

文章编号 1004-924X(2015)02-0566-07

基于火星探测的人工标志识别定位

李莹*, 叶培建, 彭兢, 杜颖
(中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 为了实现火星探测中巡视器以及着陆器上人工标志的识别定位, 结合好奇号火星车的人工标志特征和火星环境的特点, 提出一种人工标志两步识别定位方法。第一步是在图像中识别人工标志并进行初步定位。该步骤通过图像边缘检测, 提取并跟踪各轮廓边界。针对人工标志存在的沙尘附着、光照不均、以及阴影遮挡等问题, 提出一种基于火星环境的自适应边缘检测方法。采用最小二乘椭圆拟合方法对每一个轮廓边界进行椭圆拟合, 将拟合所得的椭圆参数作为标志的初步定位结果。第二步是对各人工标志进行精确定位。根据初步定位的椭圆参数进行图像分割。考虑标志中心为两条直线的交点, 故采用 Hough 变换对各分割出的图像块进行直线检测, 并对交点进行重定位, 从而得到人工标志的精确位置。对好奇号火星车的标志图像进行了试验, 结果表明: 提出的方法能够检测存在较大变形的人工标志, 对标志中心的定位精度稳定在 1 个像素以内。该对沙尘附着、光照以及阴影遮挡具有一定的鲁棒性, 基本满足火星探测中人工标志定位的精度和鲁棒性要求。

关键词: 火星探测; 目标识别; 人工标志; 标志定位; 光照鲁棒性

中图分类号: P185.31; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0566

Artificial target recognition and location based on Mars exploration

LI Ying*, YE Pei-jian, PENG Jing, DU Ying

(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: angelina-cast@hotmail.com

Abstract: To recognize and locate artificial targets of a rover and a lander in Mars exploration, a two-step artificial target location method is proposed by combination of the characters of artificial targets of the curiosity rover with Mars environments. The first step is to recognize the artificial targets in the image and to locate them preliminary. The edge information is obtained by edge detection, and contour feature-points are extracted by edge tracing. As the artificial targets in the Mars surface environment always are adhered and deposited by dust particles and are suffer from the uneven illumination and shadow block, the paper proposes an adaptive edge detection algorithm based on Mars environment. The algorithm uses least square ellipse fitting method to fit and recognize the artificial targets in the image and locate the center of each artificial target preliminary. The second step is to locate every artificial targets accurately. According to the preliminary result of ellipse fitting, the image is cut into pieces with one ellipse in each piece. Since the center of the artificial target is the intersection point of two intersecting lines, the Hough transform is used to detect the lines. The coordinate of intersection

收稿日期: 2014-09-02; 修订日期: 2014-09-30.

基金项目: 中国空间技术研究院预研基金资助项目

point is relocated and to obtain the center of the artificial target precisely. Experiments are carried out based on artificial target images of curiosity rover. The experimental results indicate that the method proposed can be used in the targets with largely deformation, and the location accuracy is within 1 pixel. The method is robust to the dust adhesion, illumination and shadow effects, and satisfies the Mars exploration system requirements for the resolution and robustness.

Key words: Mars exploration; target recognition; artificial target; target location; illumination robust

1 引 言

人工标志作为重要的图像特征,被广泛地应用于深空探测领域^[1]。巡视器以及着陆器上均部署了一系列的人工标志,用于目标识别、视觉测量以及三维重建。标志定位通常包括边缘检测、标志识别以及中心定位三部分。

常用的边缘检测算子有 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子、LOG 算子以及 Canny 算子等。其中,Canny 算子采用高斯滤波器平滑图像,非极大值抑制细化边缘,双阈值技术去除虚假边缘,因此表现出良好的信噪比和检测精度,并得到了广泛应用^[2-3]。然而,采用 Canny 算子对火星车标志进行边缘提取时,表现出以下几点不足:首先,沙尘是火星表面的常见现象,而 Canny 算子对于沙尘较为敏感,在标志表面粘附沙尘颗粒的情况下,容易出现虚假边缘;其次,Canny 算子采用基于全局的固定阈值选取方法,需要人为设置高低阈值,并且需要根据图像光照情况反复进行调整,无法实现标志的自动提取;第三,当部分标志受阴影遮挡时,在标志上光照充足的部分灰度值偏高,而被遮挡部分的灰度值偏低,从而无法自适应选取边缘提取阈值;同时 Canny 算子通常会把阴影当作真实边缘,影响了标志提取精确性。为解决上述三方面问题,本文提出了一种基于火星环境的自适应边缘检测算法,该算法将在第 2 章进行描述。

标志识别是在边缘检测的基础上,根据标志的特性在图像中搜索相同或相似特性的过程。模板匹配^[4]是标志识别的一种常用方法,通过将模板图像在待搜索的图像中平移,平移过程中,不断计算模板和待搜索图像的相似程度来检测目标图像。最小二乘影像匹配算法^[5]由于考虑了影像灰度的仿射变形以及线性灰度畸变,因而表现出高精度的识别及定位效果。然而,应用模板匹配的

前提是待搜索图像中的标志与模板图之间没有较大形变,不变矩^[6]的匹配方法可以用来解决图像的仿射变形,但对于非线性形变,传统的模板匹配法是不适用的。此外,模板匹配计算量大,无法满足系统实时性的需求。本文根据圆形标志成像时为椭圆的特性,结合好奇号火星车人工标志的特点,提出一种适用于火星探测的人工标志两步识别定位方法。第 3 章将对该方法进行描述;第 4 章是试验结果与分析;第 5 章是结论。

2 基于火星环境的边缘检测算法

2.1 中值滤波

沙尘是火星表面的固有特性,当沙尘颗粒附着在人工标志的表面及周围时,将形成严重的干扰噪声,不利于人工标志的边缘提取。沙尘颗粒在图像中会表现出以下两点特性:

(1)若图像的灰度范围为 $[G_{\min}, G_{\max}]$,检测噪声的灰度阈值为 T_g ,沙尘颗粒像素的灰度值不在 $[G_{\min} - T_g, G_{\max} + T_g]$ 之内;

(2)沙尘颗粒的像素灰度值与其 8 邻域范围内的多数像素的灰度值有较大差别。

这两点特性符合椒盐噪声的特性标准^[7],因此首先采用中值滤波器消除图像的脉冲噪声,以平滑沙尘颗粒对图像造成的影响。

中值滤波是一种基于排序统计理论的非线性平滑技术,它以某像素为中心,对窗口内所有像素的灰度值从小到大排序,并取排序结果的中间值作为该像素的灰度值。中值滤波对脉冲噪声有很好的抑制作用,同时不会对图像带来过多的模糊效果。

中值滤波之后需进行一次图像对比度增强,使图像能够更清晰地突出重要细节。

2.2 基于积分图像的均值滤波

在图像中,光照和阴影的直接表现为像素灰度值的变化,当一个物体的一部分受光照影响表

现出较高的像素灰度值,而另一部分受阴影遮挡灰度值偏低时,很难选取一个合适的全局阈值对整体进行分割。一种可行的方法是采用局部阈值将某像素的灰度值 $f(x, y)$ 与周围 N 个像素的灰度均值进行比较,若其低于周围像素灰度均值的 $t\%$,则在二值图中置为黑,否则置为白,如图 1 所示。然而,这种方法只平滑了水平方向的像素灰度值,并未考虑其它梯度方向像素灰度值的变化。而且,每一次比较都需计算 N 个像素的灰度均值,计算量大且效率低。



图 1 周围 N 个像素灰度均值示意图

Fig. 1 Schematic diagram of average gray value of N pixels

为了解决这一问题,本文引入了积分图像的思想^[8-9],即通过计算原始图像的积分图,快速计算以 (x, y) 为中心, $w \times w$ 窗口内的灰度之和 $\sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{y=y_1}^{y_2} f(x, y)$,从而得到该窗口的灰度均值,如图 2 所示。相比于只比较水平方向 N 个像素的灰度均值,上述方法能够更客观地反映 (x, y) 点周围的灰度情况,较好地消除了光照及阴影对同一物体产生的灰度值差异。

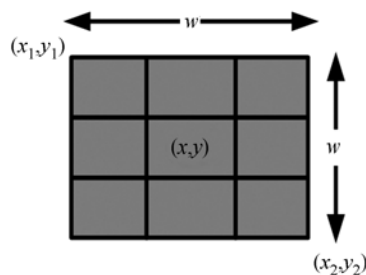


图 2 $w \times w$ 窗口的像素灰度均值示意图

Fig. 2 Schematic diagram of average gray value of pixels in $w \times w$ window

根据积分图像的思想, $I(x, y)$ 的值为:

$$I(x, y) = f(x, y) + I(x-1, y) + I(x, y-1) - I(x-1, y-1). \quad (1)$$

$w \times w$ 窗口的灰度和 $\sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{y=y_1}^{y_2} f(x, y)$ 如式(2)

所示:

$$\sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{y=y_1}^{y_2} f(x, y) = I(x_2, y_2) - I(x_2, y_1 - 1) - I(x_1 - 1, y_2) + I(x_1 - 1, y_1 - 1). \quad (2)$$

$w \times w$ 窗口的局部灰度均值 Avg_w 如式(3)

所示:

$$Avg_w = \frac{\sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{y=y_1}^{y_2} f(x, y)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}. \quad (3)$$

每个像素 (x, y) 在二值图中的值 $f_b(x, y)$ 如式(4)所示:

$$f_b(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) \leq Avg_w \times t\% \\ 1, & f(x, y) > Avg_w \times t\% \end{cases}. \quad (4)$$

采用积分图的方法尽管增加了一次计算积分图像的步骤,但在随后只需要通过式(2)和式(3)就可以快速得到以 (x, y) 为中心, $w \times w$ 窗口内的灰度均值 Avg_w ,消耗时间是一个常数。

采用基于窗口的均值滤波方法能够消除图像的高斯噪声,平滑光照和阴影造成的图像灰度值差异,具备一定的自适应能力。将其与中值滤波相结合,对火星环境下的图像就能有较好的预处理效果。

2.3 边缘检测

通过中值滤波和基于积分图的均值滤波得到图像的二值图。由于图像场景中存在的其它物体可能会对人工标志边缘提取造成影响,故通过搜索各像素 8 邻域内的连通对象,按照人工标志的大小,将超出标志大小一定范围的物体从二值图中移除,如式(5)和式(6)所示,其中 $[P_l, P_h]$ 为按照人工标志的大小所设定的连通区域的阈值范围, bw_1 用于移除像素少于 P_l 的对象,在此基础上再移除像素大于 P_h 的对象, bw_2 即为输出二值图,同时提取二值图 bw_2 中对象的轮廓。

$$bw_1 = bwareaopen(bw, P_l), \quad (5)$$

$$bw_2 = bw_1 - bwareaopen(bw, P_h). \quad (6)$$

3 人工标志的两步识别定位方法

在边缘检测的基础上,对人工标志进行识别定位。由于图像中的人工标志存在一定的非共面旋转以及非线性变形,导致待搜索图像中的标志与模板图像存在较大的差异,无法采用传统的模板匹配方法进行识别定位。本文通过分析好奇号

火星车人工标志的特点,提出一种人工标志的两步识别定位方法。图 3 是从好奇号火星车上截取的人工标志图像^[10]。

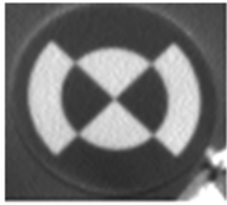


图 3 好奇号火星车的人工标志

Fig. 3 Artificial target on curiosity rover

3.1 基于椭圆拟合的初步定位

按照圆形标志透视成像后为椭圆的特性,通过椭圆拟合的方式在图像中搜索人工标志。在二值图的基础上,对每一个像素在其 8 邻域内进行边界跟踪。采用外边界跟踪的方式,减少边界跟踪的时间。边界跟踪的结果将返回 1 个 $n \times 1$ 维的 cell 数组 B 以及 1 个 2 维的连通区域矩阵 L ,其中, n 为所追踪到的连通区域的对象个数。每个 cell 由 1 个 $m \times 2$ 维的矩阵构成,对应于轮廓像素的坐标,其中, m 为所对应对象的轮廓像素数。

对每个 cell 对象采用最小二乘椭圆拟合算法进行椭圆检测以及定位。椭圆曲线方程的定义如式(7)所示,拟合所得的椭圆中心坐标 (x_0, y_0) 如式(8)所示^[11]:

$$x^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0, \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_0 = \frac{BE - CD}{C - B^2} \\ y_0 = \frac{BD - CE}{C - B^2} \end{cases}. \quad (8)$$

为了排除其他干扰对象,依据人工标志的特性设定了拟合对象条件:

(1)位置区域。根据先验知识中人工标志大致的方位信息,设定椭圆拟合的位置区域。

(2)轮廓周长。根据相机与人工标志的初始距离,将椭圆周长限定在一定的范围之内。

(3)形状因子。形状因子 k 的描述如式(9)所示,其中 s 为面积, L 为周长。

$$k = 4\pi S / L^2 \quad 0 < k \leq 1. \quad (9)$$

通过最小二乘椭圆拟合,可以得到椭圆的中心以及长短轴参数,并且排除了非椭圆区域。然而,通过椭圆拟合所得的椭圆中心虽然能反映人工标志的位置坐标,但该坐标与人工标志的实际

中心点坐标仍存在一定偏差,无法满足火星探测任务的需求。因此还需对人工标志做进一步的精确定位。

3.2 基于 Hough 变换的精确定位

注意到好奇号火星车人工标志的中心是两条相交直线的交点,因此可以采用 Hough 变换先进行直线检测,再计算直线的交点,即为标志的中心。

Hough 变换^[12]是一种图像空间和参数空间的变换,常用于直线检测。根据椭圆拟合所得的初步定位结果,过椭圆中心沿椭圆长轴进行图像分割,使各分割出的图像块中仅包含一个人工标志,分割的时候注意留有一定的误差余量。对各图像块采用 Hough 变换进行直线检测。在直线检测中可能出现检测出的线段不连续的情况,此时需要根据 Hough 变换所输出线段的方向梯度进行判断,若方向一致,而且相邻线段端点之间的距离在一定范围内,则可以对线段进行合并。计算各图像块中两条最长的相交直线的交点,并将其重定位到原图像空间中,从而完成人工标志的精确定位。

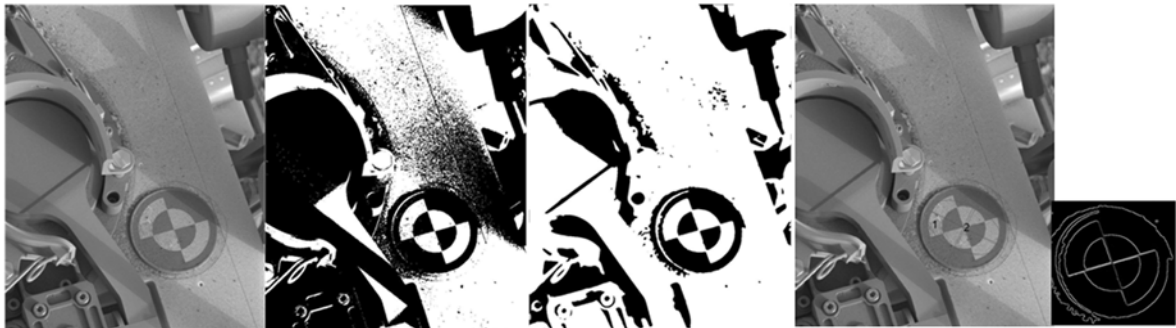
4 实验结果与分析

由于地球成像并不能准确描述火星的成像环境,为了验证所提方法的性能,采用好奇号火星车拍摄的人工标志图像进行了多组定位实验,其中的两组实验结果分别如图 4 和图 5 所示。

图 4(a)截取自好奇号火星车在第 367 个火星日由桅杆相机拍摄的图像,可以看到标志周围粘附了一些沙尘颗粒,使得标志的一部分受到周围物体阴影的遮挡,而另一部分受到太阳光的照射。图 4(b)是对原图直接二值化产生的图像,可以看出沙尘及阴影对图像造成了严重的干扰噪声。图 4(c)是采用本文提出的基于火星环境的自适应边缘检测算法处理后的二值图,可以看到处理后的图像阴影和沙尘噪声得到了有效抑制,同时较好地保留了标志的边缘细节。图 4(d)是对二值图进行边缘跟踪后,采用最小二乘椭圆拟合得到的标志中心初始定位结果。滤波处理后的二值图中标志边缘清晰,椭圆拟合算法可以较为准确地拟合椭圆以及中心定位。图 4(e)是按照初步定位结果进行图像分割后,采用 Hough 变换

进行直线检测的结果,可以看到 Hough 变换精确地拟合出了两条相交的直线,精定位误差在 1

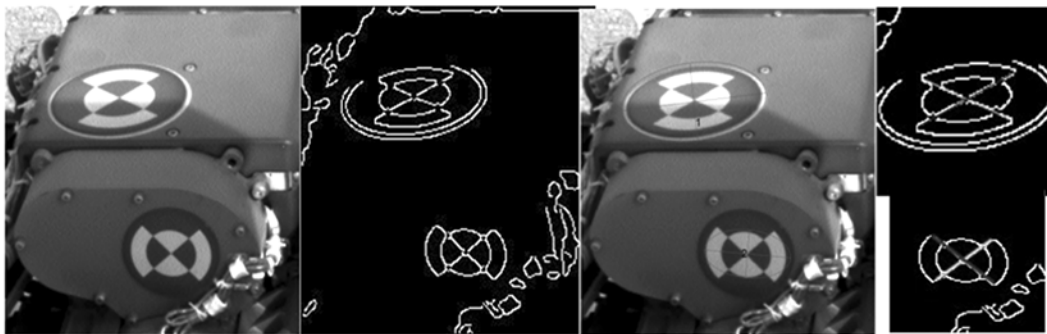
pixel 以内。初始定位以及精定位的结果如表 1 所示。



(a)原图 (b)图像二值化 (c)经本文算法处理后的二值图 (d)初步定位 (e)精确定位
 (a)Original image (b)Image binaryzation (c)Binary image processed by proposed algorithm (d)Preliminary location (e)Accurate location

图 4 基于火星环境的边缘检测及人工标志的两步识别定位方法

Fig. 4 Edge detection based on Mars environment and two-step artificial target location method



(a)原图 (b)Canny 自适应边缘检测 (c)初步定位 (d)精确定位
 (a)Original image (b)Adaptive edge detection by Canny algorithm (c)Preliminary location (d)Accurate location

图 5 人工标志的两步识别定位

Fig. 5 Two-step artificial target location

表 1 图 4 中的人工标志定位精度

Tab. 1 Location errors of artificial target center of Fig. 4

拟合出 的椭圆	标志中 心坐标	初步 定位	精确 定位	精确定 位偏差
椭圆 1	(496, 663)	(500. 2268, 664. 1336)	(496. 5939, 663. 1580)	(0. 5939, 0. 1580)
椭圆 2	(496, 663)	(495. 7667, 660. 5039)		

图 5(a)截取自好奇号火星车在第 21 个火星日由导航相机拍摄的图像,可以看到图像中存在

2 个非共面的标志。由于拍摄日期距火星车着陆时间很近,沙尘并未对标志图像产生影响,因此采用 Canny 算法提取了图像边缘并利用 Otsu 算法进行自适应阈值选取,如图 5(b)所示。图 5(c)是采用最小二乘椭圆拟合得到的标志中心初始定位结果,可以看到尽管 2 个标志存在较大的形变,但椭圆拟合的方法仍较准确地提取出了 2 个标志的中心。图 5(d)为采用 Hough 变换进行直线检测的结果,可以看到对于 2 个标志 Hough 变换都能够进行精确的直线拟合,精定位的误差在 1 pixel 以内。初步定位以及精定位的结果如表 2 所示。

表2 图5中的人工标志定位精度

Tab. 2 Location errors of artificial target center of Fig. 5

拟合出的椭圆	标志中心坐标	初步定位	精确定位	精确定位偏差
椭圆1	(82,60)	(81.4320, 61.5494)	(82.6626, 60.5697)	(0.6626, 0.5697)
椭圆2	(119,162)	(120.0678, 161.1743)	(119.7420, 162.2007)	(0.7420, 0.2007)

5 结论

本文针对火星探测中的人工标志识别定位问题展开了研究,提出了一种人工标志的两步识别定位方法。针对火星表面的环境特点,通过分析几种常用边缘检测算法,提出了一种基于火星环

境的边缘检测算法。对好奇号火星车的人工标志图像进行了定位实验,实验结果表明:人工标志的两步识别定位法的定位精度稳定在1 pixel以内,基于火星环境的边缘检测算法对沙尘附着、光照以及阴影遮挡具有鲁棒性。该算法在一定程度上解决了因非线性形变导致巡视器以及着陆器器上的人工标志识别困难的问题,基本满足了火星探测人工标志识别定位的要求,能够应用于我国未来火星探测器上人工标志的识别与定位。

该方法的不足之处在于如果人工标志周围场景纹理特征丰富,其它类似大小的椭圆物体也会被检测出来,在椭圆拟合的时候需设定较强的约束条件。下一步工作将针对算法的适应性、鲁棒性以及精度开展研究。

参考文献:

- [1] 叶培建,彭兢. 深空探测与我国深空探测展望[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10):13-18.
YE P J, PENG J. Deep space exploration and its prospect in China [J]. *Engineering Sciences*, 2006, 8(10):13-18. (in Chinese)
- [2] 宋丽梅,陈昌曼,陈卓,等. 环状编码标记点的检测与识别[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3239-3247.
SONG L M, CHEN CH M, CHEN ZH, *et al.*. Detection and recognition of cyclic coded targets [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3239-3247. (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, 21(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, 21(4):1054-1061. (in Chinese)
- [4] WU T, TOET A. Speed-up template matching through integral image based weak classifiers [J]. *Journal of Pattern Recognition Research*, 2014, 1: 1-12.
- [5] 智喜洋,张伟,侯晴宇,等. 影响测绘相机匹配精度的辐射指标量化[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 387-394.
ZHI X Y, ZHANG W, HOU Q Y, *et al.*. Quantification for radiometric specifications impacting on matching accuracy of mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 387-394. (in Chinese)
- [6] 谢志江,吕波,刘琴,等. 旋转不变性模板匹配快速算法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2013, 43(3): 711-717.
XIE ZH J, LV B, LIU Q, *et al.*. Rotation-invariant and fast image template matching algorithm [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2013, 43(3): 711-717. (in Chinese)
- [7] 章毓晋. 图像工程[M]. 北京:清华大学出版社, 2012.
ZHANG Y J. *Image Engineering* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)
- [8] BRADLEY D, ROTH G. Adaptive thresholding using the integral image[J]. *Journal of Graphics, Gpu, and Game Tools*, 2007, 12(2): 13-21.
- [9] VIOLA P, JONES M J. Robust real-time face detection [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 57(2): 137-154.
- [10] NASA. MSL curiosity analyst's notebook [EB/OL]. <https://an.rsl.wustl.edu/msl/mslbrowser/default.aspx>.
- [11] 范生宏,黄桂平,陈继华,等. Canny算子对人工标志中心的亚像素精度定位[J]. 测绘科学技术学

报, 2006, 23(1): 76-78.

FAN SH H, HUANG G P, CHEN J H, *et al.*. Subpixel accuracy artificial target location using Canny operator [J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2006, 23(1): 76-

78. (in Chinese)

[12] HEROUT A, DUBSKÁ M, HAVEL J. *Review of Hough Transform for Line Detection* [M]. London: Springer, 2013: 3-16.

作者简介:



李莹(1984—),女,江西景德镇人,博士研究生,工程师,2005年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2008年于中国空间技术研究院获得硕士学位,主要从事视觉导航以及航天器总体设计方面的研究。E-mail: angelina-cast@hot-mail.com

导师简介:



叶培建(1945—),男,江苏泰兴人,研究员,院士,1967年毕业于浙江大学,1985年于瑞士纳沙泰尔大学获得科学博士学位,现主要从事空间飞行器,尤其是深空探测总体方案和信息处理方面的研究。E-mail: yepiejian@cast.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)