

文章编号 1004-924X(2016)增-0575-08

逆反射光斑定位算法的亚像素细分模型

邓凯鹏¹, 赵 辉¹, 彭福军², 吕亮亮², 陶 卫^{1*}

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240;
2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201108)

摘要: 在大型空间桁架结构振动和平面度测量中, 大尺寸远距离的空间定位测量需求十分普遍, 考虑其距离远, 范围大, 精度高的测量特点, 光斑定位是最优方法之一。本文介绍一种基于逆反射靶标以形成与背景对比度较大的逆反射圆形光斑, 并采用计算机视觉等相关算法实现精度细分的远距离定位。算法对逆反射光斑采用梯度 Canny 算子进行边缘提取, 对边缘进行最小二乘拟合得到光斑圆心坐标来实现定位。文章通过对 Canny 算子边缘检测误差和最小二乘拟合精度进行细分建模, 分析光斑定位的重复性误差界, 给出该算法光斑定位重复性精度的可靠估计。在 LED 和 532nm 激光分别作为光源实验中, 圆心定位 3-sigma 重复性误差界分别为 ± 0.30 mm 和 ± 0.57 mm, 与细分模型得到的 \sqrt{n} 倍的细分估计吻合。通过最小二乘拟合对 Canny 算子提取边缘结果的精度细分, 能够满足远距离空间定位的高精度要求。

关键词: 光斑定位, 逆反射, Canny 算子, 最小二乘圆拟合

中图分类号: TP314.7; TP873 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0575

Sub-pixel subdivided model for retro-reflection spot positioning algorithm

DENG Kai-peng¹, ZHAO Hui¹, PENG Fu-jun², LV Liang-liang², TAO Wei^{1*}

(1. School of Electronic and Electrical Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China;

2. Shanghai Institute of Aerospace Systems Engineering, Shanghai 201108, China)

* Corresponding author, E-mail: taowei@sjtu.edu.cn

Abstract: With regard to the measurement for vibration and flatness of large-scale space truss structure, the demand in large-scale and long-distance space positioning measurement is very common, and in consideration of the measurement characteristics of long distance, large scale and high precision, spot positioning is regarded as one of the optimal methods. In this paper, a kind of round spot based on retro-reflection target, with a relatively large target-background contrast, is introduced; and related algorithm such as computer vision is adopted to realize the long-distance positioning with precision subdivision. By virtue of the Canny edge detector, edge extraction is conducted in the retro-reflected spot and coordinate of the spot center is worked out through least-square fitting in the edge, thus achieving the positioning purpose. Through subdivided modeling for the Canny edge detection error and

收稿日期: 2016-06-10; 修订日期: 2016-06-12.

基金项目: 大型薄膜天线结构在轨变形光学测量技术仿真及地面验证(USCAT2013-09)基于目标航迹管理的红外抗诱饵弹技术研究(SAST2015082)

least-square fitting precision, an analysis is conducted on the repeatability error bounds of the spot positioning, and a reliable estimation for repeatability precision of spot positioning in this algorithm is provided. In the experiment where LED and 532 nm laser is taken as the light source, the repeatability error bounds of the center positioning 3-sigma are respectively ± 0.30 mm and ± 0.57 mm, which are consistent with the \sqrt{n} estimate obtained in the subdivided model. Precision subdivision of the extracted edge by Canny edge detector through the least-square circle fitting can satisfy the requirement for high precision in long-distance space positioning.

Key words: spot positioning; retro-reflection; Canny edge detector; least-square circle fitting

1 引言

在船舶海洋、航空航天等领域存在着很多大尺寸空间桁架结构,实际环境中,受重力、风阻力、机械振动等影响,这些长达数十米甚至上百米的天线很难保持平整性。对于大型空间桁架结构来说,机械振动和桁架平面度对其姿态和空间结构的影响很大,实时监测其空间平面度误差和桁架的振动幅度与周期,并实时反馈给后续补偿控制系统,是保证天线振动幅度和频率在允许范围内,同时保障其平面度的关键,在实际应用中具有重大意义。

考虑到桁架结构的空间位置关系,若要对其进行测量则需要构建一个大视场,大景深,稳定性和线性良好且精度高的测量系统。目前国内外已有的大型桁架形变测量中,NASA 对桁架反射器表面形状测量已进行了地面测试试验,实验通过在反射器的背面和抛物面覆盖了 500 个反光材料标志来进行摄影测量,利用 4 个 210 万像素的数码相机和商业摄影测量法软件来测试展开式空间桁架结构的表面形状^[1]。

另外,B. Pan, H. Xie 等人将摄影测量法运用到靶标点空间坐标的定位中,基于双目视觉的思想,主要通过两个 CCD 相机对反射点的空间位置进行唯一定位,每个 CCD 相机确定目标点关于相机的法向位置,结合两个相机的空间位置关系给出靶标点的准确空间坐标,摄影测量可提供准确持续实时的输出显示。

本文采用 532 nm 激光面光源和白光 LED 两种光源照明,逆反射膜定向反射,采集到定向反射区域高亮,漫反射背景消隐的高对比度的灰度图,通过 Canny 算子和最小二乘拟合实现亚像素级的精度细分,获取光斑圆心的像素坐标,从而得到

逆反射膜靶点的振动位置。同时对比两种光源定位重复性误差界,结合圆心定位过程中的重复性误差源和最小二乘圆拟合的细分模型,得出测量结果重复性精度的可靠估计。

2 测量原理

2.1 逆反射膜靶标

逆反射膜材料采用高折射率微晶立方角体组成^[2],其微观结构如图 1 所示,图 1(a)中,入射光 R_1 经立方角体棱镜的 B 面和 A 面反射后,沿与 R_1 相反的方向出射 R_2 ,图 1(b)显示了微观棱镜的空间排列。逆反射膜能将入射光按原路返回,定向反射回与光源接近同轴的相机处,以较高通量进入相机视场。逆反射膜背板采用漫反射材料,反射进入相机视场的通量很低。

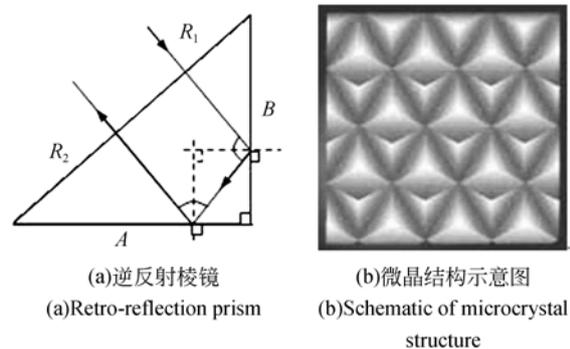
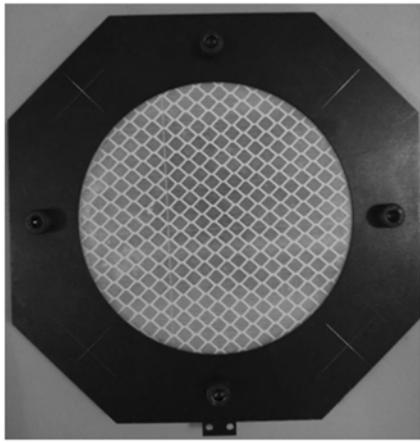


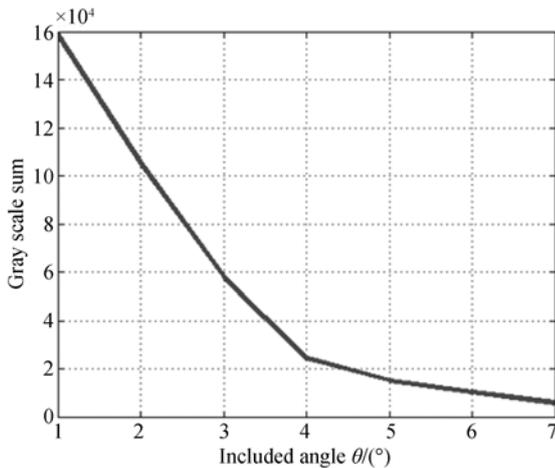
图 1 逆反射膜结构示意图

Fig. 1 Schematic of retro-reflection film structure

采用带漫反射背板的逆反射膜作为靶标,靶标如图 2(a)所示,改变相机光轴与光源光轴间的夹角,得到反射光斑灰度和与相机光轴与光源光轴的夹角关系,如图 2(b)所示,当光源入射光轴与相机成像光轴夹角为 4° 时,逆反射光斑的总灰



(a)靶标实物图
(a)Graphic of red drone



(b)光斑灰度和与 θ 关系图
(b)Gray scale sum varies with included angle between laser and camera

图 2 逆反射靶标反射特性图

Fig. 2 Graphic of reflection chariactoristic of retro-reflection drone

度值衰减约为 80%，当夹角为 7°时，总灰度值衰减为 90%以上。由此特性可知，系统中与相机光轴平行的光源入射光能全部反射进入相机视场，而与相机光轴偏离 7°以上的外来光基本不会对系统产生影响，这在很大程度上排除了外来光源（如太阳）对系统测量的影响。

2.2 测量方法

对于 23.6 m × 6 m 的空间桁架，采用如图 3 所示的水平垂直等分方式将其划分为 ABCD 4 个分区，每个分区有 6 个靶标，水平靶标的间隔为 1.8 m，垂直靶标间隔为 3 m，测量装置位于中心卫星体的四角处，采用面光源对各靶标照明，并

通过工业相机实时拍摄图像，如图 3 所示。

各分区靶标位置和相机视场角如图 4 所示，最远端靶标距相机径向距离为 11.2 m。

在一个分区中，最远靶标位于天线框架角点，相机视场需覆盖 6 个靶标，如图 4。

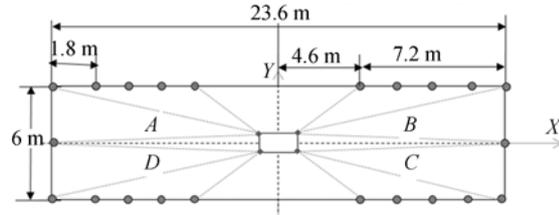


图 3 分区示意图

Fig. 3 Four subregions structure

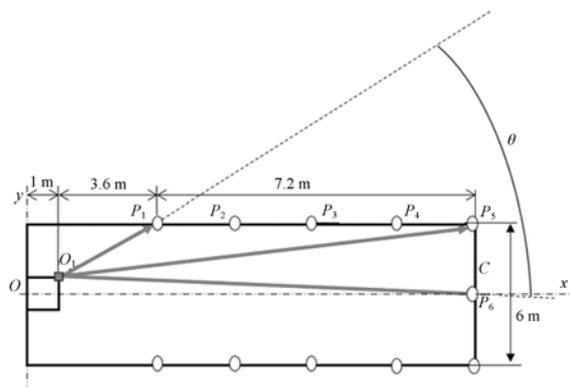


图 4 分区靶标位置及相机视场示意图

Fig. 4 Schematic of subregion drone position and field of view for camera

图 4 中 O_1 处为相机， P_5 为最远处靶标，即系统设计精度下限对应的靶标， θ 为相机的最小视场角。

各光源分别对各靶标补光，得到逆反射光斑后采用圆心细分定位算法得到各靶标位置的像素坐标，再通过相机在各靶标处的物理分辨率得到靶标移动的实际距离。

3 圆心定位算法原理

3.1 成像物理分辨率

在计算机视觉测量系统中，测量点的物理分辨率由相机在该点处的视场大小，相机的有效像素点数等决定。在不考虑相机成像畸变的情况下，在与相机光轴垂直的像平面上各点的物理分辨率一致，其计算公式如下：

$$S = \frac{2d \cdot \tan \frac{\theta}{2}}{\text{pixel}}, \quad (1)$$

式中: S 为测量点处的物理分辨率, d 为像平面距离相机的轴向距离, θ 为相机测量方向的视场角大小, pixel 为相机测量方向的有效像素点数。

物理分辨率由测量距离和相机参数决定, 图像处理过程中通过 Canny 算子和最小二乘拟合在物理分辨率上进行亚像素级的精度细分。

3.2 Canny 算子

Canny 算子是基于最优化的边缘检测算子^[1]。其核心思想是采用高斯平滑消除噪声, 即用相应的高斯核卷积待处理图像^[3-4], 之后用一阶差分模型进行边缘增强, 同时采用“非极大抑制”保留局部梯度最大值, 通过一大一小两个阈值得到单一连续的边缘。因此, 决定 Canny 算子边缘提取效果的参数主要有高斯平滑函数方差和两个边缘检测阈值^[5-7]。

Canny 边缘算子符合边缘检测算子的 3 个指标, 其 3 个指标和衡量准则如下。

(1) 边缘检测算子需满足低失误概率, 即信噪比准则, 信噪比(SNR)表达式如下:

$$\text{SNR} = \frac{\left| \int_{-\omega}^{\omega} G(-x) f(x) dx \right|}{\sigma \sqrt{\int_{-\omega}^{\omega} f^2(x) dx}}, \quad (2)$$

式中: $G(x)$ 为边缘函数, $f(x)$ 为边界为 ω 的滤波器的脉冲响应, σ 为高斯噪声的均方根。SNR 越大, 提取的边缘质量越好。在 Canny 算子中, 采用高斯平滑剔除高斯噪声, 提高信噪比。

(2) 边缘检测算子需具有较高的定位精度, 即定位精度准则, 表达式如下:

$$L = \frac{\left| \int_{-\omega}^{\omega} G'(x) f(x) dx \right|}{\sigma \sqrt{\int_{-\omega}^{\omega} f'^2(x) dx}}, \quad (3)$$

式中: $G'(x)$ 为 $G(x)$ 边缘函数的一阶导数, $G'(x)$ 值越大, $G(x)$ 定位精度越高。在 Canny 算子中, 采用水平和垂直两种梯度算子, 同时采用“非极大抑制”方法提高边缘的定位精度。

(3) 边缘检测算子需对每个边缘有唯一响应, 即单边缘响应准则, 表达式如下:

$$D(f') = \pi \left\{ \frac{\int_{-\omega}^{\omega} f'^2(x) dx}{\int_{-\omega}^{\omega} f''(x) dx} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

式中: $D(f')$ 为检测算子脉冲响应导数的零交叉点的平均距离, $f''(x)$ 为的二阶导数。在 Canny 算子中, 采用双阈值的方式保证单边缘响应^[5]。

3.3 最小二乘圆拟合

最小二乘法又称最小平方法, 是通过最小化待拟合数据相对于拟合曲线的平方误差来得到最优拟合曲线, 即最小化如下平方误差目标函数^[8-9]:

$$L(\hat{x}, \hat{y}, \hat{r}) = \sum_n (\sqrt{(x_i - \hat{x})^2 + (y_i - \hat{y})^2} - \hat{r})^2, \quad (5)$$

式中: n 为待拟合数据点个数, (x_i, y_i) 为待拟合数据的坐标, (\hat{x}, \hat{y}) 为拟合圆心的像素坐标, \hat{r} 为拟合圆半径。

最小化上述目标函数的方法通过约束目标函数对 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{r}$ 的导数均为零可求得, 其结果即为最小二乘拟合^[7]。

由上述过程可得, 当检测到的边缘像素的坐标误差满足均值为零的对称分布的时候, 如均匀分布或高斯分布, 最小二乘拟合将得到拟合曲线的无偏估计。特别地, 当误差满足高斯分布时, 最小二乘拟合将得到拟合曲线的最大似然估计。

4 精度细分模型

4.1 边缘检测重复性误差

对于边缘检测算子, 其边缘定位精度如式(5)所示, 从式中可知, 边缘检测的定位误差与边缘函数的导数成正比, 在灰度图中, 与边缘处的灰度梯度负相关^[10-11]。另一方面, Canny 算子在计算边缘梯度之前会对图像进行高斯滤波, 取 Canny 边缘的定位误差服从均值为零, 方差与定位误差成反比的高斯分布, 则可得下式:

$$\delta_L \sim N\left[0, \frac{1}{\lambda G}\right], \quad (6)$$

式中: δ_L 为边缘定位误差, 误差方向为灰度梯度方向, 在本系统中即为拟合圆的径向, G' 为与图像边缘的灰度梯度正相关函数, λ 为常数。

另一方面, Canny 算子得到边缘二值图, 即理论上的边缘会被舍入到最近的像素点上, 边缘结果图像不会出现亚像素的情况, 具体舍入误差取决于图像边缘的像素梯度和 Canny 算子选择的梯度算子等。理论上, 边缘亚像素位置等概率出

现在 $[0, 1)$ 区间上,不失一般性,取舍入误差服从 $[-0.5, 0.5]$ 区间上的均匀分布。即

$$\delta_r \sim U(-0.5, 0.5),$$

式中 δ_r 为像素舍入误差。

上述两种误差在边缘检测过程中不完全独立,但可在以下情况下做独立性假设。

(a)定位误差很小,远小于一个像素时,此时舍入误差是主要误差源,可不考虑定位误差。

(b)定位误差比较大,远大于一个像素时,可近似认为定位误差和舍入误差独立。

4.2 最小二乘拟合细分模型

在最小二乘圆拟合中,由于拟合曲线的中心对称性,边缘上各像素点对拟合结果的贡献近似,由此可知圆心拟合误差为边缘各点误差的均值。设 Canny 边缘检测共有 n 个点,圆心坐标由 x 和 y 两个方向的像素坐标确定,不失一般性,以下仅考虑 x 方向的误差, y 方向误差与 x 方向误差的讨论方法与此相同。

对于定位误差,圆心定位误差为边缘各点定位误差的均值, n 个高斯分布的均值的标准差为原分布的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$,则圆心 x 方向上的定位误差分布为下式:

$$\delta_{lx} \sim N\left[0, \frac{1}{\sqrt{n}\lambda G'}\right] \quad (7)$$

式中 δ_{lx} 为 x 方向的定位误差, n 为 Canny 算子检测到的边缘像素点数。

对于舍入误差,得到的边缘二值图是在 x 和 y 方向均存在亚像素的舍入,故其有效点数为 n ,由 n 个均匀分布的均值的方差为原分布方差的 $\frac{1}{n}$,另由中心极限定理有,当 n 趋向于无穷大时,其 n 个均匀分布的均值分布趋向于高斯分布。在光斑定位中,边缘像素点数一般较多($n > 10$),可用高斯分布近似表示其圆心的舍入误差。则有:

$$\delta_{rx} \sim N\left[0, \frac{1}{12n}\right]. \quad (8)$$

由上式可知,当 n 较大时,舍入误差的方差较小,对于光斑边缘像素点数较多的情况($n > 10$),舍入误差一般可忽略。

5 精度细分实验验证

5.1 重复性误差测定

为验证上述精度细分推导结果,采用 LED 和

532 nm 激光照明逆反射膜靶标采集光斑,结果如图 5 所示。采用 Canny 算子提取边界,采用最小二乘圆拟合定位圆心,共测量 2 340 帧图像,得到实际圆心定位的重复性误差界。

逆反射膜和漫反射背板的靶标设计,便于得到背景消隐的逆反射光斑,增大边缘梯度,有利于减小定位误差。为验证上述模型,选用水平像素为 2 048 的相机,镜头水平视场角为 40.4° ,将 80 mm 靶标置于 11.2 m 处(最远点靶标 P_7)正对相机位置。此时由式(1)可得靶标处物理分辨率 $S = 4.31$ mm。

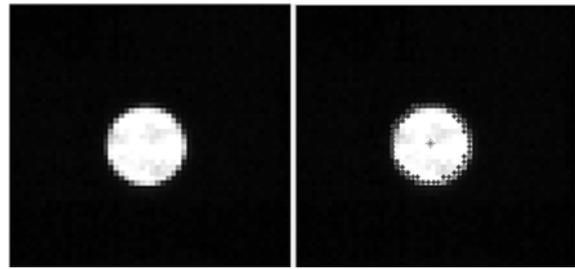


图 5 LED 逆反射光斑及定位结果图

Fig. 5 LED retro-reflection spot and its location result

采用均匀白光 LED 照明,靶标处照度 11.4 Lux,得到图像及相关处理结果如图 5。

采用 532 nm 激光照明,靶标处照度为 10.8 Lux,得到图像及相关处理结果如图 6。

图 5 右图和 6 右图中均标示出 Canny 算子检测到的边界和最小二乘拟合的圆心。

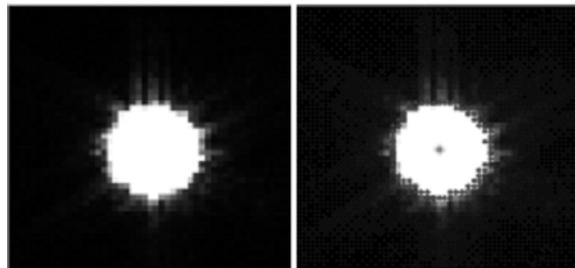


图 6 532 nm 激光逆反射光斑及定位结果图

Fig. 6 Laser retro-reflection spot and its location result

从上述两图可看出,由于激光指向性较强,逆反射光束也比较聚集,边缘处易产生向外扩散的光晕,而 LED 补光较均匀,光斑呈较规则的正圆形。

在两种光源照明下,共测量 2 340 幅逆反射靶标图像。通过上述圆心定位算法测量两种光斑

图像的圆心定位重复性误差,如图 7 所示。

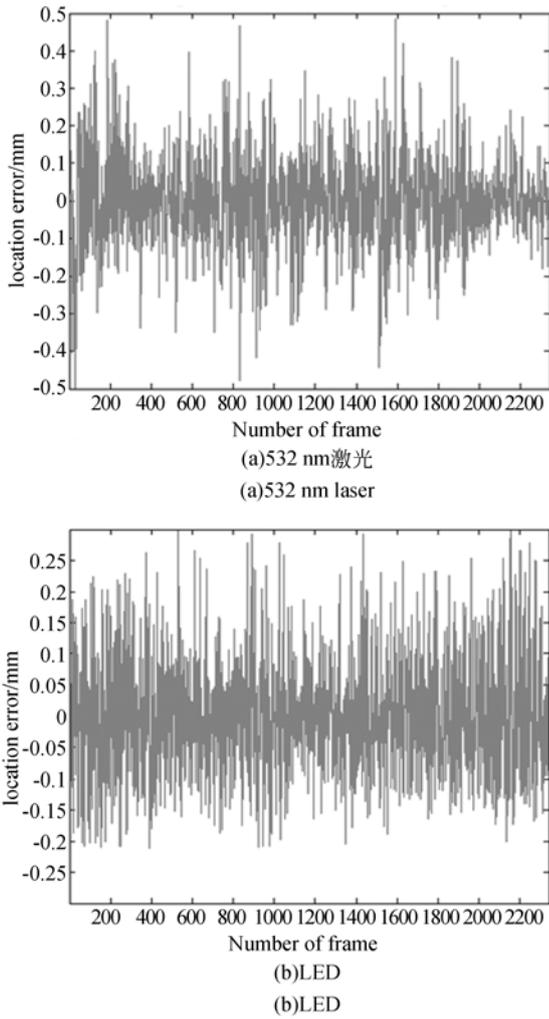


图 7 逆反射光斑重复性误差图
Fig. 7 Spot location repeatability error

统计重复性误差在 $[-\alpha, \alpha]$ 内的帧占全部帧的比率,得到如下误差分布累积密度曲线图 8。

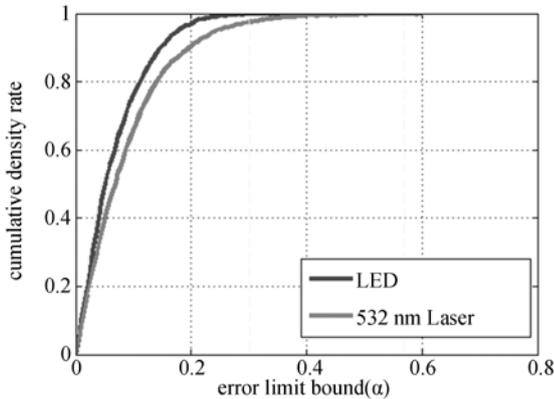


图 8 误差区间累积密度图
Fig. 8 Cumulative density diagram of location error

根据 3σ 原则,考虑误差分布在 $\pm 3\sigma$ 之内,此时置信度为 99.97%,即其误差累积分布占总分布的 99.97%,由图 8 的误差累积密度曲线可得,对于 532 nm 激光逆反射光斑和 LED 逆反射光斑,它们的重复性误差界分别为 ± 0.30 mm 和 ± 0.57 mm。

5.2 误差估计

将上述得到的圆心定位重复性误差界与精度细分模型的重复性误差估计结果进行对比,以下根据精度细分模型得到两种光斑圆心定位的 3σ 重复性误差界的估计。

根据上述精度细分模型知,最小二乘拟合对 Canny 算子的边缘定位重复性误差的细分倍数为 \sqrt{n} ,对边缘像素舍入误差的细分倍数为 n 。

通过对两种光源光斑图像共 2 340 幅进行统

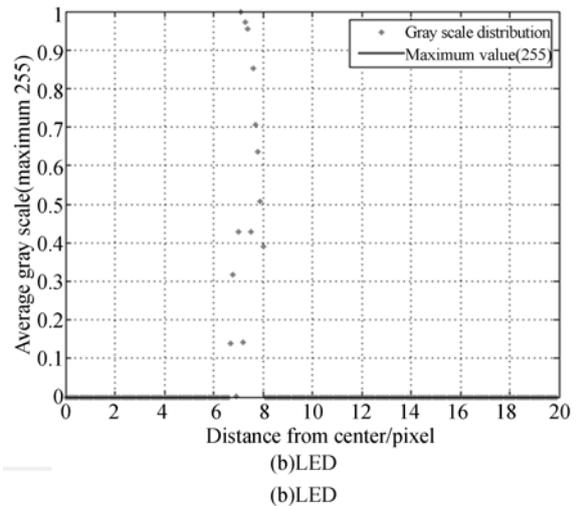
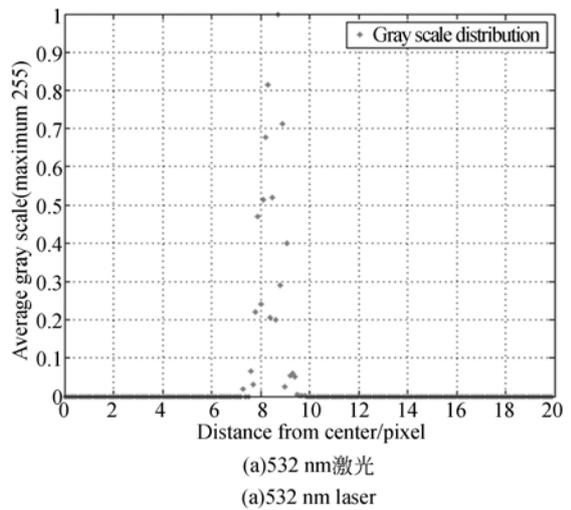


图 9 边缘点关于圆心距离分布图
Fig. 9 Average gray scale by distance from center

计,得知 532 nm 激光和 LED 逆反射光斑的边缘平均像素点数分别为 62.13 和 58.32。通过式(9)可得两种逆反射光斑边缘舍入产生的圆心定位重复性误差的方差分别为 0.001 34 pixel 和 0.001 43 pixel。

对于 Canny 算子边缘定位误差,由于其与光斑边缘的梯度负相关,无法通过模型定量得到,故通过统计 2 340 幅光斑中检测到的边缘像素点的径向分布重复性误差界获得。统计 Canny 算子检测得到的边缘,计算距圆心等距离圆环上边缘出现的概率,得到两种光斑边缘像素点关于圆心距离的径向分布图,如图 9。

由上述推导,边缘定位误差服从高斯分布,根据 3σ 准则,取 99.97% 置信度,得到激光逆反射光斑误差区间长度为 2.18 pixel,LED 逆反射光斑误差区间长度为 1.17 pixel。则可知对于两种光斑,Canny 算子的边缘定位重复性误差的方差分别为 0.363 pixel 和 0.195 pixel,则最小二乘细分后的重复性误差方差分别为 0.046 1 pixel 和 0.022 5 pixel。

LED 逆反射光斑和激光逆反射光斑边缘定位误差与舍入误差如表 1 所示。

表 1 光斑舍入误差与定位误差计算表
Tab.1 Rounding off and location errors

	532 nm Laser	LED
n	62.13	58.32
σ_{rx}/pixel	0.001 34	0.001 43
α/pixel	2.18	1.17
σ_L/pixel	0.363	0.195
σ_{Lx}/pixel	0.461	0.025 5

表中 n 是以 σ_{rx} 为拟合圆心的 x 方向舍入误差的方差,由式(9)计算所得, σ_L 为边缘定位误差方差,由图统计数据结合 3σ 准则得到, σ_{Lx} 为拟合圆心 x 方向的定位误差方差,由式(8)确定。

参考文献:

- [1] WILLEY C E, SCHULZE R C, BOKULIC R S, et al.. A Hybrid Inflatable Dish Antenna System for Spacecraft[R]. AIAA, 2001.
- [2] 张明,乐孜纯,刘恺,等. 微棱镜逆反射材料特性分析及制作[J]. 浙江大学学报, 2010, 6(3): 351-354.

从上表计算结果可知,舍入误差一般较小,远小于边缘定位误差,实际计算中可忽略不计。根据 3σ 准则,认为单点定位精度分布在 3σ 区间内,则可得激光逆反射光斑和 LED 逆反射光斑拟合圆心的单点定位精度分别为 ± 0.138 pixel 和 $\pm 0.076 5$ pixel,相机在 11.2 m 处的物理分辨率 $S = 4.31$ mm,得到二者拟合圆心定位重复性误差界的估计为:

$$\delta_{\text{Laser}} = \pm 0.59 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{LED}} = \pm 0.33 \text{ mm}$$

实验结果显示,精度细分模型给出的圆心定位重复性误差界的估计与实际测量得到的圆心定位误差的重复性误差界基本吻合,可认为上述细分模型是对本方案单点定位精度的可靠估计,最小二乘圆拟合可对 Canny 算子边缘定位精度 \sqrt{n} 倍细分,而边缘舍入误差一般较小,可忽略。

6 结 论

在 532 nm 激光和 LED 光源实验中,Canny 算子边缘检测误差分别为 ± 1.09 pixel 和 ± 0.58 pixel 经最小二乘圆拟合的细分,推导圆心定位重复性误差界为 ± 0.138 pixel 和 $\pm 0.076 5$ pixel,与实际测量重复性误差界相符合。通过逆反射光斑边缘提取和最小二乘圆拟合的精度细分模型分析与实验验证,可知由 Canny 算子像素舍入引入的定位误差在最小二乘拟合中细分倍数为 n ,一般较小,可忽略。边缘定位误差与噪声和边缘像素梯度有关,在最小二乘拟合中细分倍数为 \sqrt{n} 。

上述测量方法重复性误差可从两方面提高:一是减小 Canny 算子的定位误差,可通过逆反射膜提高边缘梯度,采用均匀稳定光源提高图像信噪比来实现;二是增大最小二乘细分倍数,可通过加大逆反射靶标直径实现。

ZHANG M, LE Z CH, LIU K, et al.. Characteristics analysis and producing of micro-prism retroreflective material[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2010, 6(3): 351-354. (in Chinese)

- [3] 全燕鸣,黎淑梅,麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量[J]. 光学精密工程, 2013, 4(4):

- 1054-1061.
 QUAN Y M, LI SH M, MAI Q Q. On-machine 3D measurement of workpiece dimensions based on binocular vision[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 4(4): 1054-1061. (in Chinese)
- [4] 林卉, 赵长胜, 舒宁. 基于 Canny 算子的边缘检测及评价[J]. 黑龙江工程学院学报, 2003, 6(2): 3-7.
 LIN H, ZHAO CH SH, SHU N. Edge detection based on Canny operator and evaluation[J]. *Journal of Heilongjiang Institute of Technology*. 2003, 6(2): 3-7. (in Chinese)
- [5] BAO P, ZHANG L, WU X L. Canny edge detection enhancement by scale multiplication[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 9(9): 1485-1490.
- [6] 王植, 贺赛先. 一种基于 Canny 理论的自适应边缘检测方法[J]. 中国图像图形学报, 2004, 8(8): 957-962.
 WANG ZH, HE S X. An adaptive edge-detection method based on canny algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 8(8): 957-962. (in Chinese)
- [7] 宋莹, 陈科, 林江莉, 等. 基于图像分块的边缘检测算法[J]. 计算机工程, 2010, 7(14): 196-200.
 SONG Y, CHEN K, LIN J L, ZOU Y W. Edge detection algorithm based on image partition [J]. *Computer Engineering*, 2010, 7(14): 196-200. (in Chinese)
- [8] 朱嘉, 李醒飞, 谭文斌, 等. 基于圆心约束最小二乘圆拟合的短圆弧测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2486-2492.
 ZHU J, LI X F, TAN W B, *et al.* Measurement of short arc based on center constraint least-square circle fitting[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2486-2492. (in Chinese)
- [9] 敖磊, 谭久彬, 崔继文, 等. 激光 CCD 二维自准直仪中圆目标中心精确定位算法[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 668-673.
 AO L, TAN J B, CUI J W, KANG W J. Precise center location Algorithm for circle target in CCD laser dual axis autocollimator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 668-673. (in Chinese)
- [10] 米曾真, 谢志江, 陈涛, 等. 重轨图像增强与边缘提取的关键技术[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1645-1651.
 MI Z ZH, XIE ZH J, CHEN T, *et al.*. Key technology of image enhancement and edge extraction for heavy rail[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1645-1651. (in Chinese)
- [11] 韩希珍, 赵建. 结合偏微分方程增强图像纹理及对比度[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1382-1388.
 HAN X ZH, ZHAO J. Enhancement of image texture and contrast combined with partial differential equation[J]. *Opt Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1382-1388. (in Chinese)

作者简介:



邓凯鹏(1993—),男,湖北黄冈人,硕士,2010年于上海交通大学测控技术与仪器系获得学士学位,主要从事机器视觉及光电检测方向的研究。E-mail: dkp19930606@163.com



陶卫(1975—),女,辽宁大连人,博士,副教授,硕士生导师,1999年、2003年于哈尔滨工业大学精密仪器及机械专业分别获得硕士、博士学位,现为上海交通大学仪器科学与工程系副教授,主要从事光电及视觉检测技术方向的研究。E-mail: taowei@sjtu.edu.cn