

文章编号 1004-924X(2016)04-0865-08

## 复杂场景中航天器靶标的快速识别

初广丽<sup>1,2,3,\*</sup>, 王延杰<sup>1</sup>, 邸男<sup>1</sup>, 刘艳滢<sup>1</sup>, 金明河<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100039;  
3. 白城师范学院, 吉林 白城 137000; 4. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 基于靶标的几何特征提出了一种快速识别算法来解决目前航天器靶标识别存在的问题。设计了一款带有线段与圆环图案的合作靶标。利用高斯滤波去除图像中的噪声, 运用 Canny 检测算子得到边缘图像, 并跟踪得到单像素边缘序列。然后, 通过判断非共线四点是否共圆排除大部分不可能构成圆的边缘, 利用同一圆周的两段子弧对应相同圆心和半径的几何特征实现圆检测。最后根据靶标圆与线段的几何关系排除干扰, 实现靶标的准确识别。实验结果表明, 该靶标识别算法对噪声、光照、旋转等不敏感, 能够在多种复杂场景中快速、准确地识别靶标, 处理时间小于 125 ms, 满足实时位姿测量 8 帧的需要。目前, 该算法已经成功应用于工程样机。

**关键词:** 航天器靶标; 目标识别; 图像处理; 圆检测; 线段检测; 边缘跟踪

**中图分类号:** TP391.4; V557 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0865

## Fast recognition of aircraft target in complex scenes

CHU Guang-li<sup>1,2,3,\*</sup>, WANG Yan-jie<sup>1</sup>, DI Nan<sup>1</sup>, LIU Yan-ying<sup>1</sup>, JIN Ming-he<sup>4</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Baicheng Normal University, Baicheng 137000, China;

4. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: qibaobei2002@163.com

**Abstract:** A fast recognition algorithm based on the geometric characteristics of a target was proposed to pursue the fast and accurate recognition for the spacecraft target. In the algorithm, a target incorporated with linear and circular patterns was designed to facilitate the accurate recognition. The noises in the images were reduced by mean of a Gaussian filter. The object edges were detected by Canny operator and the sequences of edges were obtained by the single pixel tracking method. Then, the non-circular edges were excluded according to whether the four non-collinear points were located on the same circle or not and the circle detection was implemented by the geometrical property that two different arcs on the same circle have the same center and radius. Finally, the interruption was eliminated by the geometric relation between target circle and line, and the target was recognized precisely.

收稿日期: 2015-03-30; 修订日期: 2015-06-08.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2013CB733103)

The experimental results demonstrate that the algorithm is insensitive to noise, illumination and target rotation and efficiently recognizes the target in the complex scenes. Moreover, the processing time is less than 125 ms, which meets the requirement of real-time pose measurement of 8 frames. The algorithm has been used in an engineering prototype successfully, now.

**Key words:** aircraft target; target recognition; image processing; circle detection; line segment detection; edge tracking

## 1 引言

在执行航天器对接、空间站搬运货物等任务时,通常在目标航天器上装有合作靶标<sup>[1-2]</sup>,追踪航天器通过观测装置识别靶标,以求取相对位姿参数。美国的高级视频制导敏感器(Advanced Video Guidance Sensor, AVGS)、日本的接近敏感器(Proximity Sensors, PXS)<sup>[3-4]</sup>中均采用合作靶标方式,通过图像处理技术识别靶标。国内,在神舟飞船与天宫对接系统中,采用了十字形靶标,首先通过 TV 相机获得图像,再求解相对位姿<sup>[5]</sup>。因此设计具有独特形状的靶标以及快速、准确的识别算法是系统稳定工作的关键。由于圆形在图像中具有旋转、平移和缩放不变性,易于检测与定位<sup>[6]</sup>,而且空间环境下相机视场中出现圆形的几率低,因此将圆形作为快速识别靶标的显著特征,并加入线段进行约束,利用圆与线段之间的关系,从而准确识别靶标。

Hough 变换(Hough Transform, HT)是常用的圆检测算法,其对噪声不敏感,但处理时间长、占用存储空间多,因此学者们提出了很多改进算法,如随机 HT(Randomized Hough Transform, RHT)<sup>[7]</sup>、模糊 HT(Fuzzy Hough Transform, FHT)<sup>[8]</sup>、点 HT(Point Hough Transform, PHT)<sup>[9]</sup>、有序 HT(Sequenced Hough Transform, SQHT)<sup>[10]</sup>,这些算法某种程度上克服了经典 HT 的缺点,但检测速度仍然难以满足实时处理要求。Ayala-Ramirez<sup>[11]</sup>等人提出了基于遗传算法(Genetic Algorithm, GA)的圆识别算法,该算法可以识别自然图像中的多个圆,但对于残缺的、被遮挡的圆识别效果较差;文献[12-13]提出了基于最优化模型的自动学习(Learning Automata, LA)圆识别算法,但自动学习过程需要大量迭代,速度慢,而且迭代次数对结果的影响很大;Chen<sup>[14]</sup>等人提出了随机圆检测算法(Random-

ized Circle Detection, RCD),从边缘图像中随机取 4 个点,利用假设检验机制确定候选圆,但随机选点会导致圆识别出现不稳定、误检率高等问题。

对于线段检测,邸男<sup>[15]</sup>等人利用改进的链码跟踪技术剔除短的线段,且只搜索线段的近似方向,从而缩小了 Hough 变换的搜索范围;Fernandes<sup>[16]</sup>等人提出了基于核的 HT(Kernel-based Hough Transform, KHT),其通过改进投票机制提高了算法的速度,但这两种算法的速度仍然难以满足航天实时图像处理要求。Grompone<sup>[17]</sup>等人提出了线段检测器(Line Segment Detector, LSD),该方法速度较快,但抗噪能力差。

针对目前靶标识别算法存在的问题,并结合靶标的几何特征,本文提出了一种快速识别算法。该算法简洁,鲁棒性好,能在复杂场景中准确识别靶标。

## 2 靶标设计

靶标是满足系统测量精度的关键组件,靶标设计既要考虑机器测量效果,又要兼顾宇航员的视觉感受。靶标形状如图 1 所示,靶标平面上的标识点 A、C 与中心立柱(立柱与靶标平面垂直)上的标识点 B 构成等腰三角形,用于求解位姿。在复杂的空间环境里,存在星体、航天器局部反光等干扰,若靶标仅由 A、B、C 3 个孤立的标识点构成,容易造成误识,甚至无法识别,因此需要设计独特的形状以提高抗干扰能力。在靶标平面上加入以 B 的正投影 O 为圆心的圆环以及线段  $l_1$ 、 $l_2$ 。两条线段在 A、C 的连线(过圆心 O)上,长度均与圆环内半径相等。根据标识点 D 和线段  $l_2$  的位置关系可以确定被抓取目标的上下方向。靶标主体为纯黑色,圆环、线段和标识点为纯白色,以增强对比度,有利于识别。

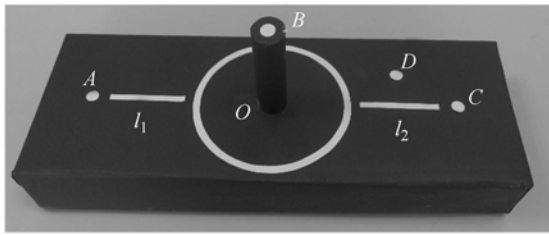


图 1 靶标模型  
Fig. 1 Target mode

### 3 靶标识别

本文算法包括单像素边缘跟踪、圆检测、线段检测及靶标定位等几个步骤。

#### 3.1 单像素边缘跟踪

为了消除噪声的影响,对载入的灰度图像进行高斯滤波处理,然后运用 Canny 算子进行边缘检测,得到边缘二值图像,在二值图像中按照从上到下、从左到右的顺序遍历,基于八邻域搜索,八邻域的方向码如图 2(a)所示,具体步骤如下:

1) 如果找到未跟踪过的边缘点,记为 StartP,转入 2);否则转入 5);

2) 因为 StartP 的上方和左侧已经搜索过,所以只在 StartP 的 0~3 4 个邻域内搜索即可,如果找到未跟踪过的边缘点,记为 SecP,从 StartP 到 SecP 的搜索方向记为  $D_{1,2}$ ,转入 3);否则 StartP 为孤立点,删除,转入 1);

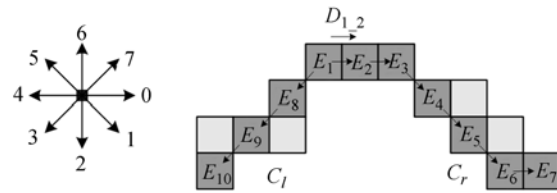
3) 将当前点记为 CurP,从上一个点到当前点的搜索方向记为 CurDir。在 CurP 的八邻域内,从 CurDir 方向开始顺时针搜索,方向码为  $(CurDir + k) \text{MOD} 8$ ,MOD 表示取模运算,  $k=0, 1, \dots, 7$ 。将找到的第一个未跟踪过的边缘点作为新的边缘点,并将 CurP 其它邻域上未跟踪过的边缘点删除(保证边缘的单像素性),转入 3);如果 CurP 的邻域内不存在边缘点,转入 4);

4) 将得到的边缘标记为  $C_r$ ,然后判断  $D_{1,2}$  的值,若为 2 或 3,将  $C_r$  记录在边缘链表中;若为 0 或者 1,则在 StartP 的 3 方向上按照同样的方式搜索边缘点,若存在边缘序列,则标记为  $C_l$ ,逆序存储到边缘链表中,并将  $C_r$  连接到  $C_l$  的末尾,将二者合成一条边缘,转入 1);

5) 跟踪过程结束。

按照上述过程搜索图 2(b)所示的例子,得到

的边缘序列为  $E_{10}, E_9, E_8, E_1, E_2 \dots E_7$ ,浅颜色的正方形表示跟踪过程中删去的边缘点。



(a)方向码 (b)跟踪过程示例  
(a) Direction code (b)Example of tracking procedure

图 2 八邻域方向码及跟踪过程示例

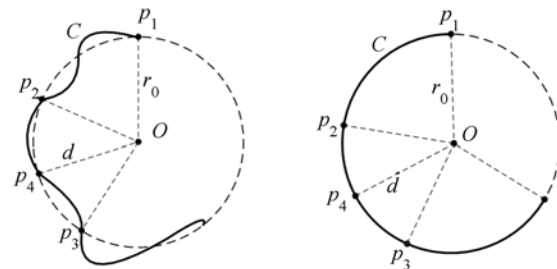
Fig. 2 Direction code in eight-neighborhood and example of tracking procedure

依据上述方法处理整个边缘图像,得到所有的边缘序列。

#### 3.2 圆检测

圆检测由粗检测和精检测两个步骤实现。

粗检测的原理如图 3 所示,考虑得到的边缘可能闭合,或者首末两点比较接近的情况,在边缘的起点、1/3、2/3 处取点,分别为图 3 中的  $p_1, p_2, p_3$ 。如果这 3 个点共线,则该边缘一定不是圆形,舍弃;否则将 3 点拟合成一个圆形(图中的虚线圆),圆心为  $O$ ,半径为  $r_0$ ,再取边缘 1/2 处的点作为第 4 个点  $p_4$ ,计算该点到圆心的距离  $d$ 。当  $d \neq r_0$  时,可断定边缘一定不是圆形,舍弃;当  $d = r_0$  时,确定该边缘为候选圆,包含图 3 中(a)、(b)两种情况,其中(a)表示的是碰巧  $d = r_0$ ,但其并不是圆形,因此还要通过后继的精检测,进行识别。粗检测中自适应的取点方式克服了 RCD 中的随机性,而且不需要反复取点,运算量小,适合实时处理。如果边缘较短,比如不足 20 个像素,



(a)非圆 (b)圆形  
(a)Non-circle (b)Circle

图 3 粗检测原理

Fig. 3 Principle of coarse detection

则略过粗检测过程,直接进入精检测阶段,以提高算法检测小圆的能力。

需要通过精检测验证粗检测保留下来的边缘是否为圆。精检测的原理如图 4 所示,边缘为  $M_1M_2$ ,中点为  $M$ ,若该边缘是圆周上的弧段,则两段子弧  $M_1M$  和  $MM_2$  应该对应相同的圆心和半径。

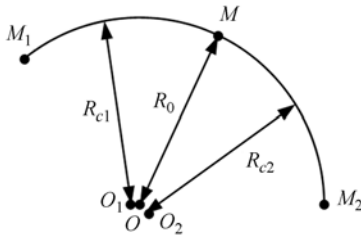


图 4 精检测原理

Fig. 4 Principle of fine detection

分别对两段子弧进行最小二乘圆拟合,得到的圆心分别为  $O_1(x_{d1}, y_{d1})$  和  $O_2(x_{d2}, y_{d2})$ ,半径分别为  $R_{d1}$  和  $R_{d2}$ 。理论上两组圆心和半径应精确相等,但数字图像中存在误差,若近似相等,也认为是圆弧,近似相等的程度用  $conf$  描述:

$$conf = \left(1 - \frac{|R_{d1} - R_{d2}|}{R_{d1} + R_{d2}}\right) \left(1 - \frac{\sqrt{(x_{d1} - x_{d2})^2 + (y_{d1} - y_{d2})^2}}{R_{d1} + R_{d2}}\right), \quad (1)$$

公式(1)中的第一个因子描述的是半径的关系,值域为  $(0, 1]$ ,两个半径值越接近,则该因子的值越趋近于 1,反之,趋近于 0;第二个因子描述的是圆心之间的关系,即两个圆的位置关系,平面上两个圆形的关系可包括外离、外切、相交、内切、内含以及重合几种。设圆心距  $d' = \sqrt{(x_{d1} - x_{d2})^2 + (y_{d1} - y_{d2})^2}$ ,当外离、外切时,  $d' \geq R_{d1} + R_{d2}$ ,此时第二个因子的值域为  $(-\infty, 0]$ ;当相交、内切、内含以及重合时,  $d' < R_{d1} + R_{d2}$ ,此时第二个因子的值域为  $(0, 1]$ ,而且越接近重合时,该因子的值越接近于 1。因此,当  $conf \leq 0$  时,该边缘一定不是圆形;当  $0 < conf \leq 1$  时,  $conf$  的值越接近 1,表明该边缘是圆形的可信度就越高。本文将该值设为 0.5,若  $conf$  值在 0.5 到 1 之间,则用整条边缘上的  $N$  个点重新进行最小二乘圆拟合,得到圆心为  $(x_0, y_0)$ ,半径为  $R_0$  的圆。计算相对标准差:

$$\delta = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{\sum |(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - R_0^2|}{N}}. \quad (2)$$

如果  $\delta$  满足下式,则认为该边缘是圆形或圆形的部分弧 ( $k_1$  为小于 1 的正常数,本文取为 0.1):

$$\delta < k_1 R_0. \quad (3)$$

由于噪声或遮挡等原因,存在多条边缘属于同一个圆形的情况。因此,对得到的圆心和半径根据式(1)进行计算,将  $conf$  值在 0.5 到 1 之间的边缘整合在一起,拟合成一个圆。

### 3.3 线段识别及靶标判别

接下来,要根据线段特征确定得到的圆是否是靶标上的圆。

靶标的平面简图如图 5 所示,图中标出了靶标的物理尺寸,  $r$  为圆环内半径,  $m_1$  为圆环中心到线段靠近圆环一侧端点的距离,  $m_2$  为圆环中心到线段另一个端点的距离,  $w$  为圆环宽度,且  $w = 0.1r$ ,  $m_1 = r + 2w = 1.2r$ ,  $m_2 = r + m_1 = 2.2r$ 。令  $s_1 = 2m_1$ ,  $s_2 = 2m_2$ ,并设以圆环中心为中心,边长分别为  $s_1$ 、 $s_2$  的正方形为  $S_1$ 、 $S_2$ ,则线段所在的区域  $S$  可由下式表达:

$$S = \bar{S}_1 \cap S_2, \quad (4)$$

其中  $\bar{S}_1$  表示  $S_1$  的补集。

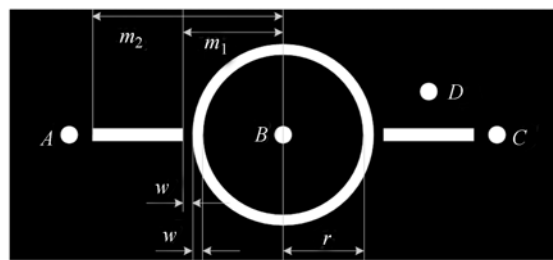


图 5 靶标简图

Fig. 5 Target diagram

在圆检测过程中,得到的圆心为  $(x_0, y_0)$ ,半径为  $R_0$ ,因此图像中  $s_1$ 、 $s_2$  相应的尺寸分别为  $2.4R_0$ 、 $4.4R_0$ 。考虑到实际噪声及误差的影响,将边长分别修订为  $2.8R_0$ 、 $4R_0$ 。

由于  $S$  区域较小,而且通常只包含少数的简单边缘,因此在边缘二值图像中,按照单像素边缘跟踪算法很快就能求得  $S$  内所有边缘,依次判断每条边缘是否为线段。具体方法如下:

利用最小二乘法将边缘点进行直线拟合,得

到方程为:

$$y=kx+b, \quad (5)$$

其中  $k$  和  $b$  分别为斜率和截距。

利用点到直线的距离公式分别求取边缘上各点到直线的距离,并计算距离的标准差:

$$d_{\delta} = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n-1}}, \quad (6)$$

其中:  $d_{\delta}$  表示标准差,  $d_i$  表示第  $i$  个点到直线的距离,  $\bar{d}$  表示距离的平均值,  $n$  表示边缘点数。若边缘为线段,  $d_{\delta}$  的值应该为 0, 然而数字图像中存在误差, 当  $d_{\delta} < 1$  时, 均认为该边缘是直线。计算圆心到该直线的距离, 如果其值小于  $k_2 R_0$  ( $k_2$  为小于 1 的常数, 本文取为 0.1), 则认为该直线是靶上线段对应的边缘。在理想边缘图像中, 线段  $l_1$ 、 $l_2$  在区域  $S$  内对应 4 条满足条件的直线, 但考虑到噪声、断裂等原因, 如果符合上述条件的直线数目在 2 到 6 条之间, 则确定该圆为靶标上的圆, 其圆心即为靶标中心, 完成靶标识别。在靶标所在的区域内检测标识点, 求得标识点的中心, 进行位姿测量。关于检测标识点和位姿测量不属于本文讨论的内容。

#### 4 实验结果与分析

为了验证算法的准确性、实时性和鲁棒性, 本文进行了大量实验。硬件环境: 计算机 (CPU 主频为 3.40GHz, 内存为 4G); 软件环境: VC++6.0。实验中, 靶标放置在与实际应用背景相似的太空包袱材料上面, 图像大小均为 800 pixel × 600 pixel。

本文算法处理得到的结果如图 6 所示。(a) 为相机距离靶标 500 mm 拍摄的图像;(b) 为本文跟踪算法得到的单像素边缘, 该步骤可减少后期

的运算量, 而且单像素有利于提高识别精度;(c) 为粗检测后的边缘, 粗检测滤除了大部分非圆边缘, 不仅减少了后期的运算量, 而且降低了误检的几率;(d) 为精检测的结果, 共检测到 5 个圆形。大圆为靶标上的圆, 由于圆环的宽度仅为内半径的 1/10, 因此在圆检测中被重组为 1 个圆。在粗检测结果中, 4 个小圆的边缘已经不完整, 只包含部分弧段, 但精检测时都能够准确检测到, 证明了本文圆检测算法对残缺圆具有较强的识别能力;(e) 为线段检测结果。根据得到的圆参数确定区域  $S$ , 只有在大圆对应的  $S$  内才能检测到符合条件的直线, 因此该圆为靶标圆, 完成靶标识别, 结果如(f)所示。实验中, Canny 检测用时 67 ms, 边缘跟踪用时 21 ms, 圆检测用时 24 ms, 线段检测用时 9 ms, 总用时 121 ms。此外, 分别利用 HT 算法和 RCD 算法对该图进行了对比实验, 圆检测部分用时列于表 1, 单位为毫秒(ms)。由表 1 可知, 本文算法圆检测所用时间和 HT、RCD 算法相比, 分别减少了 5.79 倍和 2.7 倍, 可以应用于实时图像处理。

表 1 圆检测部分用时对比

Tab. 1 Comparison for consuming time on circle detection

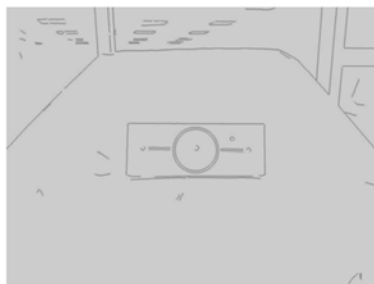
Algorithms	HT	RCD	proposed method
$t/ms$	139	65	24

另外还对相机距离靶标分别为 1 000 mm 和 1 500 mm 进行了实验, 结果如图 7 所示。实验表明, 在 0~1 500 mm 范围内算法可以稳定工作。

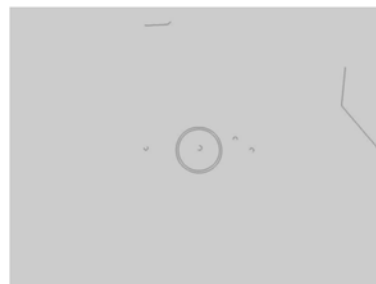
为了验证算法的鲁棒性, 针对不同光照、旋转、噪声污染等情况进行了实验, 结果如图 8 所示。(a) 为强光照射的情况。(b)、(c) 分别为光线较弱和逆光的情况。(d) 代表了绕靶标立柱旋转



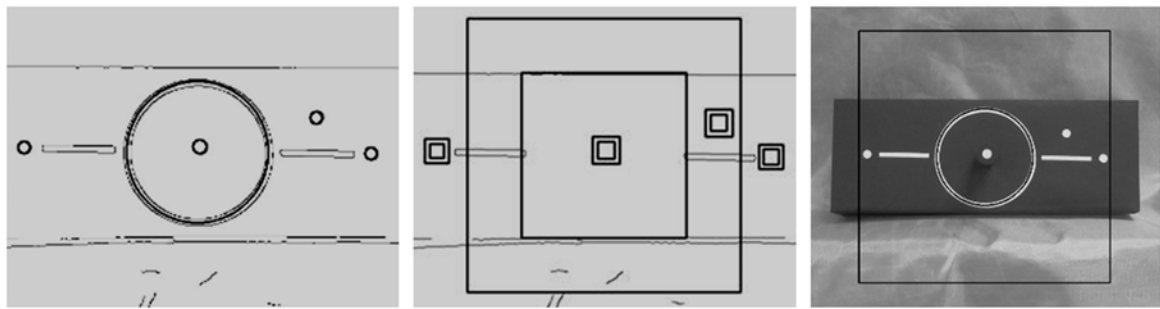
(a) 原图  
(a) Original image



(b) 边缘跟踪结果  
(b) Edge tracking results



(c) 粗检测后的识别结果  
(c) Results after coarse detection



(d) 精检测识别结果 (e) 线段识别结果 (f) 靶标识别结果  
 (d) Result of fine detection (e) Results of line segment detection (f) Results of target identification

图 6 算法处理过程

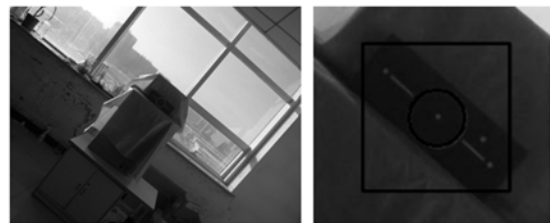
Fig. 6 Procedure of proposed algorithm



(a) 1 000 mm (b) 1 500 mm

图 7 不同距离的识别结果

Fig. 7 Recognition results in different distances



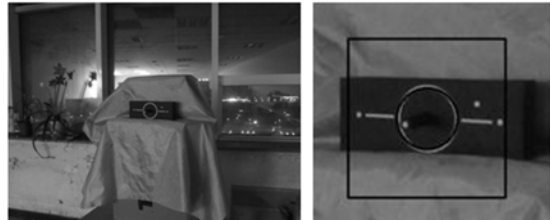
(d) 第一种旋转情况及结果

(d) Rotating image and its result in case 1



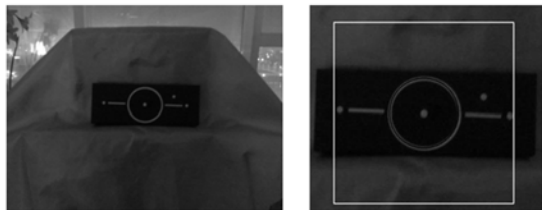
(a) 强光图像及结果局部图

(a) Bright image and its partial ampification graph



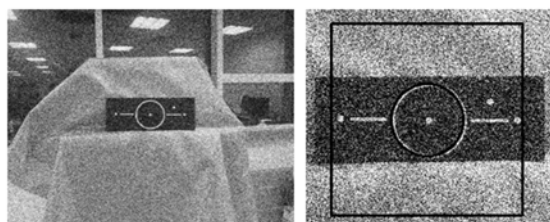
(e) 第二种旋转情况及结果

(e) Rotating image and its result in case 2



(b) 弱光图像及其结果

(b) Dim image and its partial ampification graph

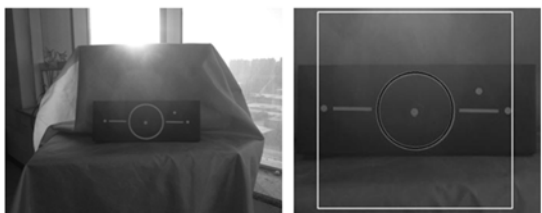


(f) 噪声污染图像及结果

(f) Noise image and its result

图 8 鲁棒性验证

Fig. 8 Validation for robustness



(c) 逆光图像及结果

(c) Backlight image and its partial ampification graph

的情况, (e) 代表了其它旋转情况, 该情况下旋转导致靶标圆略呈椭圆状。 (f) 中加入了均值为 0, 方差为 0.07 的高斯噪声。本组实验证明, 本文算法对光照、旋转及噪声不敏感, 抗干扰能力较强,

具有很好的鲁棒性。

## 5 结 论

本文提出了一种在复杂场景中快速、准确识别航天器靶标的方法。算法中,利用边缘跟踪得到了单像素的边缘序列,为准确识别奠定了基础;圆检测由粗检测和精检测两部分实现,运算量小,速度快,对小圆和残缺圆具有较强的识别能力,实用性强,可以应用到圆检测的其他领域;线段检测

方法简洁,不需要额外设定参数。实验结果表明,靶标识别算法对噪声、光照、旋转等不敏感,能够在复杂场景中稳定工作。处理时间小于 125 ms,满足航天实时图像处理的要求,目前算法已经成功应用于工程样机。

本文算法中,Canny 检测的耗时较多,超过总处理时间的 1/2。若能提高边缘检测速度,且可在边缘检测的同时得到连续的边缘,则处理时间可以进一步减少,这是下一步将要开展的研究工作。

### 参考文献:

- [1] 徐文福,刘宇,梁斌,等. 非合作航天器的相对位姿测量[J]. 光学精密工程,2009,17(7):1570-1581.  
XU W F, LIU Y, LIANG B, *et al.*. Measurement of relative poses between two non-cooperative spacecrafts[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(7): 1570-1581. (in Chinese)
- [2] 赵连军,刘恩海,张文明,等. 利用全局信息提取靶标特征的方法[J]. 光学学报,2014,34(4):166-171.  
ZHAO L J, LIU E H, ZHANG W M, *et al.*. Feature extraction of target based on global information [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4):166-171. (in Chinese)
- [3] HOWARD R T, BRYAN T C. DART AVGS flight results[C]. *Sensors and Systems for Space Applications, Proc. of SPIE, Bellingham, WA*, 2007,6555:1-10.
- [4] 夏军营. 空间目标的单目视觉位姿测量方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2012,1-5.  
XIA J Y. *Researches on monocular vision based pose measurements for space targets* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012, 1-5. (in Chinese)
- [5] WANG J Q, LU Y D, WANG J F. A new way in intelligent recognition improves control accuracy and efficiency for spacecrafts' rendezvous and docking [C]. *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Imaging Sensors and Applications, Proc. of SPIE*, 2013, 8908:2L1-2L6.
- [6] 王保丰,李广云,陈继华,等. 航天器交会对接中测量靶标的两种设计方法[J]. 宇航学报,2008,29(1):162-166.  
WANG B F, LI G Y, CHEN J H, *et al.*. Two methods of coded targets used in rendezvous and docking [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(1): 162-166. (in Chinese)
- [7] CHUN K L, HUANG Y H, SHEN S M, *et al.*. Efficient sampling strategy and refinement strategy for randomized circle detection[J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45(1): 252-263.
- [8] PHILIP K P, DOVE E L, MCPHERSON D D, *et al.*. The fuzzy Hough transform-feature extraction in medical images[J]. *Medical Imaging*, 1994, 13(2): 235-240.
- [9] 林金龙,石青云. 用点 Hough 变换实现圆检测的方法[J]. 计算机工程,2003,29(11):17-18,160.  
LIN J L, SHI Q Y. Circle recognition through a point Hough transformation[J]. *Computer Engineering*, 2003, 29(11):17-18,160. (in Chinese)
- [10] 叶峰,陈灿杰,赖乙宗,等. 基于有序 Hough 变换的快速圆检测算法[J]. 光学精密工程,2014,22(4):1105-1111.  
YE F, CHEN C J, LAI Y Z, *et al.*. Fast circle detection algorithm using sequenced Hough transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 1105-1111. (in Chinese)
- [11] RAMIREZ V A, GARCIA CAPULIN H, GARCIA A P, *et al.*. Circle detection on images using Genetic Algorithms [J]. *Pattern Recognition*, 2006,27(6):652-657.
- [12] CUEVAS E, VARIO F, ENCISO V O, *et al.*. Fast algorithm for multiple-circle detection on images using learning automata[J]. *Image Processing*, 2012, 6(8):1124-1135.
- [13] IKONEN E, NAJIM K. Online optimization of replacement policies using learning automata[J]. *International Journal of Systems Science*, 2008, 39

- (3): 237-249.
- [14] CHEN T C, CHUNG K L. An efficient randomized algorithm for detecting circles [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, 83 (2): 172-191.
- [15] 邸男, 朱明, 王毅楠. 提取直线特征实现机场跑道实时检测[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2336-2341.
- DI N, ZHU M, WANG Y N. Real time detection of airport runway by extracting line feature[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (9): 2336-2341. (in Chinese)
- [16] FERNANDES, LEANDRO A F, OLIVEIRA, *et al.*. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme[J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41 (1): 299-314.
- [17] GROMPONE R, JAKUBOWICZ J, MOREL J M, *et al.*. On straight line segment detection [J]. *Math. Image*. 2008, 32 (3), 313-347.
- [18] 温卓漫, 王延杰, 邸男, 等. 空间站机械臂位姿测量中合作靶标的快速识别[J]. *航空学报*, 2015, 36 (4): 1330-1338.
- WEN ZH M, WANG Y J, DI N, *et al.*. Fast recognition of cooperative target used for position and orientation measurement of space station's robot arm [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(4): 1330-1338. (in Chinese)
- [19] 武治国, 李桂菊. 动态目标识别中的实时复杂巡航场景运动检测[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(5): 844-849.
- WU ZH G, LI G J. Real-time complex cruise scene detection technology in target recognition [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 844-849. (in Chinese)
- [20] 杨云, 岳柱. 基于融合图像轮廓矩和 Harris 角点方法的遮挡人体目标识别研究[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(2): 273-277.
- YANG Y, YUE ZH. Human body target recognition under occlusion based on fusion of image Contour moment and Harris angular points[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(2): 273-277. (in Chinese)
- [21] CUEVAS E, OSONA-ENCISO V, WARIO F, *et al.*. Automatic multiple circle detection based on artificial immune systems[J]. *Expert Syst*, 2012, 39(1): 713-722.

#### 作者简介:



初广丽(1977—),女,吉林白城人,博士研究生,副教授,主要从事计算机图像处理方面的研究。E-mail: qibao-bei2002@163.com

#### 导师简介:



王延杰(1963—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1988年于吉林工业大学获得学士学位,1998年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事图像处理,电视跟踪和自动目标识别技术方面的研究。E-mail: wangyj@ciomp.ac.cn