

单像素几何矩探测运动物体定位技术 (特邀)

查林彬^{1,2}, 时东锋^{1,2,3*}, 黄 见^{1,2,3}, 王英俭^{1,2,3}

- (1. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;
2. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室,
安徽 合肥 230031; 3. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037)

摘 要: 针对快速实时定位运动物体的需求, 提出了一种使用几何矩探测的单像素快速定位运动物体的方法。该方法的核心是通过探测运动物体的质心实现快速定位运动物体。根据几何矩性质构造 3 个几何矩照明光, 并照射运动物体, 利用单像素探测器收集运动物体与调制光相互作用后的反射或透射光的强度值。根据单像素成像理论, 探测强度值与物体的零阶和一阶几何矩值相对应。标识物体位置的质心参数可由物体的零阶和一阶几何矩值获取。结合数字微镜调制器 (DMD) 和时间抖动的方法产生几何矩照明光, 利用所提方法在不成像的前提下分别实现了帧频约为 500 fps 和 1 000 fps 运动物体定位。所提方法获取质心的误差在 1.63 个像素以内, 均方误差为 0.118 3 个像素。文中所提方法为使用单像素探测器实现快速追踪运动物体提供了一种新思路。

关键词: 单像素成像; 质心; 几何矩

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20211060

Geometric moment detection with single-pixel for moving object localization (*Invited*)

Zha Linbin^{1,2}, Shi Dongfeng^{1,2,3*}, Huang Jian^{1,2,3}, Wang Yingjian^{1,2,3}

- (1. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 3. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China)

Abstract: In response to the demands of fast real-time positioning of a moving object, a single-pixel fast moving object positioning method using geometric moment detection was proposed. The key to the approach was to locate the moving object by detecting the centroid of the moving object. According to the properties of geometric moments, three geometric moment illumination lights were constructed and illuminated the moving object. A single-pixel detector was used to collect the intensities of the reflected or transmitted light after the moving object interacted with the modulated light. According to the theory of single-pixel imaging, the detected intensity values corresponded to the zero-order and first-order geometric moment values. The centroid that identified the object position parameter could be obtained by corresponding calculations from the zero-order and first-order geometric

收稿日期: 2021-07-21; 修订日期: 2021-09-25

基金项目: 中国科学院青年创新促进会 (2020438); 安徽省先进激光技术实验室青年基金 (20192201); 中国科学院科技创新重点实验室基金 (CXJJ-20S028)

作者简介: 查林彬, 男, 博士生, 主要从事光信息获取与处理方面的研究。

导师简介: 王英俭, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 研究方向为光波和图像大气传输及自适应光学相位校正、激光雷达大气探测等。

通讯作者: 时东锋, 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学成像方面的研究。

moment values. The proposed method could reach an approximately frame rate of 500 fps and 1 000 fps to position a moving object without imaging. The error of the centroid obtained by the proposed method was within 1.63 pixels, and the mean square error was 0.118 3 pixels. The proposed method provided a new way for tracking of a fast-moving object.

Key words: single-pixel imaging; centroid; geometric moment

0 引 言

运动物体的定位跟踪在很多领域有重要应用,例如生物医学细胞跟踪,设备监控和人机交互等。传统的物体跟踪方法一般采用高分辨高帧频的面阵探测器捕获运动物体的序列图像,然后利用图像处理算法由捕获的序列图像提取物体的运动轨迹^[1-2]。当追踪快速运动物体时,需要使用高速相机,但高速相机所产生的图像数据量非常庞大,实时处理还需要辅助外设备。并且高速相机在一些不可见波段无法工作或者造价昂贵,例如红外、太赫兹波段等。这些因素限制了传统基于面阵成像方法追踪运动物体的应用范围。

近年来,一种与面阵成像完全不同的成像技术——单像素成像成为研究热点。单像素成像方法使用调制结构光照射目标物体,物体反射或透射的光经单像素探测器获取总强度值,利用调制散斑和探测总强度值之间的相关运算重建物体的图像信息^[3-4]。由于单像素探测器具有响应波谱宽和灵敏度高的优点,所以单像素成像方法在一些面阵探测器无法有效工作或者造价昂贵的波段具有显著优势^[5]。

对于单像素成像追踪运动物体的方法主要分为两种:第一种与传统的追踪方法类似,通过重建连续图像,由连续图像分析运动物体的轨迹^[6-7]。然而受单像素成像帧频的限制,该方法不能实现快速定位跟踪;第二种方法,不重建连续图像,直接获取目标物体的运动轨迹,可以大幅度减少所需的照明散斑数,从而提高跟踪帧频^[8-11]。

文中提出一种利用单像素探测器通过测量物体的零阶和一阶几何矩值获取运动物体的质心,从而实现快速定位运动物体的方法。所提方法仅用 3 张几何矩散斑调制入射光,单像素探测器收集得到的反射强度值与物体的零阶和一阶几何矩值相对应。由探测强度值经相应计算得到表征物体位置的质心参数。使用所提方法开展了仿真验证和实验验证,在实

验中分别实现了帧频约为 500 fps 和 1 000 fps 的运动物体定位。

1 原理和方法

单像素成像利用一系列照明散斑 $S_n(x,y)$ 照射目标物体 $f(x,y)$,目标物体反射或透射的强度信号被单像素探测器所接收。探测得到的强度值 I_n 可以表示为:

$$I_n = \sum_{x,y} f(x,y)S_n(x,y) \quad (1)$$

式中: n 为照明散斑的索引值。根据参考文献[12],在二维空间内,物体的 $(p+q)$ 阶几何矩 m_{pq} 可以定义为:

$$m_{pq} = \sum_{x,y} x^p y^q f(x,y) \quad (2)$$

对比公式(1)、(2),当 3 个照明散斑 $S_n(x,y)(n=1,2,3)$

$$\text{分别满足 } S_1(x,y) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, S_2(x,y) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \cdots & N \\ 1 & 2 & \cdots & N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 2 & \cdots & N \end{bmatrix}$$

$$\text{和 } S_3(x,y) = \begin{bmatrix} N & N & \cdots & N \\ N-1 & N-1 & \cdots & N-1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \text{ 时, 由单像素}$$

探测器探测得到的强度值 $I_n(n=1,2,3)$ 分别与物体的零阶 m_{00} 和一阶几何矩值(m_{10}, m_{01})相对应。根据几何矩的性质构造非正交基照明散斑。由调制信息 $S_1(x,y), S_2(x,y)$ 和 $S_3(x,y)$ 生成的散斑称为几何矩散斑,如图 1 所示。标识运动物体位置的质心 (x_c, y_c) 可以通过零阶和一阶的几何矩值计算得到。计算公式表示为:

$$x_c = I_2/I_1 \quad (3)$$

$$y_c = I_3/I_1 \quad (4)$$

经上述理论分析,仅用 3 张几何矩散斑调制入射光,照射到目标物体上,单像素探测器所接收的反射或透射强度值与零阶和一阶几何矩值相对应,由此获

取表征运动物体位置的质心参数。由于获取每帧物体位置所需的散斑数少,所以利用文中方法可实现高帧频实时运动物体定位。

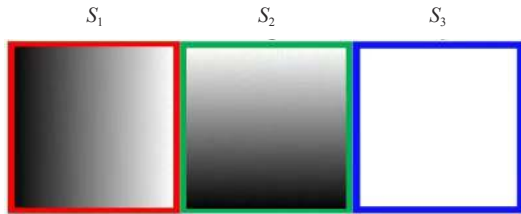


图 1 几何矩散斑

Fig.1 Geometric moment patterns

2 仿真验证

为了验证该方法的可行性,首先开展了仿真计算。在单像素成像的过程中,由于噪声的存在会影响所得实验结果的准确性。而在整个单像素成像系统中,噪声主要来自于单像素探测器,一般分为读出噪声、背景噪声、背景光子噪声以及离散采样误差等^[13]。仿真选择加入高斯噪声来模拟单像素探测器中的噪声模型。

为了衡量高斯噪声的大小,选用峰值信噪比来评估噪声的强弱。峰值信噪比 PSNR 的表达式为:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) \quad (5)$$

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \quad (6)$$

式中: MAX 表示图像灰度的最大值; MSE 为均方误差。选用质心误差 (Centroid Estimation Error)^[14] 作为检验获取质心准确性的参数,用来表征计算质心位置 (x_c, y_c) 与真实质心位置 (无噪声无背景情况下质心的位置 (x_0, y_0)) 的距离之差。其数学表达式为:

$$CEE = \sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2} \quad (7)$$

图 2 展示了两种仿真场景。图 2(a) 表示物体在一个均匀的背景,此时为无噪声均匀背景的理想情况,此时的质心位置作为真实质心位置,图 2(b) 为复杂背景,图 2(c) 表示物体处在图 2(b) 的复杂背景中。3 张图像的空间分辨率均为 256×256 , 分别对两种场景进行仿真计算。不同信噪比下的质心误差结

果如图 3 所示,图中绿色线是物体在均匀背景情况下的结果,蓝色线是复杂背景下的结果。对比仿真结果,可以看出随着峰值信噪比不断提高,质心误差 CEE 不断减小。当峰值信噪比小于 40 dB 时,质心误差 CEE 随着峰值信噪比的增大明显减小,而当峰值信噪比大于 40 dB 时,质心误差 CEE 减小趋势逐渐趋于平稳,稳定在两个像素以内。

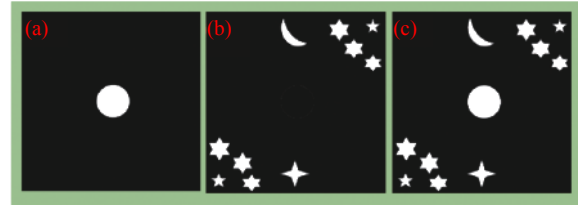


图 2 仿真场景。(a) 目标物体; (b) 复杂背景; (c) 在复杂背景中的目标物体

Fig.2 Simulation scenes. (a) Target object; (b) Complex background; (c) Target object in complex background

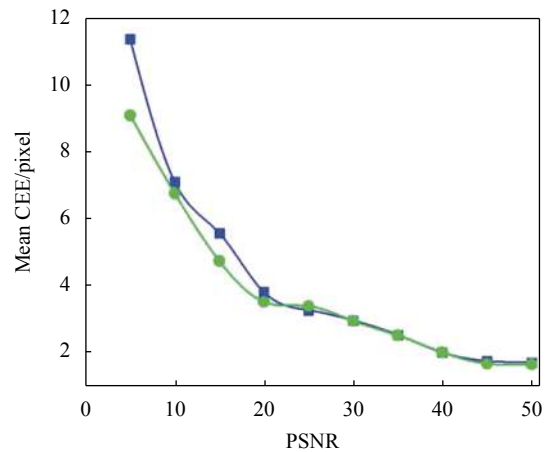


图 3 质心误差随峰值信噪比变化曲线图

Fig.3 Graph of centroid estimation error versus peak signal-to-noise ratio

3 实验验证

根据文中所提方法,搭建相应的实验系统,系统组成如图 4 所示,LED 为发光二极管,DMD 为数字显微镜装置,PMT 为光电倍增管,IPC 为工控机。在照射端,使用 LED(M530L4-C1, thorlabs) 为光源。数字显微镜装置 (DMD, Texas Instruments Discovery V7000, 22.7 kHz) 为空间光调制器,用于将照明散斑投影到实验场景中。实验场景中运动物体距离照射端约 2 m,光源发

出的光经过 DMD 调制后,经焦距为 125 mm 的投影镜头照射到运动物体上,物体反射光经焦距为 100 mm 的聚焦透镜被接收端的单像素探测器 (PMM002, thorlabs) 所接收。高速数据采集装置 (M4i-2218, Spectrum, 1.25 GS/S) 将单像素探测器采集得到的信号进行量化采样后传入计算机进行处理。由于 3 张几何矩散斑是灰度散斑, DMD 对灰度散斑的调制频率比较低,为了充分发挥 DMD 较高的二进制散斑调制频率的优势,将 3 张灰度几何矩散斑按时间抖动的方法分解成 17 张二进制几何矩散斑^[15]。实验中所用的二进制几何矩散斑的空间分辨率均为 256×256。实验分为两组:(1) 与传统成像方法的对比实验 (~500 fps); (2) 高帧频下运动物体追踪实验 (~1 000 fps)。

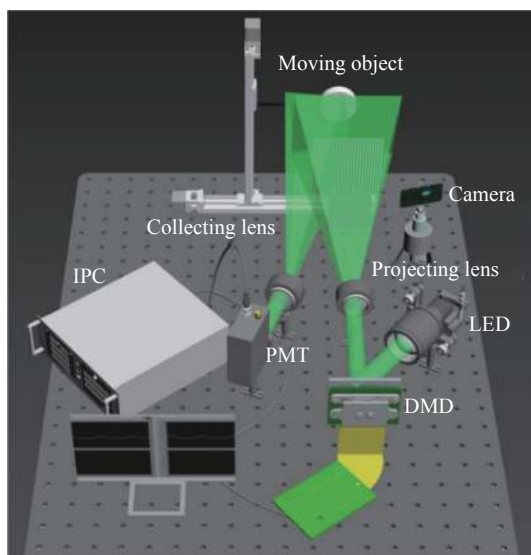


图 4 实验系统图

Fig.4 Experimental system diagram

第一组实验中运动物体为直径 50 mm 的漫反射纸。二维电动平台可承载漫反射纸按照不同的轨迹运动。图 5(a)~(d) 给出了追踪做直线运动的物体的实验结果。为了评估实验结果的准确性,在追踪过程中,同时利用相机 (240 fps, iPhone) 捕获运动物体的序列图像,然后通过质心算法^[16]由序列图像分析出物体的运动轨迹。图 5(a) 为文中方法和利用相机拍照方法所获得的实验结果,其中黑色虚线是由序列图像分析出质心运动轨迹,红色实线是利用文中所提方法实时探测物体质心的运动轨迹。从轨迹图可以看出,文中方法所获取物体质心的轨迹与图像法求出的质心

轨迹基本吻合。质心的横纵坐标变化曲线如图 5(c) 和 (d) 所示,图 (d) 为文中方法获取的物体质心轨迹与利用图像法所得轨迹之间的误差曲线,横轴为相机捕获的帧频数,纵轴为质心位置误差 CEE。结果表明与传统图像法获取的质心相比,所提方法实时探测运动物体的质心误差最大不超过 1.63 个像素,并且大多数帧的误差均在 1 个像素以内,均方误差为 0.118 3 个像素。实验结果证明了文中所提方法的准确性,且该方法获取质心的实时帧频约为 500 fps。接着开展了对不规则运动的磁铁 (47 mm×17 mm×4 mm) 的追踪实验。图 6(a)~(c) 为相应的实验结果。视频同时记录了磁铁的运动过程和相应的实时探测过程。图 (a)

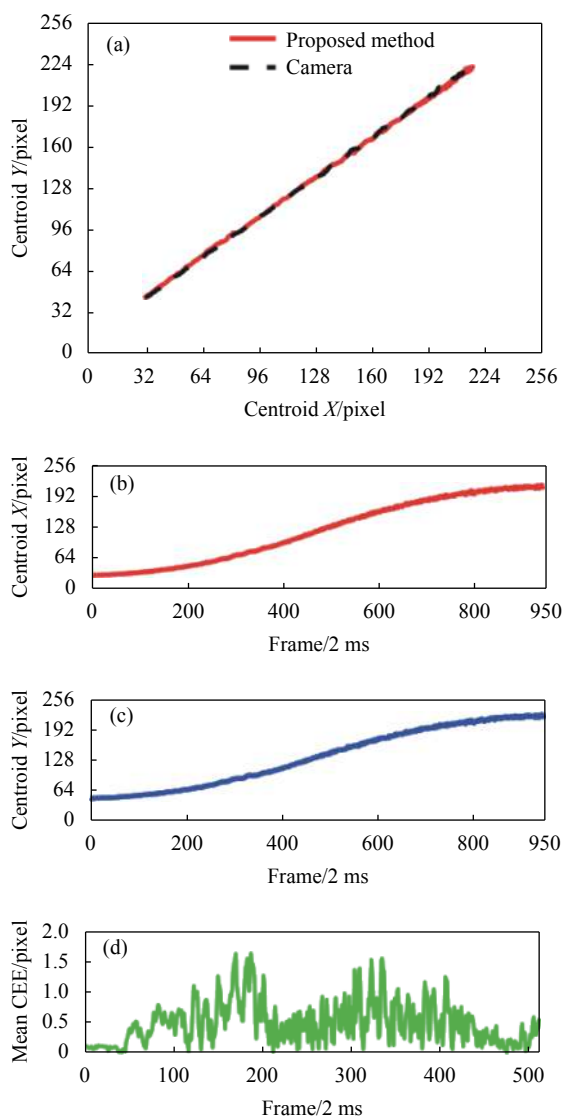


图 5 帧频约 500 fps 下对比实验结果

Fig.5 Comparative experimental results with a frame rate ~500 fps

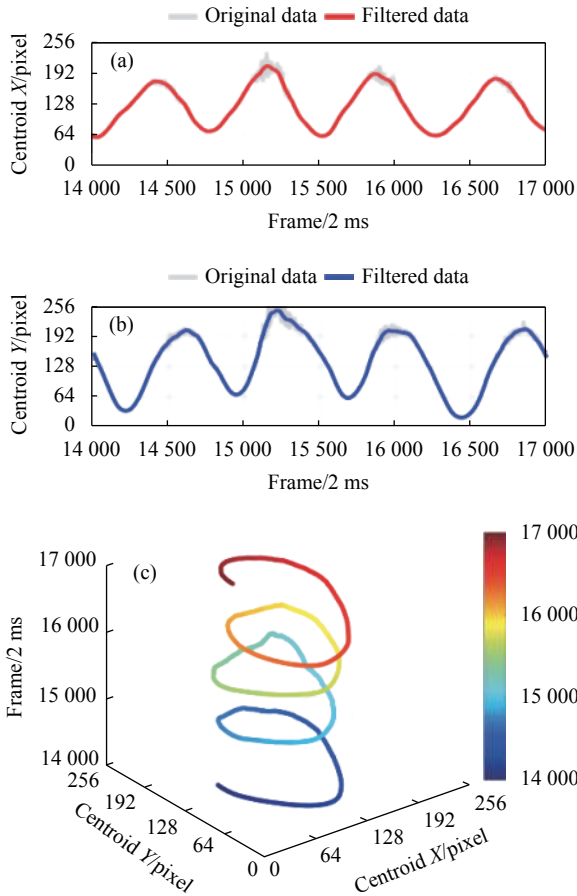


图 6 帧频约 500 fps 下追踪运动磁铁实验结果

Fig.6 Experimental results of tracking a moving magnet at a frame rate ~500 fps

和 (b) 为物体质心的横纵坐标从 14 001~17 000 帧的变化过程, 由于受到探测噪声的影响, 实时探测得到的质心坐标会有所波动, 图中灰色线为原数据, 红蓝色线是滤波后数据。为减小噪声干扰波动, 采用中值滤波去除原数据中误差较大的点。根据滤波后数据描绘出磁铁从 14 001~17 000 帧的运动轨迹, 见图 (c)。图 7 截取了视频中磁铁开始运动时的 4 个场景。以图中方形光斑的左下顶点为原点建立直角坐标系, 从图中可以看出, 实时探测得到的质心横纵坐标的变化趋势与物体的实际运动趋势相吻合。当磁铁在运动过程中发生不规则变化时, 利用所提方法依然能追踪运动磁铁。

第二组实验中, 运动物体为无人机模型(50 mm×50 mm×27 mm), 设置获取质心的帧频约为 1 000 fps。图 8(a)~(c) 为获取的实验结果。图 8(a)、(b) 为小无人机质心横纵坐标从 3 001~6 000 帧的变化曲线。与第一组实验相似, 为减少探测噪声带来的波动, 采用中值滤波方法对原数据进行处理, 图中灰色线为原数据, 红蓝色线为滤波后的数据。图 (c) 为根据滤波后的质心横纵坐标描绘出无人机模型从 3 001~6 000 帧的运动轨迹。视频同时记录了无人机模型完整的运动过程和相应的探测过程。图 9 截取了视频中无人机模型开始运动时的两个场景, 且计算质心横纵坐标的变化趋势与无人机模型位置的变化趋势相吻合。

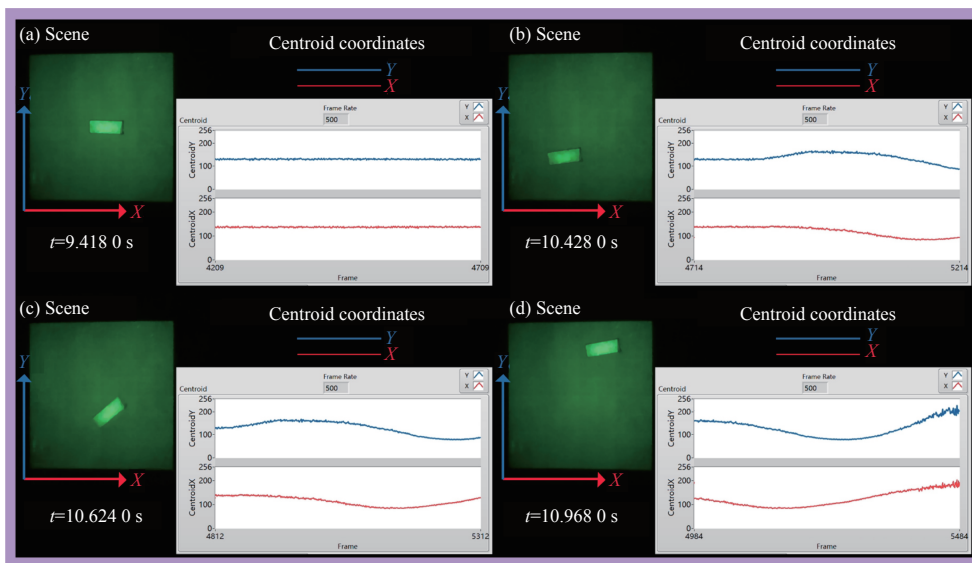


图 7 帧频约 500 fps 下追踪实验场景

Fig.7 Tracking experimental scenes with a frame rate ~500 fps

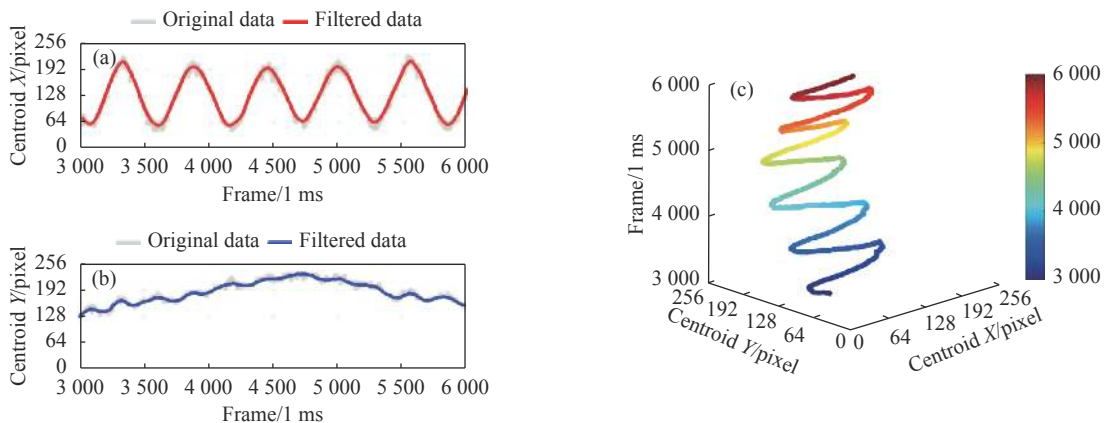


图 8 帧频约 1 000 fps 下追踪无人机实验结果

Fig.8 Experimental results of tracking a moving drone model at a frame rate of ~1 000 fps

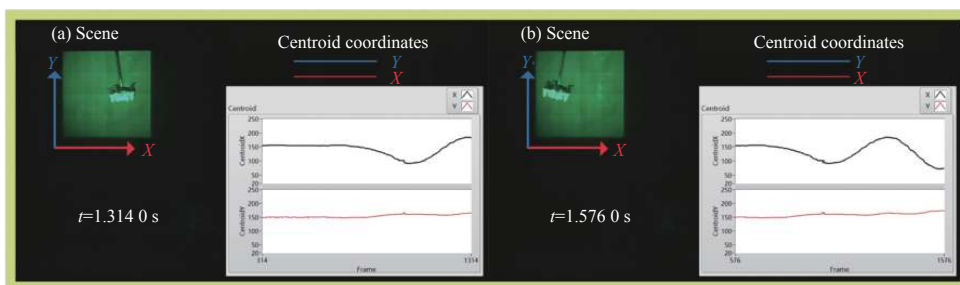


图 9 帧频约 1 000 fps 下追踪实验场景

Fig.9 Tracking experimental scenes with a frame rate ~1 000 fps

4 结 论

文中提出了一种利用单像素探测器通过测量零阶和一阶几何矩值来获取运动物体的质心,以此来定位运动物体的方法。在探测过程中,仅用 3 个几何矩散斑对光源进行调制,照射到运动物体上,由单像素探测器接收的透射或反射强度值来计算运动物体的质心。利用该方法分别实现了帧频约为 500 fps 和 1 000 fps 的运动物体定位。计算质心误差在 1.63 个像素以内,均方误差为 0.118 3 个像素,证明了文中算法的准确性。文中所提方法使用时间抖动^[15]的方法来生成二进制几何矩散斑。当然还可以利用空间抖动的方法来实现更高帧频的运动物体跟踪^[17]。不仅如此,文中方法无需先验知识也不受物体运动类型的影响,在快速定位跟踪运动物体领域具有一定的使用价值。

参考文献:

[1] Wei M S, Xing F, You Z. A real-time detection and positioning

method for small and weak targets using a 1D morphology-based approach in 2D images [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 7(5): 18006.

[2] El-Desouki M, Deen M J, Fang Q Y, et al. CMOS image sensors for high speed applications [J]. *Sensors*, 2009, 9(1): 430-444.

[3] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 13-20.

[4] Sun B Q, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors [J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844-847.

[5] Stantchev R I, Yu X, Blu T, et al. Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2535.

[6] Magana-Loaiza O S, Howland G A, Malik M, et al. Compressive object tracking using entangled photons [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102: 231104.

[7] Sun S, Lin H Z, Xu Y K, et al. Tracking and imaging of moving objects with temporal intensity difference correlation [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27851-27862.

- [8] Ni M Y, Deng H X, He X K, et al. A single-pixel tracking system for microfluidic device monitoring without image processing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 151: 106875.
- [9] Shi D F, Yin K X, Huang J, et al. Fast tracking of moving objects using single-pixel imaging [J]. *Optics Communications*, 2019, 440: 155-162.
- [10] Zhang Z B, Ye J Q, Deng Q W, et al. Image-free real-time detection and tracking of fast moving object using a single-pixel detector [J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35394-35402.
- [11] Deng Q W, Zhang Z B, Zhong J A. Image-free real-time 3-D tracking of a fast-moving object using dual-pixel detection [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4734-4737.
- [12] Flusser J, Suk T, Zitova B. 2D and 3D Image Analysis by Moments[M]. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2016: 47-49.
- [13] Ma X Y, Rao C H, Zheng H Q. Error analysis of CCD-based point source centroid computation under the background light [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8525-8532.
- [14] Li Z Q, Li X Y. Centroid computation for Shack-Hartmann wavefront sensor in extreme situations based on artificial neural networks [J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31675-31693.
- [15] Huang J, Shi D F, Yuan K E, et al. Computational-weighted Fourier single-pixel Imaging via binary illumination [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16547-16560.
- [16] Baker K L. Iteratively weighted centroiding for Shack-Hartmann wave-front sensors [J]. *Optics Express*, 2018, 15(8): 5147-5160.
- [17] Zha L B, Shi D F, Huang J, et al. Single-pixel tracking of fast-moving object using geometric moment detection [J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 30327-30336.