

# 针对遮挡目标的阵列式光学测量方法及系统

卢瀚<sup>1</sup>, 马沁巍<sup>1\*</sup>, 马少鹏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学宇航学院, 北京 100081;

<sup>2</sup>上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

**摘要** 针对摄像测量应用中被测物自身结构复杂或者现场环境复杂出现前景遮挡使得目标丢失导致测量失败的问题, 将合成孔径成像与图像处理技术相结合, 提出了一种基于阵列式合成孔径成像的遮挡目标位置测量方法。总体思路为通过合成算法得到去遮挡图像, 之后识别图像中的被测物, 最后进行重建得到待测信息。考虑到标记点法被广泛应用于摄像测量中的位置观测, 将其作为研究对象, 从合成孔径成像过程中分析典型标志灰度分布, 总结现有识别方法在遮挡条件下的适用性, 提出了一种适用于合成图像特殊灰度分布规律的标记点以及对应的识别方法并验证了可行性和精度。之后, 应用所提方法开展了静态测量和动态测量实验。结果表明, 所提基于阵列式合成孔径成像的遮挡目标位置测量方法可以解决复杂结构测量和复杂环境测量时存在的前景遮挡导致标记点丢失和信息识别缺失的问题, 为摄像测量在相关应用中提升精度提供了新的手段。

**关键词** 机器视觉; 摄像测量; 遮挡; 光学合成孔径; 测量精度

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0815005

## Camera Array-Based Optical Measurement Approach and System for Occluded Targets

Lu Han<sup>1</sup>, Ma Qinwei<sup>1\*</sup>, Ma Shaopeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

<sup>2</sup>School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240

**Abstract** In this study, foreground occlusion occurs in the application of camera measurement due to the complex structure of objects or a complex scene environment, causing the target to be lost and the measurement to fail. An occlusion target position measurement approach based on array synthetic aperture imaging is developed using synthetic aperture imaging and image processing technology. The overall concept is to obtain a de-occluded image using a synthesis approach, identify the object to be measured in the image, and finally reconstruct the information to be measured. As the marker point approach is widely used in position observation in camera measurement, this study examines the gray distribution of typical markers from a synthetic aperture imaging process, summarizes the applicability of the existing recognition approaches under occlusion conditions, proposes a marker point appropriate for the special gray-scale distribution of synthetic images, and verifies the feasibility and the accuracy of the corresponding identification approach. Thereafter, the static and dynamic measurement experiments are conducted using the approach proposed in this study. The results show that the proposed occlusion target position measurement approach based on array synthetic aperture imaging can solve the challenges of marker points loss and information recognition missing due to foreground occlusion in

收稿日期: 2021-03-16; 修回日期: 2021-04-12; 录用日期: 2021-04-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11772053)

通信作者: \*maqwb@bit.edu.cn

complex structure measurement and complex environment measurement. The proposed approach offers a novel means to enhance the accuracy of camera measurement in related applications.

**Key words** machine vision; photogrammetry; occlusion; optical synthetic aperture; measurement accuracy

## 1 引言

摄像测量利用相机采集被测物运动/变形过程的图像序列,处理图像后得到几何参数、变形参数和运动参数,具有非接触、全场和观测尺度易调节等优点,广泛应用于航空航天、土木工程、体育运动等<sup>[1-4]</sup>。摄像测量过程中需要在被测物上布置合作目标或者利用被测物自身的结构特征作为非合作目标来进行追踪和识别,但被测物自身结构复杂或者现场环境复杂时,出现前景遮挡,使目标丢失,导致测量失败。例如,在可展开天线测量任务中,索网缠绕和桁架遮挡使大量标记点不可见,导致整体结构重建失败<sup>[5-6]</sup>;另如在越野滑雪测量任务中,由于视场内树木等环境遮挡,目标肢体信息缺失,无法实现对姿态的高精度测量<sup>[7]</sup>。

对上述问题,国内外学者提出了一些解决方法,思路均是基于标志运动的连续性约束或空间几何约束,通过已知信息恢复未知信息<sup>[8-9]</sup>。时间上,假设待测标记点运动轨迹在时间轴上平滑且连续,个别帧中遮挡丢失的标记点信息由相邻帧的标记点坐标拟合和插值得到。如郝肖冉<sup>[7]</sup>在测量跳台滑雪运动员轨迹时,利用相邻帧插值得到被遮挡帧的信息,但被测目标运动轨迹复杂或连续多帧标记点遮挡缺失,难以获得高精度测量结果。空间上,标记点间的位置关系已知时,个别因遮挡丢失的标记点信息可由刚性结构上其他标记点通过几何关系计算得到。如王超等<sup>[5,8]</sup>在测量环形天线的桁架展开时,利用几何约束恢复得到被遮挡的标记点,但被测标记点间位置关系不确定或有改变时无法使用。综上,利用时空约束恢复未知信息具有局限性,只能解决某些特殊的测量问题。事实上,解决上述问题可以从另一角度来考虑,即突破相机孔径的限制,使遮挡图像包含标记点的信息,达到“眼见为实”的效果。

使用多台相机阵列式成像,每台相机获得被遮挡目标的一小部分信息,通过合成算法得到所需信息。光学上用多台相机模拟一台镜头光圈足够大的相机,利用小景深去掉遮挡,即合成孔径成像<sup>[10-11]</sup>。合成孔径成像去遮挡是计算机视觉和光学

领域非常成熟的技术,相关研究集中在如何有效地整合信息提高合成图像的信噪比,即合成图像的还原质量<sup>[12-21]</sup>。但其标准不是测量,主要用于人工读取而非测量。将合成孔径图像用于测量时,虽然可以获取被遮挡标记点信息,但对于测量用途合成图像,质量很差,即灰度分布与没有遮挡时灰度分布相比发生较大变化。现有的标记点识别方法(如灰度重心法、型心法、角点识别法)均针对成像质量较好的标记点,没有考虑灰度的异常变化,直接使用并不合适。目前并没有专门针对合成孔径图像的特征识别和定位方法报道,也就更没有对算法精度进行改善的系统 and 深入的考察。

本文在对合成孔径图像灰度分布特征进行分析的基础上,系统考察了现有典型标记点识别方法在合成孔径图像分析中的精度,提出了一种专门针对合成孔径成像标记点的设计方案,之后发展与之相适应的识别定位方法和系统,最终解决了严重遮挡条件下目标识别和测量的问题,为摄像测量在相关应用中提供了一种新的手段。

## 2 理论推导

为解决被测物存在遮挡的问题时引入光学合成孔径思想。首先从成像和图像灰度分布的角度分析了合成孔径图像的特点,建立了合成孔径图像的灰度分布函数;之后从数学模型的角度系统地分析了现有识别方法对合成孔径图像的适用性,进一步地根据这些分析结果提出了现有识别方法不能适用于利用合成孔径图像进行摄像测量的观点,并提出了一种专门适用于合成孔径图像的标记点及其识别方法,并通过计算机模拟成像和实验两种手段验证了所提方法的可行性和精度;最后依据所提方法,设计并搭建了一套成本较低、可独立使用的基于光学合成孔径的被遮挡阵列式测量系统,并通过实验验证了系统的精度和可行性。

### 2.1 合成孔径图像灰度特征分析

合成孔径图像的成像物理过程如图 1 所示。一般情况的合成孔径成像模型可以变换、简化为特殊的平面相机阵列,以平面相机阵列为例,给出成像模型。平面相机阵列各相机光轴平行,光心位于同

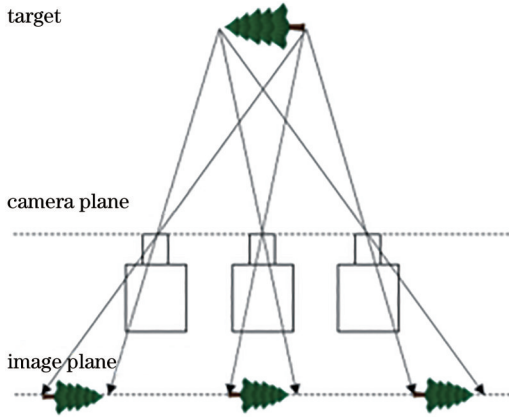


图 1 平面相机阵列成像模型及视差

Fig. 1 Imaging model and parallax of planar camera array

一个空间平面上。

图 2 为空间中一点的成像模型。其中  $O_1, O_2, O_3$  为相机光心,  $P_1, P_2, P_3$  为点  $P$  在相机的投影点,  $C_1, C_2, C_3$  为相机主点。以两台相机为例来介绍上述过程。根据中心透视成像模型可知, 空间中同一平面上的点在目标相机上的投影和在参考相机上的投影可以用单应矩阵进行转换<sup>[22-23]</sup>。相机 1 与相机 0 距离  $\Delta x$ , 两者的单应矩阵为  $H$ 。空间中一点  $P$  在相机图像上的投影关系可以表示为

$$z_{c0} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = K_0 \begin{bmatrix} R_0 & T_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $K_0, R_0, T_0$  为相机 0 的内参矩阵、旋转矩阵、平移向量;  $z_{c0}$  是点到光心的距离在光轴方向的投影; 平移向量  $T_0 = -\widetilde{C}_0 R_0$ ,  $\widetilde{C}_0$  为相机 0 的相机坐标系原点在世界坐标系的非齐次坐标, 相机 0 作为参考相机, 即相机 0 的相机坐标系视为世界坐标系。

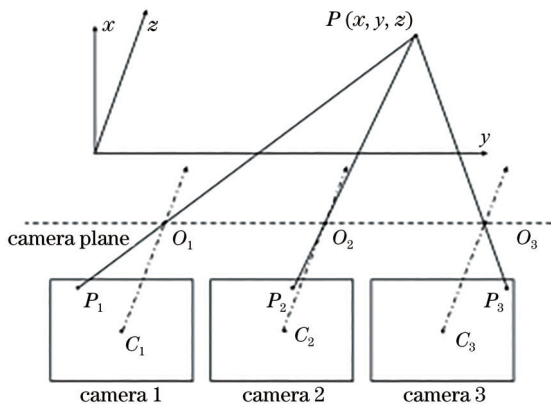


图 2 空间中一点的成像模型

Fig. 2 Imaging model of a point in space

空间平面中的点满足的关系为

$$n_0^T \widetilde{X}_{c0} + d_0 = 0, \quad (2)$$

式中:  $n_0^T$  为平面在相机 0 坐标系下的法向量;  $\widetilde{X}_{c0}$  为平面上一点分别在相机 0 和相机 1 坐标系下的非齐次坐标;  $d_0$  为平面到相机 0 坐标系原点的投影距离。

对于合成孔径成像, 成像系统采用平面相机阵列<sup>[8]</sup>, 相机共面即  $z_{c0} = z_{c1}$ , 则空间同一平面上的点在相机 1 上的投影点可以用相机 0 中的投影点表示:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = K_1 \left\{ R_1 \left[ R_0^{-1} (\widetilde{X}_{c0} + \widetilde{C}_0 R_0) \right] + T_1 \right\}. \quad (3)$$

当相机 0 和相机 1 内参矩阵相同, 光轴平行, 光心距离为  $\Delta x$  时, 则空间中同一平面上的任一点在相机 1 上的投影点坐标可以用相机 0 中的投影点表示:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = K \left( E + \frac{\Delta x \cdot n_0^T}{d} \right) K^{-1} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:  $E$  为单位矩阵。两台相机间的单应矩阵为

$$H = K \left( E + \frac{\Delta x \cdot n_0^T}{d} \right) K^{-1}. \quad (5)$$

令  $m = \frac{\Delta x \cdot f}{d_x d}$ ,  $n = \frac{\Delta y \cdot f}{d_y d}$ ,  $\Delta x, \Delta y$  为两台相机在两个方向的距离,  $d_x, d_y$  为像元尺寸,  $f$  为焦距,  $d$  为成像平面到相机平面的距离。则相机  $i$  与参考相机像素坐标之间的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & m_i \\ 0 & 1 & n_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

相机  $i$  的目标灰度分布函数和前景遮挡灰度分布函数可以分别由参考相机的目标灰度分布函数和前景遮挡灰度分布函数表示:

$$I_i(x_i, y_i) = I_0(x_0 + m_i, y_0 + n_i), \quad (7)$$

$$\widetilde{I}_i(x_i, y_i) = \widetilde{I}_0(x_0 + m_i, y_0 + n_i), \quad (8)$$

式中:  $I$  为目标图像灰度分布函数;  $\widetilde{I}$  为前景遮挡灰度分布函数。

在相机同时对前景遮挡和目标进行成像后, 相机  $i$  得到的图像灰度分布函数可以表示为

$$C_i(x_i, y_i) = I_i(x_i, y_i) \cdot T_i(x_i, y_i) + \widetilde{I}_i(x_i, y_i), \quad (9)$$

式中:  $T_i$  为前景遮挡的模板, 与遮挡的灰度分布有关, 只取 0 和 1 两个值, 即

$$T_i = \begin{cases} 0, & I_i \neq 0 \\ 1, & I_i = 0 \end{cases} \quad (10)$$

相机  $i$  的成像灰度分布函数可以用参考相机表示为

$$C_i(x_i, y_i) = I_0(x_0 + m_i, y_0 + n_i) \cdot T_0(x_0 + \tilde{m}_i, y_0 + \tilde{n}_i) + \tilde{I}_0(x_0 + \tilde{m}_i, y_0 + \tilde{n}_i) \quad (11)$$

参考相机坐标系下的相机  $i$  的图像需要通过  $H^{-1}$  单应变换得到, 则扭转后图像的灰度分布函数就表示为

$$w_i(x_i, y_i) = I_0(x_0, y_0) \cdot T_0(x_0 + \bar{m}_i, y_0 + \bar{n}_i) + \tilde{I}_0(x_0 + \bar{m}_i, y_0 + \bar{n}_i) \quad (12)$$

式中:  $\bar{m}_i, \bar{n}_i$  为两次单应变换的差值。至此得到了参考相机坐标系下各个相机的成像灰度分布函数, 根据合成孔径思想, 平面相机阵列的合成孔径图像的灰度分布函数可以表示为

$$f(x, y) = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} I_0(x, y) \cdot T_0(x + \bar{m}_i, y + \bar{n}_i) + \tilde{I}_0(x + \bar{m}_i, y + \bar{n}_i) \quad (13)$$

## 2.2 典型识别方法的适用性分析

可以看到对于合成图像, 其灰度分布的连续性被破坏, 依靠灰度连续分布的标记点特征被弱化, 基于此的识别方法将不再适用。标记点识别方法可以分为两类, 基于灰度积分的方法和基于灰度梯度的方法, 典型代表为灰度重心法和角点识别法。

### 2.2.1 灰度重心法识别精度分析

灰度重心法将图像中标记点的灰度看作“质量”, 计算灰度的“重心”并将重心的坐标看作是标记点中心。将未遮挡目标图像灰度分布函数代入灰度重心公式, 得到灰度重心理论值  $(x, y)$ :

$$\begin{cases} x = \frac{\sum_{(u,v) \in S} u \cdot f(u, v)}{\sum_{(u,v) \in S} f(u, v)} \\ y = \frac{\sum_{(u,v) \in S} v \cdot f(u, v)}{\sum_{(u,v) \in S} f(u, v)} \end{cases} \quad (14)$$

将推导得到的合成图像的灰度分布函数代入 (14) 式中, 得到合成图像的灰度重心  $(x', y')$ :

$$\begin{cases} x' = \frac{\sum_{(u,v) \in S} \left[ u \cdot \sum_{i=1}^{n_i} I_0(u, v) \cdot T_0(u + \bar{m}_i, v + \bar{n}_i) \right] + \sum_{(u,v) \in S} \left[ u \cdot \sum_{i=1}^{n_i} \tilde{I}_0(u + \bar{m}_i, v + \bar{n}_i) \right]}{\sum_{(u,v) \in S} \left[ \sum_{i=1}^{n_i} I_0(u, v) \cdot T_0(u + \bar{m}_i, v + \bar{n}_i) \right] + \sum_{(u,v) \in S} \left[ \sum_{i=1}^{n_i} \tilde{I}_0(u + \bar{m}_i, v + \bar{n}_i) \right]} \\ y' = \frac{\sum_{(u,v) \in S} \left[ v \cdot \sum_{i=1}^{n_i} I_0(u, v) \cdot T_0(u + \bar{m}_i, v + \bar{n}_i) \right] + \sum_{(u,v) \in S} \left[ v \cdot \sum_{i=1}^{n_i} \tilde{I}_0(u + \bar{m}_i, v + \bar{n}_i) \right]}{\sum_{(u,v) \in S} \left[ \sum_{i=1}^{n_i} I_0(u, v) \cdot T_0(u + \bar{m}_i, v + \bar{n}_i) \right] + \sum_{(u,v) \in S} \left[ \sum_{i=1}^{n_i} \tilde{I}_0(u + \bar{m}_i, v + \bar{n}_i) \right]} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $S$  为待识别区域;  $(u, v)$  为像素坐标。计算  $(x, y)$  与  $(x', y')$  的差值不等于零, 即合成图像得到的重心不能准确表示标记点中心坐标。可以得出, 由于合成图像的灰度分布与原图发生改变, 灰度重心法失效。

为了验证上述结论, 采用计算机模拟的方式模拟从合成孔径成像到标记点识别的全过程。建立一个  $5 \times 5$  平面相机阵列, 设定中心的相机为参考相机 0, 如图 3 所示。设定阵列中每个相机的光轴平行, 相邻的相机光心距离为 500 mm, 即相机坐标系原点相距 500 mm。假设每台相机内参相同, 焦距为 4 mm, 分辨率为  $1440 \times 1080$  像素, 像元尺寸为  $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ 。为了简化模拟过程, 没有考虑成像畸变。

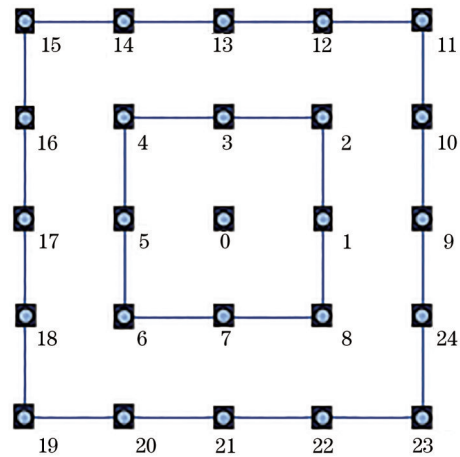


图 3 相机阵列示意图

Fig. 3 Schematic of virtual camera array

相机 0 为参考相机,首先模拟相机前方距离 4 m 处的圆形标记点靶标在参考相机中的成像,如图 4(a)所示,在相机 0 前方距离 3 m 处设置一树丛遮挡,如图 4(b)所示,两者在相机成像时,遮挡的灰度值覆盖对应像素点的标记点的灰度值,叠加成像得到图 4(c)。利用物距为 4 m 时相机 1 相对于相机 0 的单应矩阵  $H$ ,可以由图 4(a)得到相机 1 中目标物体成像图,如图 4(d)所示,利用物距为 3 m 时相机 1 相对于相机 0 的单应矩阵  $H$ ,可以得到图 4(b)在相机 1 中遮挡的成像图,如图 4(e)所示,两者同时成像,得到目标相机前景遮挡目标图,如图 4(f)所示。最后利用标记点平面的  $H$ ,对其取逆得到  $H^{-1}$ ,可以得到参考相机坐标系下目标相机的扭转图像,如图 4(g)所示。以此类推,得到全部 1~24 号相机在参考相机视角下的成像图,利用这些图得到合成图像,结果如 4(h)所示。

得到标记点的合成孔径图像后,利用灰度重心法识别图中标记点的灰度重心坐标。对比观察图 5(a)和图 5(b)所示的原始图像和合成图像灰度分布可以发现,合成图像中标记点的灰度分布相比原灰度分布发生了极大的变化,计算得到的灰度的重心坐标与标记点的理论坐标有很大偏差,如图 5(c)所示,导致测量失效。

改变参与合成的相机数量,重建不同相机数量下的合成图像,并基于这些图像利用灰度重心法识别标记点位置,以此来分析灰度重心法对合成图像的适用性。从图 6(a)可以看到,随着相机数量增加,合成图像的去遮挡效果逐渐提升,即增加相机数量后,合成图像的重建质量提高。从图 6(b)可以看出,随着相机数量的增加,灰度重心法识别结果的精度并未有明显提高,而是呈现出振荡且并未有平稳的趋势,图中曲线即为随着相机数量增加时灰度

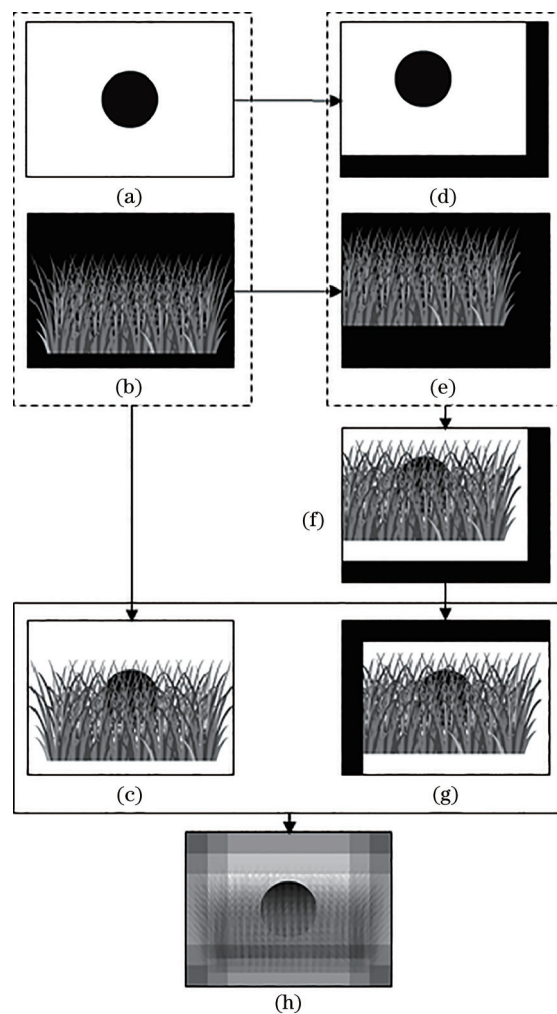


图 4 模拟合成孔径成像过程

Fig. 4 Simulated synthetic aperture imaging process

重心法识别结果的变化轨迹。计算每张合成图像识别结果的绝对误差,结果如图 6(c)所示,观察趋势可以得出,随着相机数量的增加,灰度重心法的误差并没有减小的趋势,而是在不断振荡,这与理论分析吻合,即合成图像的灰度分布变化较大,常规的灰度重心法在识别合成图像标记点中并不适用。

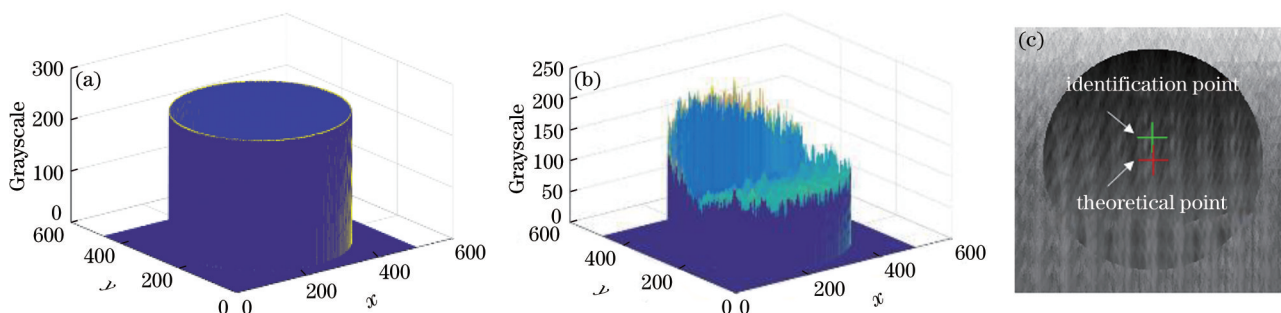


图 5 灰度重心法。(a)理想圆点灰度分布;(b)合成图像圆点灰度分布;(c)识别位置与理论值

Fig. 5 Gray centroid method. (a) Ideal dot gray distribution; (b) dot gray distribution of synthetic image; (c) recognition position and theoretical value

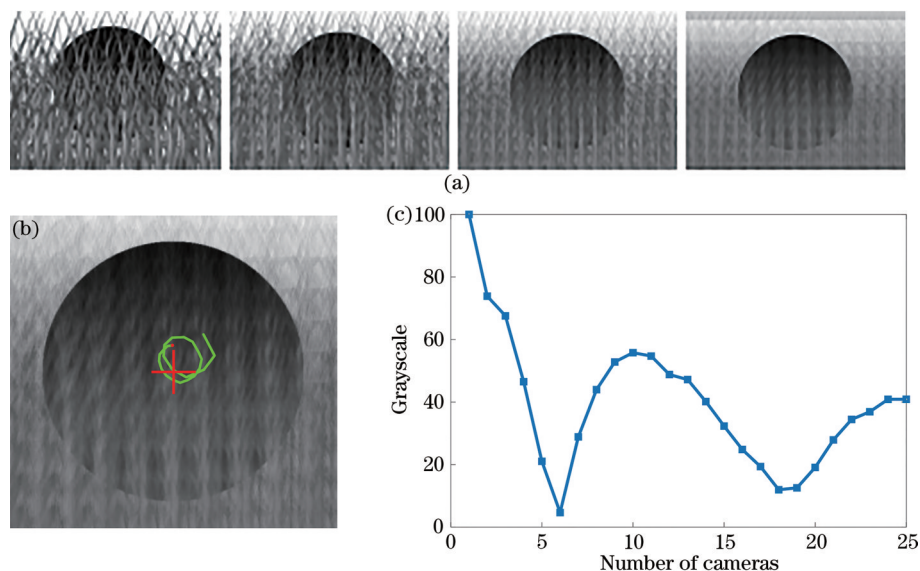


图 6 合成图像与拟合结果。(a)不同数量相机的合成图像;(b)不同数量相机的识别结果;(c)不同数量相机的识别误差  
Fig. 6 Synthetic image and fitting result. (a) Composite images with different number of cameras; (b) recognition result with different number of cameras; (c) recognition error with different number of cameras

### 2.2.2 角点识别法识别精度分析

角点识别是计算机视觉系统中用来获得图像特征的一种方法,广泛应用于运动检测、图像匹配、视频跟踪、三维建模和目标识别等领域中。角点通常被定义为两条边的交点,更严格地说,角点的局部邻域应该具有两个不同区域的不同方向的边界。角点识别法被用来检测点上的窗口移动,计算原来的窗口和移动之后的窗口对应位置像素差的平方和,如果变化不大说明这个点在物体内部;如果一个方向上变化大,另外一个方向上变化不大说明在边界上;如果任何方向上变化都很大说明这个点就是角点。算法最终思想就是计算灰度发生较大变化时所对应的位置。

$$E(u, v) = \sum w(x, y) [f(x+u, y+v) - f(x, y)]^2, \quad (16)$$

式中: $f$ 为灰度分布函数。当窗口在平坦区域上滑动,灰度不会发生变化,那么 $E(u, v)=0$ ;当窗口在纹理比较丰富的区域上滑动,灰度变化很大。常规图像中角点标记点灰度梯度特征明显,如图7(a)所示,可以准确定位灰度变化较大的位置,即为角点。截取横线位置的图像,画出截面的灰度分布,可以看到合成图像的灰度分布变化很大,如图7(d)所示,尤其是增加了很多的纹理信息,导致图7(b)合成图像中灰度梯度特征点数量大幅提升,计算机无法判断哪个特征点为真实的角点,定位失败。

同样地,模拟一个角点图像,利用角点识别算

法得到角点。可以看到对于合成孔径图像,由于灰度分布不均匀,任意方向上的窗口滑动前后都有着较大的灰度变化,位置不再唯一,即平面中有多处的灰度梯度分布符合角点要求,如图7(d)中梯度较大的位置有多处。算法得到的结果显示,在高斯窗口较小时无法得到目标角点中心位置,随窗口增大,则会识别到多个灰度梯度符合的像素点位置,无法确定目标点。图8(a)为合成图像中角点的灰度分布,图8(b)为识别结果,图8(c)为识别得到的角点数量与参与合成的相机数量的关系。相机数量越小,符合灰度梯度的角点越多,说明利用角点灰度特征的角点识别方法在合成图像中不适用。

## 3 适用于合成孔径图像的定位方法

### 3.1 理论分析

基于理论分析和模拟计算,发现由于圆形标记点的灰度分布发生变化,基于灰度积分原理的灰度重心法失效;由于角点标记点的灰度梯度发生变化,基于灰度微分原理的角点识别法失效。因此适用于合成图像的识别方法的设计原则为:避免使用灰度积分原理和小窗口的灰度梯度;由于标记点边缘的灰度特征依然存在,可以计算整个标记点图像的灰度梯度来识别标记点的边缘;采用拟合的手段得到标记点中心,得到足够多的轮廓点;最后由于灰度不均匀,边缘识别会得到不准确的标记点轮廓。对于最小二乘法拟合,

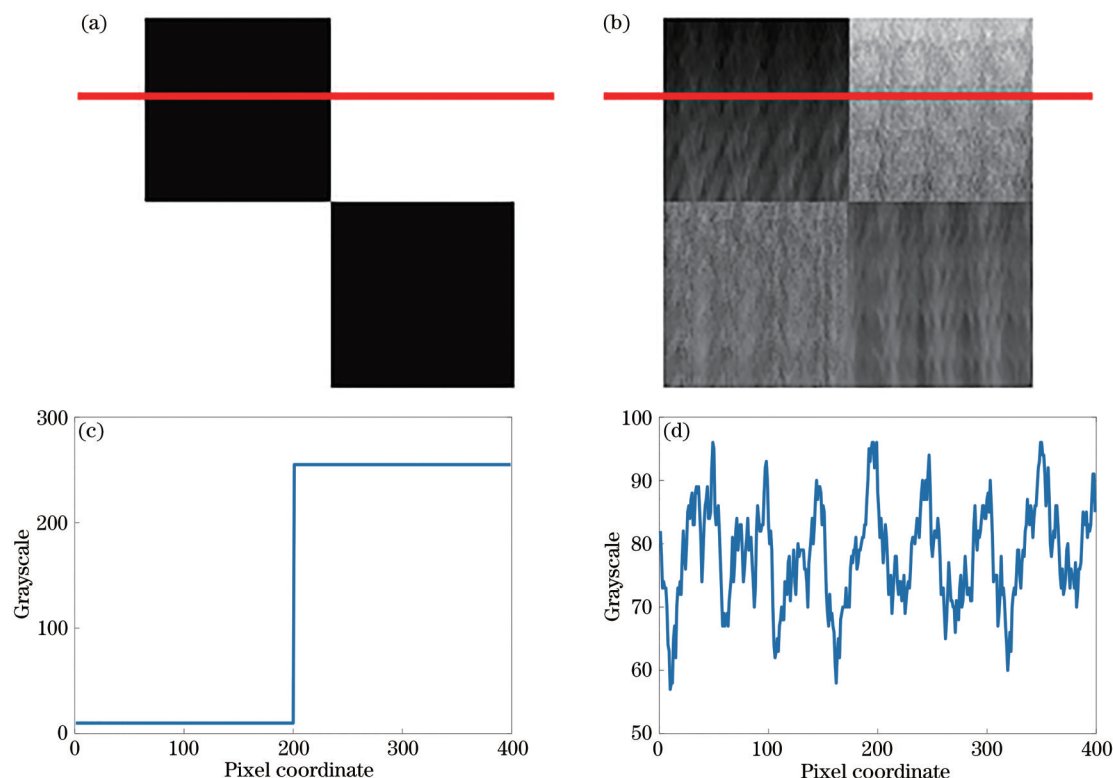


图 7 角点识别法。(a)常规图像标记点;(b)合成图像标记点;(c)常规图像灰度分布;(d)合成图像灰度分布  
Fig. 7 Corner identification method. (a) Conventional image marker points; (b) composite image marker points; (c) conventional image gray distribution; (d) composite image gray distribution

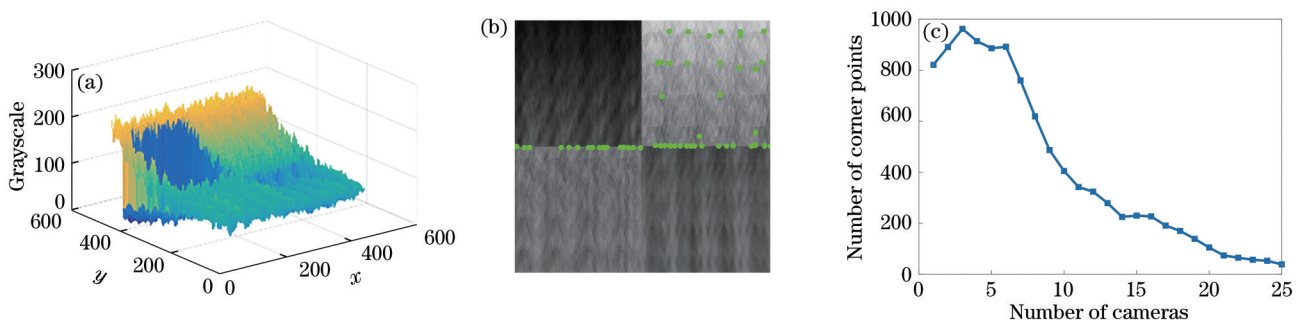


图 8 合成图像角点识别法。(a)角点灰度分布;(b)角点识别结果;(c)不同相机数量下角点识别个数  
Fig. 8 Corner recognition method of synthetic image. (a) Corner gray distribution; (b) corner recognition result; (c) corner recognition number under different number of cameras

$$f(a, b, c) = \sum (X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)^2, \quad (17)$$

式中: $f(a, b, c)$ 最小值时的 $a, b, c$ 即为目标圆的参数,可以得到以 $(-a/2, -b/2)$ 为圆心,半径为 $R = \sqrt{a^2 + b^2 - 4c} / 2$ 的目标圆。可以看到当参与拟合计算的坐标点 $(X_i, Y_i)$ 中有部分偏向某一个方向的干扰数据时,拟合结果会产生较大的误差,所以还应采用一定的优化方法计算得到最终结果。

根据这样的设计原则,选用如图 9 所示的兼具边缘特征与中心点特征的靶标是更好的方案。该靶标

为圆形,内部黑白对称分布,对称的交点为整个靶标的中心。设计的具体识别方法为:首先计算整个靶标图像的灰度梯度,识别得到靶标的内外边缘,对于识别后的图像,从外到内选取最外侧的灰度值非零点作为外轮廓,其他的灰度值非零点作为内轮廓;之后,利用外轮廓坐标数据,采用最小二乘椭圆拟合得到圆心;计算参与拟合的坐标点到圆心的距离,去除距离最大的坐标点,即去掉偏移值最大的数据;再利用删去之后的数据进行拟合得到新的圆心,重复以上操作;将相邻两次拟合的圆心之间的距离作为

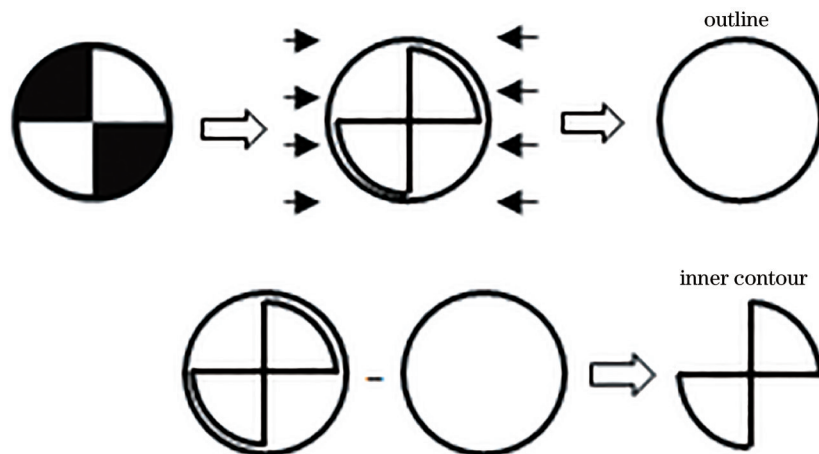


图9 内外轮廓示意图

Fig. 9 Schematic of inner contour and outer contour

目标函数,当小于一定阈值时停止迭代,最后一次拟合的圆心记为  $O_1$ ;对内轮廓采用直线拟合,选取灰度非零点最多的两条直线交点平均值作为  $O_2$ ;最后以参与拟合的坐标点数量为权值,计算  $O_1$  和  $O_2$  坐标的加权平均值,作为最终的标记点中心。

### 3.2 模拟验证

利用与第 2 节相同的成像模型和参数,模拟所使用的特征点被相同的遮挡覆盖过程,得到合成图像,如图 10 所示。利用所提方法对合成孔径图像进行处理。首先对图像进行边缘检测处理,得到轮廓图,如图 11(a)所示。对标记点外部轮廓进行最小二乘法拟合,得到圆心位置,如图 11(b)所示,右上角识别出的非圆边缘点参与了拟合计算,导致识别误差。通过多次迭代后,得到圆心  $O_1$ ,记录每次迭代后的拟合圆心并画在标记点上,得到图 11(c)的曲线,对方框内的区域进行放大,得到图 11(d),可以看到随着迭代的进行,边缘点拟合的识别结果逐渐逼近标记点中心,即当每次迭代去掉错误点后,

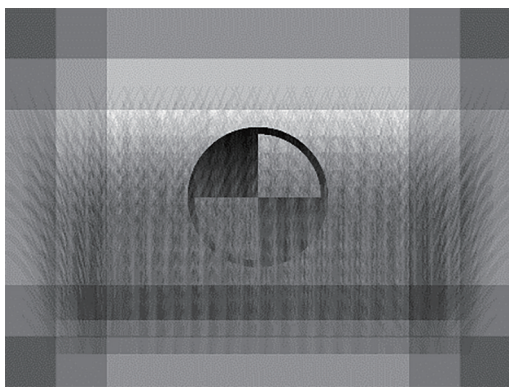


图 10 合成孔径图像

Fig. 10 Synthetic aperture image

都会提高拟合结果的精度。进一步,计算每次迭代后拟合结果与理论值的绝对误差,以迭代次数为横坐标,绝对误差为纵坐标,画出迭代次数与识别误差的关系图,如图 11(e)所示。

内部轮廓直线交点作为圆心  $O_2$ ,以  $O_1$  和  $O_2$  参与计算的坐标点数量为权值,得到两者的加权平均值,作为识别点  $O$ 。图 12(a)为合成图像中标记点的灰度分布,可以看到与理论分析吻合,内外轮廓处灰度变化明显。图 12(b)为内轮廓直线拟合得到的直线和交点,两条垂直的直线即为内部轮廓拟合得到的直线,交点作为  $O_2$ 。放大标记点中心部分,得到的结果如图 12(c)所示,图中标示出  $O_1$  和  $O_2$ 。图 12(d)为加权后的最终识别结果  $O$ 。最终结果与理论值的绝对误差为 0.64 pixel,相对误差为 0.16%,识别定位精度有很大提高。

## 4 实验结果和分析

### 4.1 观测系统

根据所提测量方法,设计并搭建了一套阵列式去遮挡测量系统。由于阵列式测量系统所需的相机数量较多,使用常用的工业相机作为图像采集设备时存在尺寸大、系统复杂和成本高等问题。以常见的大恒水星系列为例,相机加镜头的尺寸为 72 mm × 29 mm × 29 mm,相机数据线长 1 m,多台相机组成的阵列尺寸过大,其次工业相机需要经数据线连接至服务器,本文拟采用 12 台相机,控制这些相机就需要较高性能(同步触发和采集)和较大尺寸(12 个 USB3.0 接口)的服务器,这些原因使得不宜采用工业相机作为所提测量系统的成像设备。

采用的成像设备为树莓派搭载专用 CSI 接口摄



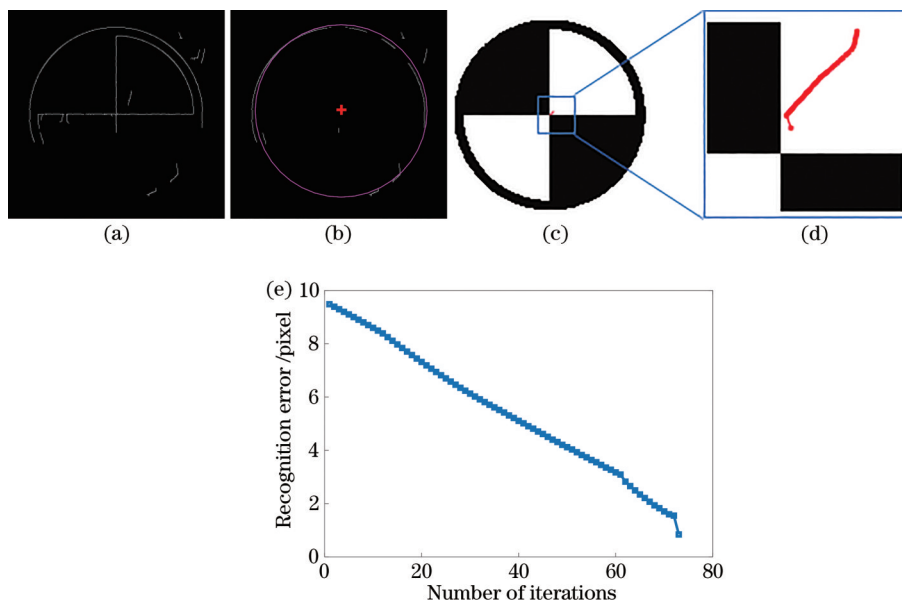


图 11 轮廓迭代法模拟。(a)轮廓图;(b)最小二乘法拟合;(c)迭代拟合圆心;(d)区域放大;(e)迭代次数与识别误差之间的关系  
Fig. 11 Contour iterative simulation. (a) Outline drawing; (b) least square fitting; (c) iterative fitting circle center; (d) area magnification; (e) relationship between iteration times and identification error

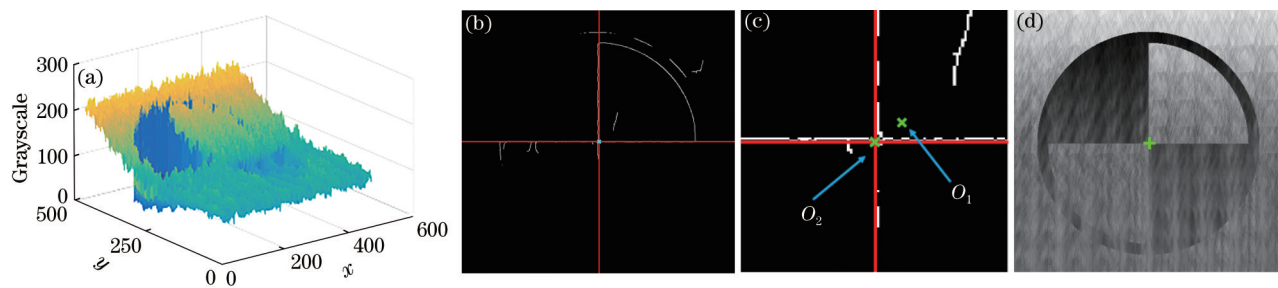


图 12 轮廓迭代法。(a)灰度分布图;(b)识别点  $O_1$  和  $O_2$ ;(c)放大图;(d)最终结果  $O$   
Fig. 12 Contour iteration method. (a) Grayscale distribution map; (b) identification points  $O_1$  and  $O_2$ ; (c) enlarged view; (d) final result  $O$

像头,如图 13 所示。树莓派 4B+ 是一款基于 ARM 的微型电脑主板,以 SD 卡为内存硬盘,卡片主板周围有 4 个 USB 接口和 1 个以太网接口,可连接键盘、鼠标和网线,同时拥有视频模拟信号的电视输出接口和 HDMI 高清视频输出接口。这些部件整合后的大小为  $80\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ,具备所有 PC 的基本功能,即不需要搭建服务器就可以采集和存储数据。其上搭载的 CSI 接口摄像头的焦距为  $4\text{ mm}$ ,尺寸为  $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ ,通过软质 CSI 排线与树莓派连接,这样就得到了一个可独立采集和存储图像的成像设备。

设计并搭建了一个树莓派摄像头模组构成的相机阵列系统,其外壳为亚克力板制成的长方体结构,内部通过支架固定每台树莓派,摄影头内嵌于前方的面板上形成三行四列的平面阵列,并通过



图 13 树莓派及 CSI 摄像头  
Fig. 13 Raspberry Pi and CSI camera

CSI 排线与各自的树莓派连接。供电方式可选用锂电池独立供电和 USB 供电,锂电池固连于每台树莓派上,USB 供电采用 USBhub 集成以实现集成化。整个阵列式测量系统的尺寸为  $360\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ,系统可以独立使用,便于搬运和搭建。

所提阵列式去遮挡测量系统的使用方式为,整个系统通过无线局域网的方式与一台 PC 组网,通过服务器上自编的程序控制所提系统。每台成像设备的采集帧率、分辨率、曝光时间、拍摄时长和触发方式等参数可以通过程序远程设定,成像设备触发后采集图像,每台成像设备得到的图像先经内存传输到树莓派的 SD 卡以保证存储速度,拍摄结束后再通过无线局域网传输到服务器上。由于每台成像设备可以独立采集和存储,所以服务器并不需要较高算力和较大尺寸,一般笔记本即可。图 14(a)为所提测量系统,图 14(b)为 USB 供电系统。



图 14 合成孔径测量系统。(a)所提测量系统;(b) USB 供电系统

Fig. 14 Synthetic aperture measurement system. (a) Proposed measurement system; (b) USB power supply system

#### 4.2 静态测量实验

为了验证所提方法的有效性,首先设计并实施了一个静态精度验证实验。实验系统包括树莓派集成相机阵列、电控平移台、激光位移计、靶标和遮挡。电控平移台平行于相机阵列,贴有标记点的靶标固定在平移台上,激光位移计垂直于靶标放置。

不均匀分布的树枝和树叶作为前景遮挡。图 15 为实验设计图和现场图。

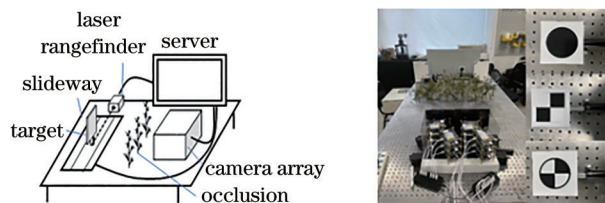


图 15 实验系统和三种标记点

Fig. 15 Experimental system and three marking points

实验中,控制电控平移台以 25 mm 为步长移动靶标(相对于图像发生了 24.94 像素位移),移动 12 次。以每次的激光位移计读数作为标准值,使用相机阵列拍摄图像,对每个位置的靶标图像进行合成孔径成像,图像分辨率为  $1440 \times 1080$  像素。分别更换圆点、角点和圆形十字作为标记点,重复以上步骤,分别对不同的标记点采用相应的识别算法,计算得到测量位移值。

图 16 展示了三种标记点的原始图像、合成孔径图像、三种方法识别得到的标记点位置。可以看到:三种标记点的合成图像的重建质量相同,即肉眼看来均较为清晰;角点识别法识别得到了多个角点,且与角点的实际位置误差较大,如图 16(c)所示;灰度重心法识别得到的标记点重心与理论位置有偏差,且每次平移后识别的重心位置不断改变,如图 16(b)所示;所提方法识别得到的结果与实际位置较吻合,且每次平移后识别位置固定,如

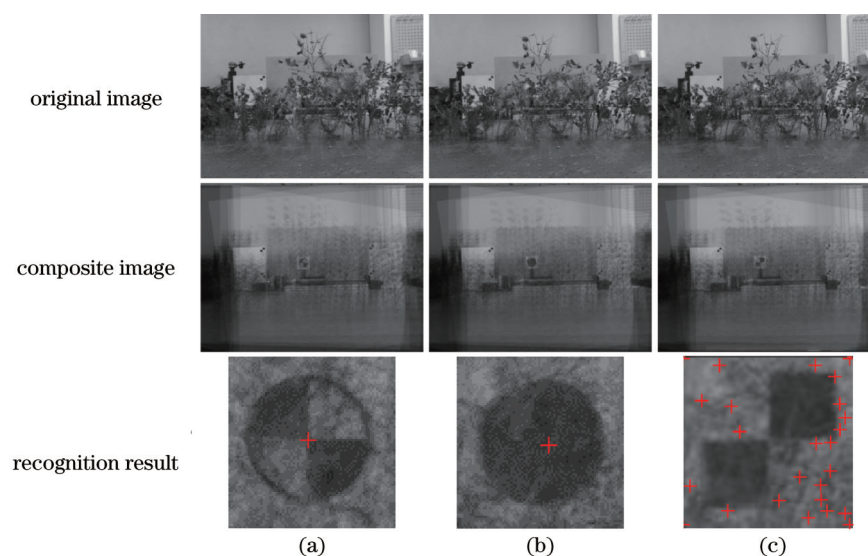


图 16 三种标记点的原始图像、合成图像和识别结果。(a)所提方法;(b)灰度重心法;(c)角点识别法

Fig. 16 Original images, composite images, and recognition results of three kinds of marked point. (a) Proposed method; (b) gray centroid method; (c) corner identification method

图 16(a)所示。

由于角点识别法识别失败,所以分别利用所提方法和灰度重心法识别得到的标记点坐标计算两组平移量,测量结果的绝对误差为测量得到的平移量与激光位移计得到的位移量的差,相对误差为绝对误差与每次激光位移计得到的位移量之比乘以百分之百。经过计算,所提方法得到的结果和标准值的平均相对误差为 1.52%,平均绝对误差为 0.38 mm;灰度重心法得到的结果和标准值的平均相对误差为 18.20%,平均绝对误差为 4.55 mm。角点识别法无法得到标记点位置。由此看来,所提方法识别精度较高且稳定。图 17 为所提方法与标准值的误差曲线和灰度重心法与标准值的误差曲线。可以看到灰度重心法的测量结果误差较大且不稳定,绝对误差最大为 7.40 mm,最小为 3.75 mm;所提方法的测量结果误差较小且稳定,绝对误差始终保持在 0.6 mm 以内。

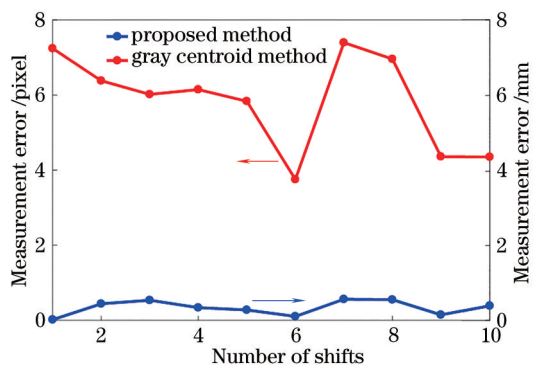


图 17 所提方法和灰度重心法得到结果的对比

Fig. 17 Comparison of the results obtained by proposed method and gray centroid method

### 4.3 动态测量实验

#### 4.3.1 单摆周期测量实验

设计了一个单摆运动的动目标测量实验。利用搭建的树莓派摄像头阵列作为观测系统,被测单摆由一根无形变的细线和一个质量均匀的物块构成,细线的一段固定在支架上,物块上贴有标记点,不均匀分布的树枝和树叶作为前景遮挡。图 18 为实验示意图。

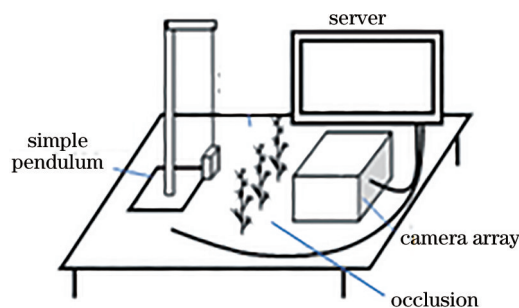


图 18 运动测量实验示意图

实验时首先在一定高度自由释放物块,使其进行单摆运动,通过服务器控制相机阵列同步采集图像并存储到树莓派内存,测量结束后,通过无线传输的方式将原始图像传输到服务器。观测系统的帧率为 40 frame/s,分辨率为 640×480 像素,拍摄时长 2 s。最后利用 12 台相机的图像序列得到合成孔径图像序列,采用所提方法识别每一帧图像上目标点位置,进而得到整个过程中物块的运动轨迹。图 19(a)为原始图像、合成孔径图像及放大后两者的物块细节图,图 19(b)为识别标记点得到的运动轨迹。

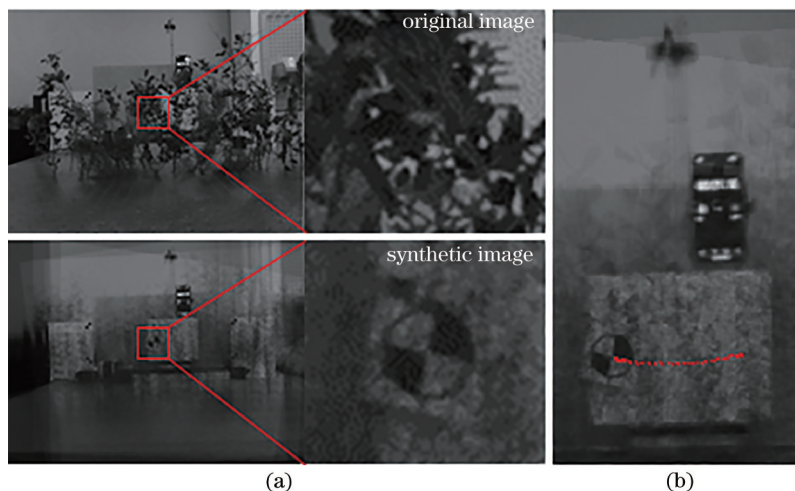


图 19 运动轨迹对比。(a)原始图像与合成图像;(b)识别结果

Fig. 19 Trajectory comparison. (a) Original image and synthetic aperture image; (b) recognition result

利用识别得到的标记点坐标,可以计算单摆位移,用三角函数拟合原始数据集,得到的单摆位移曲线如图 20 所示,进而得到单摆运动周期的测量值。

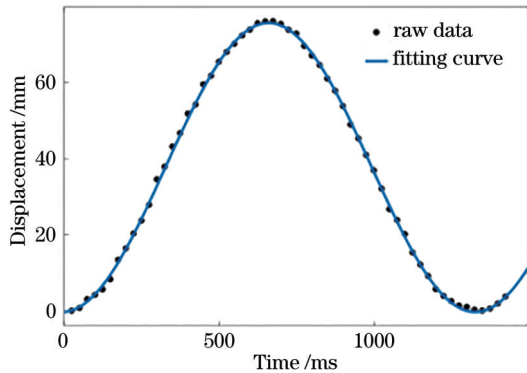


图 20 单摆位移曲线

Fig. 20 Displacement curve of simple pendulum

精确已知摆长为 420 mm,根据单摆周期公式,计算得到被测单摆的理论运动周期为 1301.64 ms。经过计算,所提方法得到的测量周期值为 1326.13 ms,和标准值的相对误差为 1.85%,绝对误差为 24.49 ms,考虑到摩擦等因素带来的误差,结果较为可信。证明所提方法在测量运动参数时也具有较高的精度和稳定性。

#### 4.3.2 桁架展开同步性测量实验

环形天线的主要支承结构为桁架机构,针对其特点设计的可展开机构模型由 8 根长度相同的斜杆和 2 根长度相同的竖杆组成,杆件之间采用旋转铰连接。同一平面的斜杆中心连接处采用旋转铰连接,以控制两根斜杆只在面内运动;每个顶点的连接处有两个相互垂直的旋转铰连接,以约束各面内斜杆间的同步运动。上层顶点与竖杆固定,下层顶点可在竖杆上进行套筒运动。如图 21 所示,每个面内斜杆之间中心进行铰接,每个顶点由限位器、2 个不共面斜杆、2 个螺栓组成。由电控平移台控制展开,结构的一侧竖杆固定在试验台上静止不动,另一侧竖杆与运动平台固定,启动电动平移台带动右侧竖杆,进而驱动结构展开。可以看到外侧节点无遮挡,而内侧的关键节点均被遮挡,首先去除外层遮挡得到内层节点,进而识别得到节点坐标,重建出内层结构的运动轨迹。

进行两组实验,一组不布置任何靶标,一组布置所提方法设计的靶标。实验步骤:对测量系统的相机间位置关系进行标定;采集帧率设定为 30 frame/s,通过程序控制每台相机同步触发,在展

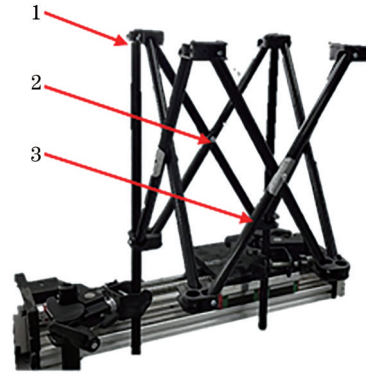


图 21 可展开桁架结构

Fig. 21 Deployable truss structure

开前开始采集;打开电动平移台开关,驱动结构展开;天线完全展开后停止采图,检查图像的有效性。

处理两组实验采集得到的图像序列。图 22(a)为没有布置靶标的原始图像和合成图像,图 22(b)为布置靶标的原始图像和合成图像。可以看到两组实验的原始图像中内层的节点均被同程度严重遮挡,无法得到有效的数据;合成图像质量相同,遮挡内层桁架的外层桁架已经被去除,内层结构较为清晰。

进一步地,对布置了靶标的一组图像使用所提方法识别靶标,得到标记点坐标;对没有布置靶标的一组图像使用灰度特征匹配方法识别被测节点自身灰度特征,得到节点坐标。图 23(a)为无靶标实验中节点在展开过程中的运动轨迹,下图为展开前后识别点位置。图 23(b)为靶标实验中节点在展开过程中的运动轨迹,下图为展开前后识别点位置。

由于左上角铰接点与试验台固定,即点 1、2、3(图 21 中标注)应以左上角铰接点为圆心进行圆周运动。对于没有使用靶标的一组,可以看到,由于被测节点与遮挡结构纹理相似,展开前后识别结果误差较大,分别拟合点 1、2、3 的运动轨迹,得到的各自的曲线与理论值相差较大,即测量失效,如图 24(a)所示。对于使用所提方法的实验,拟合得到三个同心圆,其圆心均为左上角固定铰接点,图中十字即为同心圆圆心,三条弧线为拟合的圆曲线,如图 24(b)所示。经过计算,所提方法得到的曲线 1 的半径为 3.82 mm,曲线 2 的半径为 17.20 mm,曲线 3 的半径为 31.05 mm,平均相对误差为 3.37%。可以得到结论,对于自身遮挡即遮挡物体与被测物体纹理较为相似时,所提方法可以得到较好的测量结果,而无靶标识别自身灰度特征的方法不适用。

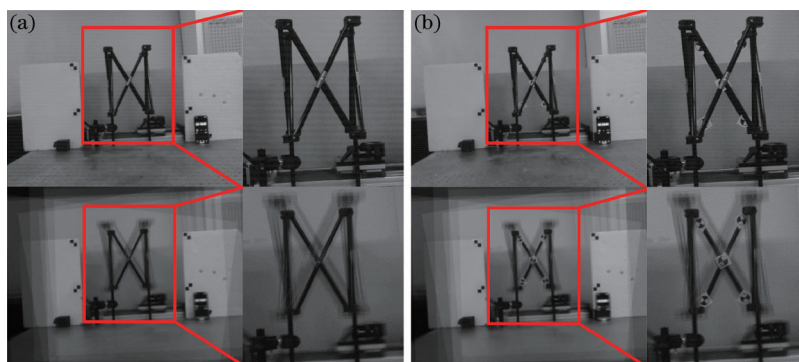


图 22 原始图像和合成图像。(a)实验 1;(b)实验 2

Fig. 22 Original images and composite images. (a) Experiment 1; (b) experiment 2

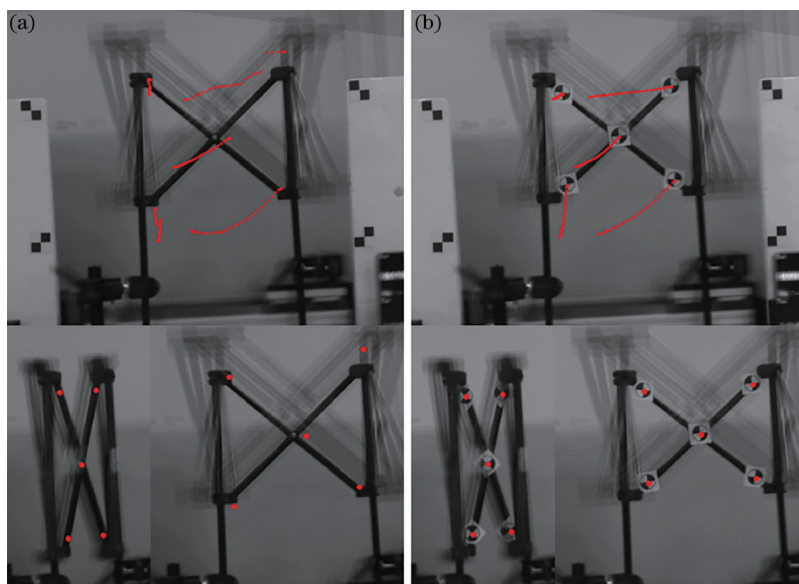


图 23 识别结果。(a)实验 1;(b)实验 2

Fig. 23 Recognition results. (a) Experiment 1; (b) experiment 2

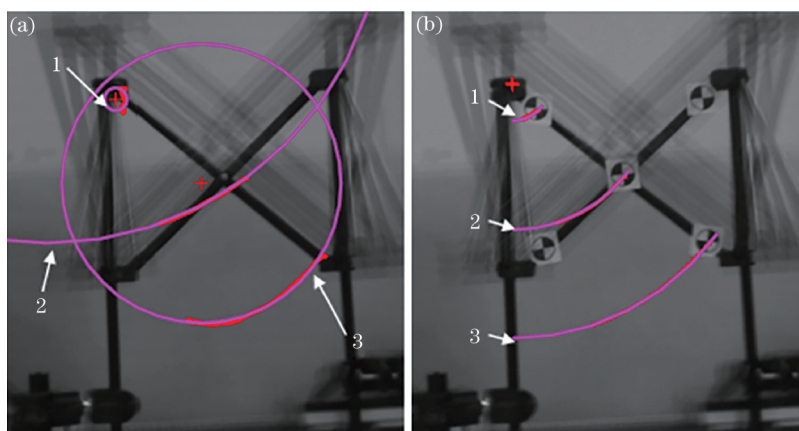


图 24 拟合曲线。(a)实验 1;(b)实验 2

Fig. 24 Fitted curves. (a) Experiment 1; (b) experiment 2

## 5 结 论

基于光学合成孔径思想,在被遮挡结构的摄像

测量方法方面开展了研究,提出了一种轮廓迭代标记点定位的测量方法。该方法对合成孔径标记点图像进行处理,利用合成图像自身特点识别标记点

内外轮廓,拟合并通过多次迭代实现标记点的定位。之后,设计并搭建阵列式合成孔径遮挡目标测量系统,利用简便的树莓派摄像头阵列实现光学合成孔径,解决了在严重遮挡时被测标记点丢失时标记点匹配准确性的问题。

在应用实例中,所提方法可以准确高效地测量被测物几何尺寸和运动参数,对比常用的灰度重心法和角点识别法,精度有明显提高。所提方法可在视场为  $1500\text{ mm} \times 1200\text{ mm}$  的范围内定位精度达到  $0.5\text{ mm}$ 。设计搭建并采用的树莓派摄像头阵列观测成本低、搭建简单方便、便于实现连续实时观测,能够为复杂结构测量任务提供支持。

### 参 考 文 献

- [1] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, et al. Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070003.  
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070003.
- [2] Shang Y, Yu Q F. A multi-function and high-leverage force for measurement and test: videometrics and its research and application progress[J]. *China Measurement & Test*, 2013, 39(1): 1-7.  
尚洋, 于起峰. 多能高效的测试新军: 摄像测量的研究及应用进展[J]. *中国测试*, 2013, 39(1): 1-7.
- [3] Shang Y, Sun X L, Zhang Y Q, et al. Research on 3D target pose tracking and modeling[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(6): 799-808.  
尚洋, 孙晓亮, 张跃强, 等. 三维目标位姿跟踪与模型修正[J]. *测绘学报*, 2018, 47(6): 799-808.
- [4] Wu J G, Shao J, Zhou G, et al. Vibration measurement of thin-walled parts based on binocular vision and matching and tracking of features[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101103.  
伍济钢, 邵俊, 周根, 等. 基于双目视觉与特征匹配跟踪的薄壁件振动测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 101103.
- [5] Wang C. Camera array high time/space resolution camera measurement method and system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2020: 48-51.  
王超. 相机阵列式高时/空分辨摄像测量方法及系统[D]. 北京: 北京理工大学, 2020: 48-51.
- [6] Hu H Y, Tian Q, Zhang W, et al. Nonlinear dynamics and control of large deployable space structures composed of trusses and meshes[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(4): 390-414.  
胡海岩, 田强, 张伟, 等. 大型网架式可展开空间结构的非线性动力学与控制[J]. *力学进展*, 2013, 43(4): 390-414.
- [7] Hao X R. Measurement method and system of athletes' posture in outdoor competition[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2020: 22-24.  
郝肖冉. 室外竞技状态下运动员姿态测量方法及系统[D]. 北京: 北京理工大学, 2020: 22-24.
- [8] Wang W, Yu Z J, Guo Y, et al. Study on the occlusion problem in dynamic space intersection measurement with multi-camera systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0415003.  
王伟, 于之靖, 郭寅, 等. 多摄像机空间交会动态测量中遮挡问题的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0415003.
- [9] Zhou W, Tang H L, Li G D, et al. DDAT target tracking algorithm based on occlusion detection mechanism[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(24): 241501.  
周维, 唐华龙, 李观德, 等. 基于遮挡检测机制的 DDAT 目标跟踪算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(24): 241501.
- [10] Vaish V, Wilburn B, Joshi N, et al. Using plane parallax for calibrating dense camera arrays[C]// Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 27-July 2, 2004, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2004: 8161383.
- [11] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, et al. High performance imaging using large camera arrays[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 765-776.
- [12] Tang J, Wang K Q, Zhang W, et al. Deep learning based image restoration method of optical synthetic aperture imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2111001.  
唐隼, 王凯强, 张维, 等. 一种基于深度学习的光学合成孔径成像系统图像复原方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2111001.
- [13] Qian W T, Li H, Wu Y T. Synthetic-aperture occlusion removal algorithm using microlens array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111027.  
钱文彤, 李晖, 吴云韬. 基于微透镜阵列的合成孔径去遮挡算法研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111027.
- [14] Xiang Y Y, Liu B, Li Y Y. Synthetic aperture imaging method based on confocal illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0811003.

- 项祎祎, 刘宾, 李艳艳. 基于共焦照明的合成孔径成像方法[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0811003.
- [15] Liu Y Y S, Liu B, Pan J X. Synthetic aperture imaging algorithm via foreground removing[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0611002.
- 刘严羊硕, 刘宾, 潘晋孝. 基于前景移除的合成孔径成像算法[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0611002.
- [16] Zhou Z L, Yuan Y, Bin X L, et al. Enhanced reconstruction of partially occluded objects with occlusion removal in synthetic aperture integral imaging [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(4): 041002.
- [17] Joshi N, Avidan S, Matusik W, et al. Synthetic aperture tracking: tracking through occlusions[C]// 2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision, October 14-21, 2007, Rio de Janeiro, Brazil. New York: IEEE Press, 2007: 9849062.
- [18] Zhang X Q, Zhang Y N, Yang T, et al. Synthetic aperture photography using a moving camera-IMU system[J]. Pattern Recognition, 2017, 62: 175-188.
- [19] Pei Z, Zhang Y N, Yang T, et al. A novel multi-object detection method in complex scene using synthetic aperture imaging[J]. Pattern Recognition, 2012, 45(4): 1637-1658.
- [20] Chen W H, Zhang X D, Liu X L, et al. Optical design and simulation of a compact multi-aperture camera based on a freeform microlens array[J]. Optics Communications, 2015, 338: 300-306.
- [21] Yang T, Li J, Yu J, et al. Multiple-layer visibility propagation-based synthetic aperture imaging through occlusion[J]. Sensors, 2015, 15(8): 18965-18984.
- [22] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [23] Zeinik-Manor L, Irani M. Multiview constraints on homographies[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(2): 214-223.