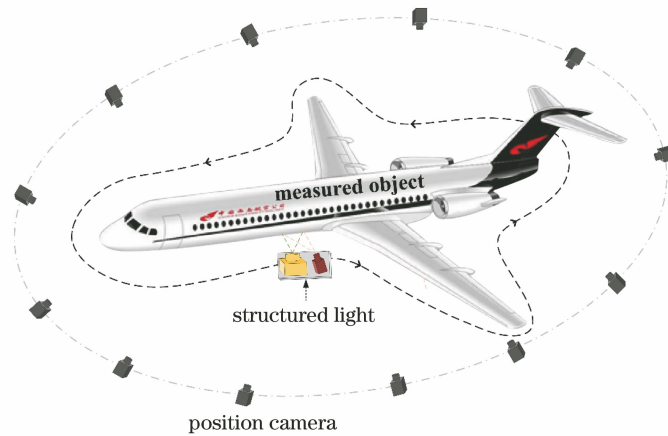


图 2 基于后方摄像机视觉定位的全局三维重建原理图

Fig. 2 Schematic diagram of global 3D reconstruction based on visual positioning of rear camera

2.1 后方视觉定位原理

基于后方视觉定位的飞机全局三维重建利用后方摄像机对结构光系统进行定位,为了增加后方相机的定位范围、保证结构光系统位姿扭曲过大时依

然可以完成精确定位,对结构光系统进行改进,在结构光系统上安装易于观测的高精度立方体标识块,并以垂直于标识块每一平面的方向为 Z_b 轴建立标识块坐标系 $O_b-X_bY_bZ_b$,如图 3 所示。

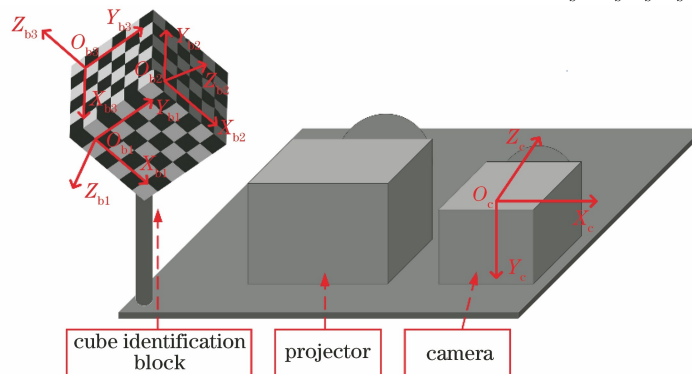


图 3 改进的结构光系统图

Fig. 3 Improved structured light system diagram

通过对结构光系统组件的改进,使得后方定位相机可以拍摄到任意位置姿态的标志板,这降低了视觉定位的难度并提高了定位精度。将定位摄像机对结构光系统的定位转换为对标识块位姿的解算,其主要参数是定位摄像机与标识块之间的位姿,即旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矢量 \mathbf{T} 。考虑到摄像机逐次标定在定位位

姿传递数据融合时的累计误差,采用摄像机内外参数统一标定的策略,这可极大可能地削弱摄像机噪声和内参数标定不准确对视觉定位的影响^[13]。

摄像机成像模型如图 4 所示,空间点 P 的坐标为 $[x_c, y_c, z_c]^T$,其在图像像素坐标系中的坐标为 $[u, v]^T$ 。

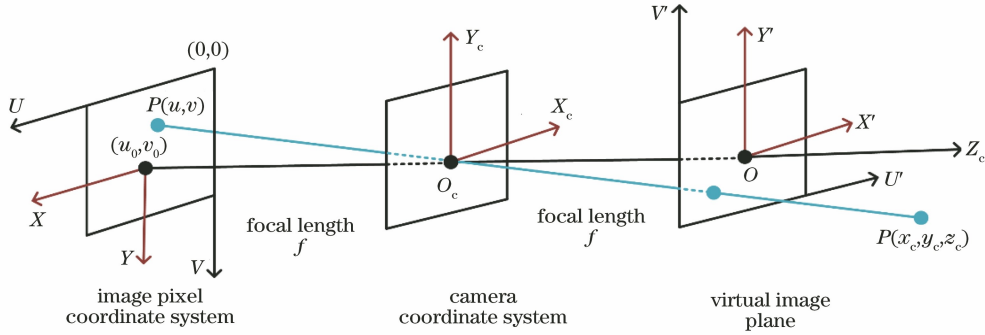


图 4 摄像机成像模型原理图

Fig. 4 Schematic diagram of camera imaging model

摄像机投影成像关系可用齐次坐标^[14]表示为

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & F_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: λ 为比例因子; (u_0, v_0) 为摄像机成像平面的主点,即光轴与像平面交点的坐标; F_x, F_y 为摄像机的等效焦距,定义为镜头物理焦距与像元尺寸之比; \mathbf{R}, \mathbf{T} 分别为旋转矩阵和平移矢量。

由于镜头畸变,摄像机实际投影成像并不完全符合(1)式描述的关系,用以下非线性畸变公式来描述实际成像点 $[x_d, y_d]^T$ 与理想像点坐标 $[u, v]^T$ 之间的关系:

$$\begin{cases} u = x_d + \delta_x(x_d, y_d) \\ v = y_d + \delta_y(x_d, y_d) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\delta_x(x_d, y_d)$ 与 $\delta_y(x_d, y_d)$ 为非线性畸变值,其

大小与图像点在图像平面上的位置有关,可表示为

$$\begin{cases} \delta_x(x_d, y_d) = k_1 x_d (x_d^2 + y_d^2) + [p_1 (3x_d^2 + y_d^2) + 2p_2 x_d y_d] + s_1 (x_d^2 + y_d^2) \\ \delta_y(x_d, y_d) = k_2 y_d (x_d^2 + y_d^2) + [p_2 (3x_d^2 + y_d^2) + 2p_1 x_d y_d] + s_2 (x_d^2 + y_d^2) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$ 为畸变因子。经上述分析可知,在视觉定位过程中通过对投影矩阵进行分解,可得到具体内外参数的线性解,从而得到各个子位置的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矢量 \mathbf{T} 。

2.2 标识板与结构光系统位姿标定方法

由于结构光系统的重建结果属于结构光系统中的摄像机坐标系,所以还需要建立摄像机坐标系 $O_c-X_c Y_c Z_c$ 与标识板坐标系 $O_b-X_b Y_b Z_b$ 之间的位姿传递关系。此处以圆形高精度标识板代替标识块进行实验,通过额外的棋盘格标定板和辅助标定摄像机完成这一标定过程,如图 5 所示。

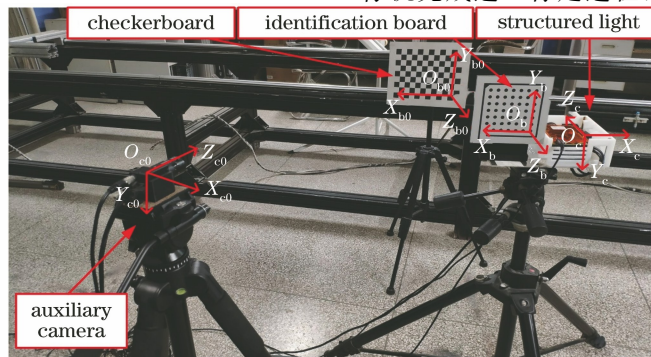


图 5 结构光系统标识板的自标定图

Fig. 5 Self-calibration diagram of structured light system identification board

依据张正友标定方法^[8]依次完成结构光系统摄像机相对于棋盘格标定板的位姿标定,得到旋转矩阵 $\mathbf{R}_c^{b_0}$ 和平移矢量 $\mathbf{T}_c^{b_0}$;通过标定摄像机相对于棋盘格标定板的位姿,得到旋转矩阵 $\mathbf{R}_{c_0}^{b_0}$ 和平移矢量 $\mathbf{T}_{c_0}^{b_0}$;通过标定摄像机相对于标识板的位姿,得到旋转矩阵 $\mathbf{R}_{c_0}^b$ 和平移矢量 $\mathbf{T}_{c_0}^b$ 。那么摄像机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 与标识板坐标系 $O_b-X_bY_bZ_b$ 的位姿关系为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^c & \mathbf{T}_b^c \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{c_0}^b & \mathbf{T}_{c_0}^b \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{c_0}^{b_0} & \mathbf{T}_{c_0}^{b_0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c^{b_0} & \mathbf{T}_c^{b_0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}^{-1}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{R}_b^c 为旋转矩阵; \mathbf{T}_b^c 为平移矢量。

为了表述方便,记

$$\mathbf{H}_b^c = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^c & \mathbf{T}_b^c \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

3 三维重建数据融合原理

通过将结构光局部三维重建数据统一到同一个坐标系下,即可完成大尺寸飞机全局三维重建,通常采用最邻近点迭代方法(ICP)^[15]寻找各个局部三维点云之间的位姿,然后将所有局部三维测量数据进行序列配准。对于大尺寸空间物体的全局三维测量,序列配准会导致误差的累积传播,误差累积达到一定的程度会导致局部测量三维数据的分层,此时无法获取整个物体的三维数据。

基于后方视觉定位的飞机全局三维重建方法利用视觉定位数据进行位姿传递,通过将各个局部三维重建数据融合到统一的定位摄像机坐标系下,避免了点云配准过程中的误差累积。

假定结构光三维测量系统重建出的点云结果为 $(x_{c,i}, y_{c,i}, z_{c,i}), (i=1, 2, 3 \dots)$, 那么标识板坐标系 $O_b-X_bY_bZ_b$ 下的点云结果 $(x_{b,i}, y_{b,i}, z_{b,i})$ 为

$$\begin{bmatrix} x_{b,i} \\ y_{b,i} \\ z_{b,i} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_b^c \begin{bmatrix} x_{c,i} \\ y_{c,i} \\ z_{c,i} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

通过(6)式完成坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 到坐标系 $O_b-X_bY_bZ_b$ 的位姿传递,得到标识板坐标系下的点云数据结果。为了将飞机的局部三维数据统一融合到定位摄像机坐标系 $O_p-X_pY_pZ_p$ 下并获得全局三维点云数据结果,利用各个子位置坐标系 $O_b^k-X_b^kY_b^kZ_b^k (k=1, 2, 3 \dots)$ 与定位摄像机坐标系 $O_p-X_pY_pZ_p$ 之间的定位数据: 旋转矩阵 $\mathbf{R}_p^{b,k}$ 和平移矢

量 $\mathbf{T}_p^{b,k}$, 通过位姿传递得到定位摄像机坐标系下点云数据结果为

$$\begin{bmatrix} x_{p,i}^k \\ y_{p,i}^k \\ z_{p,i}^k \end{bmatrix} = \mathbf{R}_p^{b,k} \begin{bmatrix} x_{b,i} \\ y_{b,i} \\ z_{b,i} \end{bmatrix} + \mathbf{T}_p^{b,k}. \quad (7)$$

对(7)式进行整理,将其写成矩阵乘积形式:

$$\begin{bmatrix} x_{p,i}^k \\ y_{p,i}^k \\ z_{p,i}^k \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_p^{b,k} \begin{bmatrix} x_{b,i} \\ y_{b,i} \\ z_{b,i} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{H}_p^{b,k} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_p^{b,k} & \mathbf{T}_p^{b,k} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: $(x_{p,i}^k, y_{p,i}^k, z_{p,i}^k)$ 为结构光系统在第 k 个位置处重建出的第 i 个点云数据结果。通过以上位姿传递方法,将结构光系统在每一位置处重建出的局部点云数据融合到同一定位摄像机坐标系下,进而获得了大尺寸飞机全局三维重建点云结果。

4 飞机模型的三维重建验证实验

基于后方视觉定位的飞机全局三维重建首先要进行结构光系统的标定^[16],然后使用结构光系统对飞机的局部区域进行三维重建,同时通过定位摄像机对结构光系统标识板进行定位,利用定位数据将各个位置的局部点云数据进行融合,通过将融合结果统一到同一定位摄像机坐标系下,完成大尺寸飞机的全局三维重建,实验流程图如图 6 所示。

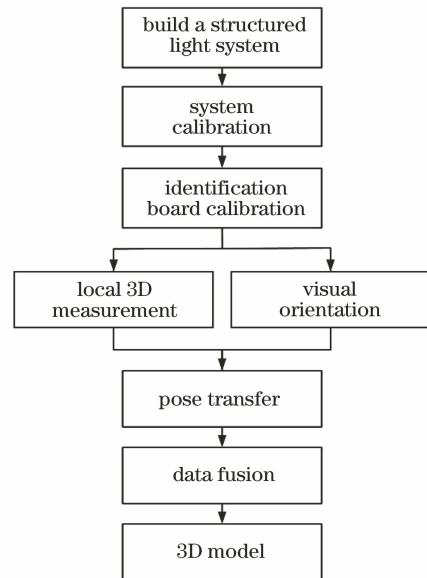


图 6 三维重建实验流程图

Fig. 6 Experimental flowchart of 3D reconstruction

4.1 标识板与结构光系统位姿标定方法

首先搭建结构光系统,使用 PDC03 光栅投影仪,其有效分辨率为 $800 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$ 。图像接收装置采用由有效像素为 500 万像素的 GED200C-T 工业黑白摄像机组成的结构光系统,调整摄像机与投影仪之间的位置关系,以达到合适的角度。依据布朗大学提出的标定方法进行标定^[11],如图 7 所示。使用投影仪向棋盘格标定板投影 34 幅格雷码条纹图案,摄像机同步采集图像,标定完一次棋盘格位置后,多次变换棋盘格标定板位置,完成结构光系统的标定,标定结果如表 1 所示。表 1 中 \mathbf{K} 表示内参矩阵, \mathbf{K}_c 表示畸变系数矩阵, \mathbf{R} 表示旋转矩阵, \mathbf{T}

表示平移向量。

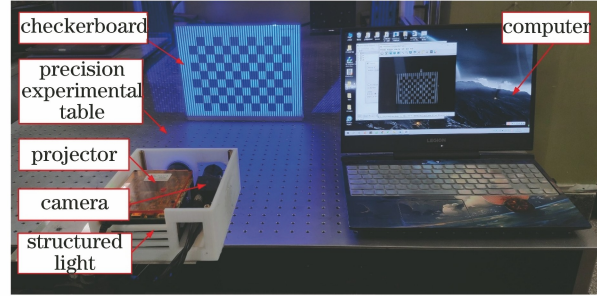


图 7 结构光系统的标定实验图
Fig. 7 Calibration experimental diagram of structured light system

表 1 结构光系统的标定结果

Table 1 Calibration results of structured light system

Calibration object	Parameter	Specific value
Camera	\mathbf{K}	$\begin{bmatrix} 2947.9267 & 0 & 1285.6886 \\ 0 & 2947.5967 & 989.2459 \\ 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$
	\mathbf{K}_c	$[-0.0878 \quad 0.2252 \quad 0.0022 \quad 0.0014 \quad 0]$
Projector	\mathbf{K}	$\begin{bmatrix} 220.9500 & 0 & 509.8918 \\ 0 & 442.8512 & 382.3334 \\ 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$
	\mathbf{K}_c	$[-0.0620 \quad -0.0346 \quad 0.0011 \quad 0 \quad 0]$
Structured light system	\mathbf{R}	$\begin{bmatrix} 0.9967 & -0.0031 & -0.0814 \\ -0.0034 & 1.0000 & 0.0042 \\ 0.0814 & -0.0045 & 0.9967 \end{bmatrix}$
	\mathbf{T}	$[49.2421 \quad -0.2454 \quad 0.2071]$

其次,为结构光系统安装标识板,并进行结构光系统标识板的自标定。正确摆放标定摄像机与结构光系统摄像机之间的位置关系,要求两摄像机可以采集到同一棋盘格标定板图像,并且标定摄像机还可以同时采集到结构光系统中的标识板图像,如图 5 所示。保持两摄像机之间的位置关系不变,多次改变棋盘格标定板的位置,利用摄像机采集图像,并利用相对应的图像解算出棋盘格标定板与结构光系统摄像机之间的位姿关系,棋盘格标定板与标定摄像机之间的位姿关系,以及标定摄像机与结构光系统标识板之间的变换关系,并依据(5)式计算出 \mathbf{H}_b^s ,结果为

$$\mathbf{H}_b^s = \begin{bmatrix} -0.6415 & 0.0222 & 0.7668 & 121.9245 \\ 0.0116 & -0.9992 & 0.0387 & 10.2668 \\ 0.7671 & 0.0337 & 0.6407 & 176.8354 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (10)$$

4.2 全局三维重建

进行大尺寸飞机的三维重建实验,以比例为 1:20 的 A320 飞机模型为待测量物体,实验现场图如图 8 所示。

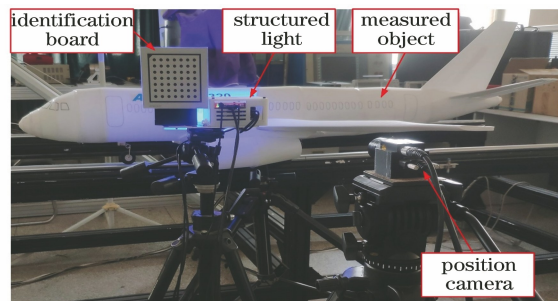


图 8 三维重建实验示意图
Fig. 8 Schematic diagram of 3D reconstruction experiment
固定定位摄像机的位置,以保证定位摄像机可以采集到结构光系统在进行飞机三维测量时每一个

位置处的标识板。利用投影仪依次投射格雷码编码的条纹图像,并利用结构光系统摄像机同步采集经飞机模型表面调制后的变形条纹图像,然后进行条纹图像的解码与空间几何信息的计算,从而完成局部区域的三维测量。依次改变结构光系统的位置,完成整个模型的三维测量。定位摄像机依次同步采集标识板在每一位置处的图像,解算定位数据 $R_p^{b,k}$ 和 $T_p^{b,k}$,并计算出 $H_p^{b,k}$ 。最后依据(8)式对局部区域的重建结果点云数据进行数据融合,获得飞机全局三维重建点云数据结果,如图 9 所示。

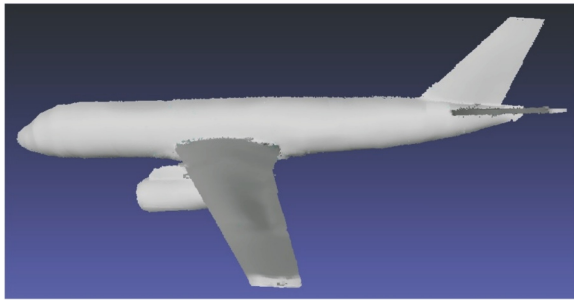


图 9 飞机全局三维重建点云数据

Fig. 9 Point cloud data of aircraft global 3D reconstruction

4.3 结果分析

通过后方视觉定位的飞机全局三维重建方法完

成了对飞机全局的三维重建,计算标识板图像关键点与空间点被重投影到同一图像中对应点之间的距离,得到重投影误差,结果如图 10 所示,平均误差为 0.17 pixel。

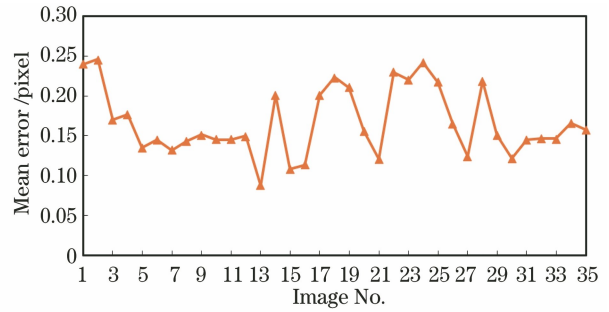


图 10 重投影误差图

Fig. 10 Reprojection error map

为了验证结构光三维重建系统的精度,将标准量块放置在标定板平面上,构成阶梯型,如图 11(a)所示,量块的台阶高度为 9 mm,图 11(b)所示为测量条纹图。拟合标定板平面并将其作为基准面,计算得到台阶每个平面的平均高度,如图 11(c)所示。每个平面上的平均高度为 9.1673 mm(平面 1)、18.1024 mm(平面 2)、27.0628 mm(平面 3)和 35.9652 mm(平面 4)。

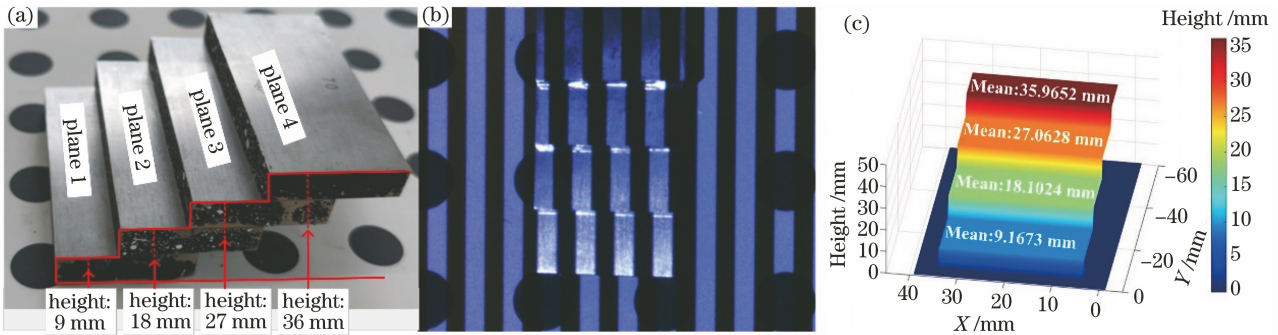


图 11 结构光三维重建精度分析。(a)阶梯量块图;(b)测量条纹图;(c)阶梯量块平均高度图

Fig. 11 Analysis of 3D reconstruction accuracy of structured light. (a) Step gauge block; (b) measured fringes; (c) average height of step gauge block

为了验证基于后方定位的飞机全局三维重建方法的点云拼接效果,对 6061 高精超平板(厚度公差为 ± 0.1 mm,平整度 $\leq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2}$)的 $500 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 范围进行三维重建,如图 12(a)所示。第一个位置的测量条纹如图 12(b)所示。将重建面点云结果拟合到平面上,计算得到点云到拟合平面的距离均方根误差(RMSE)为 0.9957 mm,如图 12(c)所示,相对于飞机蒙皮的大尺寸测量,该拼接精度可以满足实际需求。

上述分析验证了格雷码结构光三维重建的精度

可以达到亚毫米级(0.16 mm 以下),而通过拟合平面得到基于后方定位的飞机全局三维重建方法的 RMSE 为 0.9957 mm,正、负平均误差分别为 0.8954 mm 和 -0.7912 mm。本文方法相较于利用三节点光学测量传感器网络实现的大型薄壳物体内外表面数据三维重建方法^[8](正、负平均误差分别为 1.4 mm 和 -1.4 mm),以及现有的商业近红外三维重建系统 Kinect v2(精度: $2 \sim 10$ mm)、RealSense D435(精度小于 5 mm)具有更高的精度。

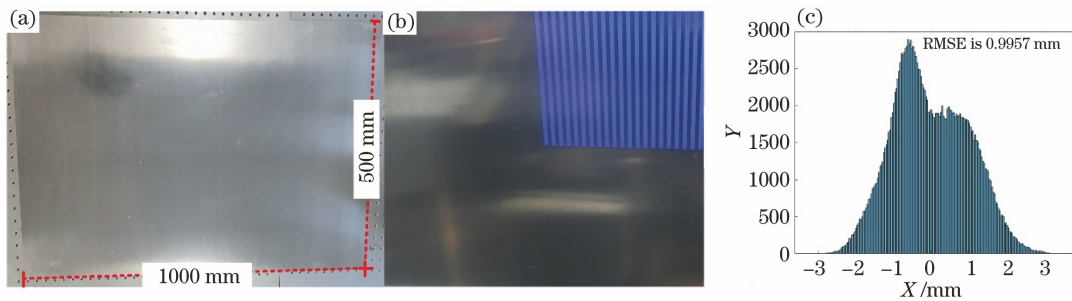


图 12 基于后方定位的全局三维重建精度分析。(a)待测平板图;(b)第一个位置的测量条纹图;(c)点云误差直方图

Fig. 12 Global 3D reconstruction accuracy analysis based on rear positioning. (a) Plate to be tested;
(b) first position of measurement fringes; (c) point cloud error histogram

4.4 点云 ICP 拼接对照实验

为了比较验证后方视觉定位的飞机全局三维重建方法的可行性,使用 Magic3D 软件的 ICP 方法对结构光重建出的局部点云数据结果进行点云拼接。ICP 迭代最近邻算法根据某种几何特性对数据进行

匹配,并设这些匹配点为对应点,根据这种对应关系计算最优刚体变换,再利用这些参数对数据进行变换,并利用同一几何特征确定新的对应关系,重复上述过程,直到满足正确配准的收敛精度要求^[17]。拼接结果如图 13 所示。

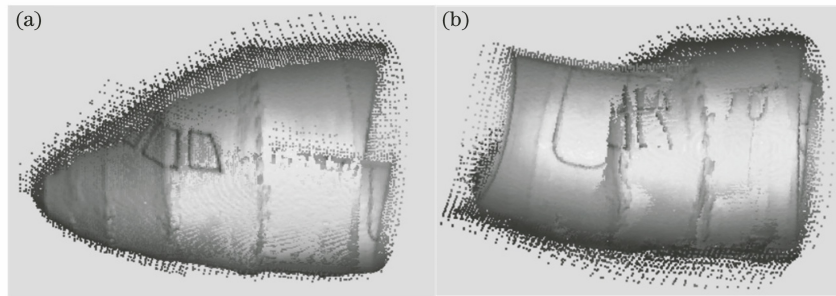


图 13 点云 ICP 拼接结果。(a)第 1, 2 位置的点云拼接结果;(b)第 1, 2, 3 位置的点云拼接结果

Fig. 13 ICP stitching results of point clouds. (a) Splicing result of point cloud at 1st and 2nd positions;
(b) point cloud stitching results at 1st, 2nd, and 3rd positions

从图 13 中可以看出 ICP 方法可以对第 1, 2 位置的点云数据进行拼接,但无法将第 3 位置的点云结果与第 1, 2 位置的点云结果进行拼接,后续位置的点云数据无法再准确拼接。分析其原因在于飞机表面特征不明显,被测区域重叠度小,几何特征不够明显,ICP 算法无法进行准确的特征匹配,计算得到的变换关系出现错误,因此无法完成点云拼接。对于局部测量时重叠度小的点云数据结果,ICP 算法无法拼接出全局结果,无法完成全局三维测量,如果增加局部测量区域的重叠度或粘贴标志点,无疑会增加繁重的测量工作量,失去了无接触、高效率三维测量的意义。

通过上述实验可知,利用后方视觉定位的飞机全局三维重建方法可完成飞机的全局三维重建。对于特征不明显的待物测,如果相邻局部测量区域重叠度小,ICP 已无法通过准确拼接获得全局三维测量结果,基于后方视觉定位的飞机全局三维重建方法是代替 ICP 进行全局测量的有效手段。

5 结 论

提出了一种基于后方摄像机进行视觉定位的大飞机蒙皮结构光三维重建方法,使用投影仪与摄像机组成的结构光系统对飞机局部区域进行三维重建。同时利用定位摄像机对结构光系统进行视觉定位,利用定位信息对局部重建结果进行位姿传递,实现三维点云数据融合,进而获得飞机全局三维重建数据。实验重建了飞机三维点云数据,并使用量块和 6061 平板对系统精度进行了评估,所得结果证明了所提方法的可行性。所提方法结合结构光具有的高精度、非接触的优势,实现了对大尺寸飞机结构快速、高精度、非接触的全局三维重建,为基于视觉的飞机蒙皮损伤检测提供了定位的方法依据,对促进飞机蒙皮检修具有重大帮助。

搭建结构光系统时需要多次标定、建立结构光系统相机坐标系与标识板坐标系的关系,且后方视觉定位存在误差,这造成了结构光系统三维重建精

度的下降,后续将展开多传感器定位方式融合的办法提高定位精度,进而提升系统整体的三维重建精度。

参 考 文 献

- [1] Tian Y F, Cao Z J, Zhao L J. Analysis and research on non-destructive testing technology of old aircraft structure corrosion [J]. China Science and Technology Information, 2012(7): 142-143.
田云飞, 曹宗杰, 赵利杰. 老龄飞机结构腐蚀的无损检测技术分析研究[J]. 中国科技信息, 2012(7): 142-143.
- [2] Shang P X, Zhou M R. Application and research of nondestructive testing technology in aircraft maintenance[J]. Science & Technology Information, 2011, 9(5): 79.
尚鹏翔, 周懋瑞. 无损检测技术在飞机维修中的应用及研究[J]. 科技资讯, 2011, 9(5): 79.
- [3] Buckhorst A F, Kluge-Wilkes A, Schmitt R H. Flying metrology and defect identification for aircraft surface inspection [J]. Photonics Views, 2019, 16(1): 68-71.
- [4] Yin S B, Ren Y J, Liu T, et al. Review on application of machine vision in modern automobile manufacturing[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815001.
尹仕斌, 任永杰, 刘涛, 等. 机器视觉技术在现代汽车制造中的应用综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815001.
- [5] Jovančević I, Larnier S, Orteu J J, et al. Automated exterior inspection of an aircraft with a pan-tilt-zoom camera mounted on a mobile robot [J]. Journal of Electronic Imaging, 2015, 24(6): 061110.
- [6] Zuo C, Zhang X L, Hu Y, et al. Has 3D finally come of age?: an introduction to 3D structured-light sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303001.
左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D真的来了吗?: 三维结构光传感器漫谈[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303001.
- [7] Reich C, Ritter R, Thesing J. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection [J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 224-231.
- [8] Liu X L, Peng X, Yin Y K, et al. 3D auto-inspection for large thin-wall object [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0312006.
刘晓利, 彭翔, 殷永凯, 等. 大尺寸薄壳物体表面的三维光学自动检测[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312006.
- [9] Xiao Y L, Wen Y F, Li S K, et al. Large-scale structured light 3D shape measurement with reverse photography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 130: 106086.
- [10] Ge Q J, Shi J L, Sun Y H. Structured light three-dimensional scene reconstruction based on binary space coding and decoding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 021509.
葛启杰, 史金龙, 孙蕴瀚. 基于二值空间编解码的结构光三维场景重建[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 021509.
- [11] Wu Z J, Guo W B, Li Y Y, et al. High-speed and high-efficiency three-dimensional shape measurement based on Gray-coded light [J]. Photonics Research, 2020, 8(6): 819-829.
- [12] Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303004.
张启灿, 吴周杰. 基于格雷码图案投影的结构光三维成像技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303004.
- [13] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [14] Ma M S, Yang X G, Li C X, et al. Accurate calibration method for non-overlapping fields of cameras based on spatial constraints[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1015003.
马玛双, 杨小冈, 李传祥, 等. 基于空间约束的非重叠视场相机精确标定方法[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1015003.
- [15] Censi A. An ICP variant using a point-to-line metric [C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 19-23, 2008, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 19-25.
- [16] Moreno D, Taubin G. Simple, accurate, and robust projector-camera calibration[C]//2012 Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission, October 13-15, 2012, Zurich, Switzerland. New York: IEEE Press, 2012: 464-471.
- [17] Wei S B, Wang S Q, Zhou C H, et al. An iterative closest point algorithm based on biunique correspondence of point clouds for 3D reconstruction [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0515003.
韦盛斌, 王少卿, 周常河, 等. 用于三维重建的点云单应性迭代最近点配准算法[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0515003.