

文章编号 1004-924X(2011)12-3043-06

基于能量累加的空间目标星像质心定位

孙瑾秋^{1*}, 周 军¹, 张 臻², 张永鹏²

(1. 西北工业大学 精确制导与控制研究所, 陕西 西安 710072; 2. 西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710129)

摘要:研究了 CCD 观测图像的亚像素级高精度质心定位方法以提高目标星像的天文定位精度。分析了影响定位精度的主要因素, 如图像噪声、离散化采样误差及定位窗口选择等, 结合 CCD 弥散斑的成像特性, 提出了一种基于能量累加的空间目标星像质心定位方法。该方法使用插值方式降低离散采样点和实际感光区域光线照度的不一致性; 利用弥散斑能量累加自适应地确定目标星像的有效窗口, 优化目标星像灰度, 消除随机噪声的影响; 并采用平方加权质心定位方法进行质心计算。实验结果表明, 该方法具有较强的抗干扰能力和稳定性, 定位精度可达 0.01 pixel, 适用于低信噪比条件下的质心定位计算。

关键词:天体测量; 空间目标; 质心定位; 能量累加

中图分类号: TN386.5; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111912.3043

Centroid location for space targets based on energy accumulation

SUN Jin-qi^{1*}, ZHOU Jun¹, ZHANG Zhen², ZHANG Yong-peng²

(1. Institute of Precision Guidance and Control,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. College of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

* Corresponding author, E-mail: sunjinqi@nwpu.edu.cn

Abstract: Sub-pixel positioning technology for CCD images is proposed to improve the astronomical location precision of space targets. The main factors affecting the positioning accuracy of target centroids, such as image noise, discrete sampling error and window size selection are analyzed. Combining with the CCD imaging characteristics for dispersion spots, a location method for target centroids based on energy accumulation is proposed. This method uses the interpolation technique to reduce the illumination inconsistency between actual sensitive area and discrete sample points, and uses the energy accumulation of dispersion spot to select the efficient target window for optimizing target gray and eliminating random noises. Finally, a squared weighted centroid localization method is taken to calculate the centroid position. Experimental results show that the method has strong anti-interference ability and stability. It can offer a positioning accuracy of 0.01 pixel and is suitable for a low SNR condition.

Key words: astronomical measurement; space target; centroid location; energy accumulation

收稿日期: 2011-03-31; 修订日期: 2011-05-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60872145); 高等学校科技创新工程重大项目培育基金资助项目 (No. 708085)

1 引言

随着数字图像处理技术的发展,通过对观测图像中参考恒星定位来获得未知目标坐标的天体测量技术已经实现。空间目标观测系统将恒星目标看作是理想的点光源,通过离焦光学系统来实现星点目标的弥散成像。通常这种方式采集的星点目标在 CCD 中仅占几个像元,通过细分定位技术提高硬件设备的测量精度,为未知目标的角秒级高精度定位技术奠定基础。现有的亚像素级质心定位技术^[1-2]按处理手段可划分为插值技术和拟合技术两类,其中插值技术包括质心法、灰度加权质心法、双线性插值法等,拟合技术则包括高斯曲面拟合、抛物线拟合等。传统的插值技术易于实现,但是对峰值两侧弱信号的依赖性较多,抗噪声干扰能力较弱,噪声增大时,其精度降低;而拟合法处理过程复杂,但精度较高。在实际应用中,多采用插值方式进行星点的质心定位。

插值方式的质心定位方法通常选定一个合适的阈值,对星点图像进行二值化处理,高于阈值的部分作为星点目标的有效区域并参与质心的计算。文献[3]证明了选定适合的阈值,能够使得插值方式的定位精度与拟合方式的定位精度差距控制在 0.005 pixel 以内。影响插值定位精度的因素主要包括光学系统误差、图像传感器设备噪声、离散化采样误差、电路噪声及目标区域窗口选择等^[4-5]。因此,本文系统地分析了影响定位精度的主要因素,并以插值方式为基础,提出了一种基于能量累加的高精度质心定位算法。

2 质心定位精度误差分析

2.1 图像离散化和噪声对星点定位精度的影响^[6-7]

空间目标图像的像点灰度分布符合高斯型点扩展函数模型,如式(1)所示:

$$I(x, y) = I_{\max} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_c)^2}{2\sigma_y^2}\right], \quad (1)$$

式中, x, y 为星像的位置参数,假定 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_{\text{psf}}$, 为高斯弥散半径, x_c, y_c 为星像的横、纵质心坐标, I_{\max} 为星像的灰度最大值。

目标图像的质心可以通过图像灰度分布函数的平衡点进行计算,由图像的一阶矩和零阶矩的比值给出,即:

$$\begin{cases} x_c = \frac{\iint_{(x,y) \in S_{\text{Region}}} x \cdot I(x, y) dx dy}{\iint_{(x,y) \in S_{\text{Region}}} I(x, y) dx dy} \\ y_c = \frac{\iint_{(x,y) \in S_{\text{Region}}} y \cdot I(x, y) dx dy}{\iint_{(x,y) \in S_{\text{Region}}} I(x, y) dx dy} \end{cases}, \quad (2)$$

式中, S_{Region} 表示目标星像区域, x, y 为星像的坐标值, $I(x, y)$ 为星像灰度函数。

通常获取的星像目标图像是离散化的,即采样值和实际感光区域光线照度的积分成比例,离散化表示如公式(3)所示:

$$\hat{x}_c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i I_i}{\sum_{i=1}^n I_i}, \quad \hat{y}_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i I_i}{\sum_{i=1}^n I_i}, \quad (3)$$

式中, \hat{x}_c, \hat{y}_c 为离散化后的星像质心, (x_i, y_i) 为第 i 个像元的几何中心坐标, I_i 为其对应的图像灰度函数的采样值。

通常情况下,将离散化的几何中心来近似代替照度分布的平衡点,由此导致的星像质心误差记为 σ_s 。

另外,由于 CCD 具有的散粒噪声、暗电流噪声、复位噪声等也会产生误差,而噪声模型可分为两种类型:CCD 成像过程中,与成像相关的光电子噪声、零信号输出噪声和热噪声可近似看作符合泊松分布的噪声模型;而在 CCD 摄像头输出图像时,由于电子线路中电荷转移信号放大模数变换等环节产生的读出噪声以及暗电流噪声等的影响,产生符合高斯分布的噪声模型。这些噪声将对检测目标图像的灰度值产生不确定性影响,噪声对灰度产生的不确定性记为 σ_n 。

由于 \hat{x}_c 与 \hat{y}_c 具有同样的效果,因此仅以 \hat{x}_c 为例进行分析。

假定离散化和噪声产生的两种误差不相关,可具体表示为式(4):

$$\sigma_{\hat{x}_c}^2 = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial \hat{x}_c}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \sigma_s^2 + \left(\frac{\partial \hat{x}_c}{\partial I_i} \right)^2 \cdot \sigma_n^2 \right], \quad (4)$$

式中, $\sigma_{\hat{x}_c}$ 表示 \hat{x}_c 总不确定性, σ_s 表示由于离散化的几何中心与照度分布的平衡点之间的近似引入

的不确定性, σ_n 表示由于噪声引入的不确定性。

若记:

$$I_w = \sum_{i=1}^n I_i; \frac{\partial \hat{x}_c}{\partial x_i} = \frac{I_i}{I_w}; \frac{\partial \hat{x}_c}{\partial I_i} = \frac{x_i - \hat{x}_c}{I_w}, \quad (5)$$

$$\text{SNR} = \frac{I_w/n - \mu}{\sigma_n} = \frac{T - \mu}{\sigma_n}, \quad (6)$$

式(6)中 SNR 为目标信噪比, μ 为噪声的均值, T 为目标灰度均值, 因此, 公式(4)即可变为:

$$\sigma_x^2 = \sigma_s^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_i}{I_w} \right)^2 + \left(\frac{1}{\mu/\sigma_n + \text{SNR}} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \hat{x}_c}{n} \right)^2, \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 星像质心定位的误差主要来源于系统误差和随机误差两方面。系统误差主要由于计算过程中采用像元的几何中心代替灰度函数的平衡点, 因此, 可通过提高采样点与感应区域光线照度的一致性来减小系统误差, 具体可采用插值的方式使离散化后的几何中心更加逼近灰度函数的平衡点来降低系统误差。另一种误差则是由于噪声引入的随机误差, 该误差则需要选择合适的窗口区域, 并提高目标的信噪比来进行优化。

2.2 窗口选择对质心定位精度的影响分析

目标区域窗口选择具体是指确定适当的窗口大小, 并认为窗口内像元即为目标的有效区域, 并直接参与质心计算中。

如公式(6)所示, 决定目标信噪比的因素有 3 个: 目标有效区域的灰度均值、背景灰度均值以及灰度方差。由于图像生成后, 图像的背景均值和方差已经确定, 因此, 仅有目标有效区域的灰度均值决定了目标信噪比。而如何有效地确定目标区域即窗口的选择至关重要, 它将直接决定质心定位的精度, 是高精度质心计算的关键。传统的窗口判定方式为: (1) 选定特定阈值, 通过二值化分割, 大于阈值的像元即为目标的有效区域; (2) 以目标光斑上的灰度极值点为中心, 直接开窗 $(m+1) \times (m+1)$ 为目标的有效区域, 其中, m 可直接给定, 一般选择 $m=3$, 但也可选择 $m=k\sigma_{\text{psf}}^{[8]}$ 。本文提出了一种新的窗口判定方式, 以成像系统的设计模型为依据, 通过光斑区域能量累加量自适应确定目标有效区域(具体计算方式详见下节)。本文通过平方加权质心法, 采用这 3 类不同窗口选择技术进行了分析。

如图 1 和表 1 所示, 利用能量累加窗口选择方法进行目标有效区域的判定, 定位稳定性和精

度最好; 固定窗口方法定位精度次之, 由于其窗口位置依赖于灰度极值点的位置, 使其稳定性次之; 阈值法则受到固定阈值的限制, 定位稳定性和定位精度都较差。

从以上分析可以看出, 通过插值技术可削弱离散化采样引入的系统误差, 通过判定合适的目标星像窗口大小可有效地降低传感器噪声等引入的随机定位误差, 实现高精度的目标星像质心定位。

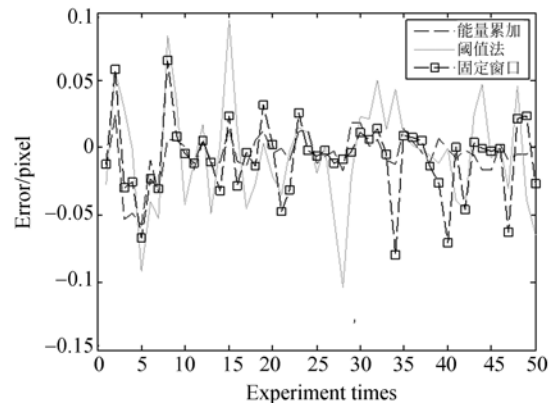


图 1 不同窗口判定方式的定位精度比较

Fig. 1 Comparison of positioning precision with different window size selection methods

表 1 不同窗口选择方法定位误差比较

Tab. 1 Comparison of positioning errors with different window size selection methods

50 次 误差均值	阈值法	固定窗	能量累加
	0.003 1	0.002 4	0.001 7

3 基于能量累加的质心定位方法

本文提出了基于弥散斑能量累加的高精度亚像素级质心定位方法。该方法首先通过图像插值细分技术提高采样点和感光区域光线照度的一致性。其中, 插值后的 (u, v) 位置的灰度值 $f(u, v)$ 可通过如下公式计算得到:

$$f(u, v) = f(i, j)(1 - \alpha)(1 - \beta) + f(i+1, j)\alpha(1 - \beta) + f(i, j+1)(1 - \alpha)\beta + f(i+1, j+1)\alpha\beta, \quad (8)$$

$$\text{式中 } \alpha = \frac{x_u - x_i}{x_{i+1} - x_i}, \beta = \frac{y_v - y_j}{y_{j+1} - y_j}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_u = x_i + 0.5(x_{i+1} - x_i) \\ y_v = y_j + 0.5(y_{j+1} - y_j) \end{cases}, \quad (10)$$

其次,通过弥散斑能量累加确定有效的窗口区域。

计算区域能量,如公式(11)。其中, E 表示计算的粗定位目标区域的能量值, x 和 y 表示区域内的坐标, pos_top , pos_down , pos_left , pos_right 分别表示区域的上、下、左、右边界。

$$E = \sum_{x=pos_left}^{pos_right} \sum_{y=pos_top}^{pos_down} I(x, y)^2. \quad (11)$$

进行能量集中区域提取时,需要同时满足公式(12)和公式(13)的条件,即当 $I(x, y)$ 大于阈值 Ths' 时,计算其能量,需要满足能量大于总能量的 η 倍,若不满足,需要重新调整 Ths' 的值,直到同时满足这两个条件。其中, η 表示 CCD 相机弥散斑能量集中度 ($\eta=80\%$)。 Ths' 表示满足能量集中度后的新的判定阈值。

$$I'(x', y') = \begin{cases} 1, & I(x, y) \geq Ths' \\ 0, & I(x, y) < Ths' \end{cases}, \quad (12)$$

$$\sum_{x'=pos_left}^{pos_right} \sum_{y'=pos_top}^{pos_down} I'(x', y')^2 \geq \eta E. \quad (13)$$

然后,对提取的目标星像有效窗口内的像元进行灰度优化,降低噪声的影响。具体计算过程如式(14)所示。

$$\begin{cases} I'(x, y) = I(x, y) - Ths, & I(x, y) = 1 \\ I'(x, y) = 0, & I(x, y) = 0 \end{cases}. \quad (14)$$

最后,通过优化后的目标星像,计算质心坐标位置 (\hat{x}, \hat{y}) ,具体计算过程如式(15)所示。

$$\begin{cases} \hat{x} = \frac{\sum_{x=pos_left}^{pos_right} \sum_{y=pos_top}^{pos_down} x \times I'(x, y)^2}{\sum_{x=pos_left}^{pos_right} \sum_{y=pos_top}^{pos_down} I'(x, y)^2} \\ \hat{y} = \frac{\sum_{x=pos_left}^{pos_right} \sum_{y=pos_top}^{pos_down} y \times I'(x, y)^2}{\sum_{x=pos_left}^{pos_right} \sum_{y=pos_top}^{pos_down} I'(x, y)^2} \end{cases}. \quad (15)$$

4 仿真试验及结果分析

由于真实图像数据的定位精度无法直接评判,只能借助于天文定位后的结果进行分析。为了验证方法的有效性,本文通过生成仿真图像,进行了不同噪声条件及不同尺寸目标的定位精度及稳定性分析。仿真数据星像大小范围为[10, 20]

像元,灰度极大值 $I_{max} = 1$, $\sigma_{psf} = 2$,采用高斯分布生成仿真图像。算法运行环境为 Windows xp sp2,平台为 Matlab R2009a,硬件配置为 Intel 双核 2.4G CPU,1G 内存。其中,仿真图像中的噪声是先将每个像素替换成对应灰度值生成的泊松随机数,然后叠加高斯白噪声生成,插值点数选择为 3^[9],如图 2~图 3 所示。

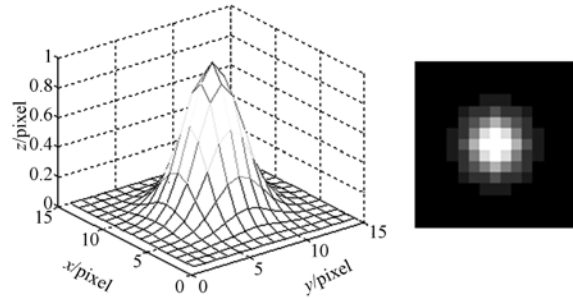


图 2 仿真星像图像
Fig. 2 Simulation of single star image

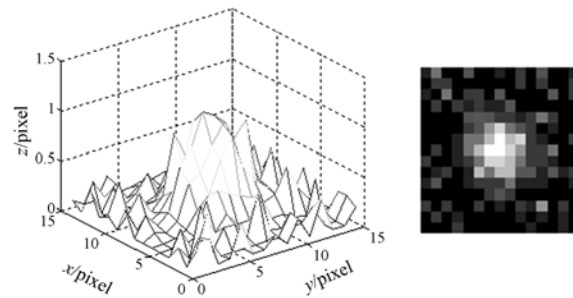


图 3 含噪声星像图像
Fig. 3 Simulation of single star image with noise

如图 4 和表 2 所示,能量累加法在信噪比逐渐降低的情况下,定位精度会有一定的减小,但精度误差的均值仍优于 0.01 pixel。随着信噪比的提高,定位精度的稳定性也有所提高。

表 2 不同信噪比条件下的定位误差均值比较

50 次	SNR=2	SNR=4	SNR=6
误差均值	0.007 9	0.007 1	0.005 5

如图 5 和表 3 所示,能量累加法的定位精度随着星像尺度的逐渐变化而改变,但精度误差的均值仍优于 0.01 pixel。如图 5 所示,随着星像尺

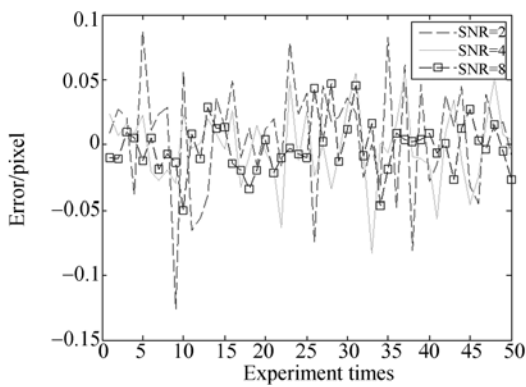


图 4 不同信噪比下质心定位误差曲线

Fig. 4 Curves of positioning errors with different SNRs

度的增大,定位精度的稳定性也有所提高(其中, Size 表示星像的半径)。

表 3 不同星像尺度条件下的定位误差均值比较

Tab.3 Comparison of positioning errors with different star sizes

50 次	Size=6	Size=8	Size=10
误差均值	0.005 2	0.004 2	0.004 5

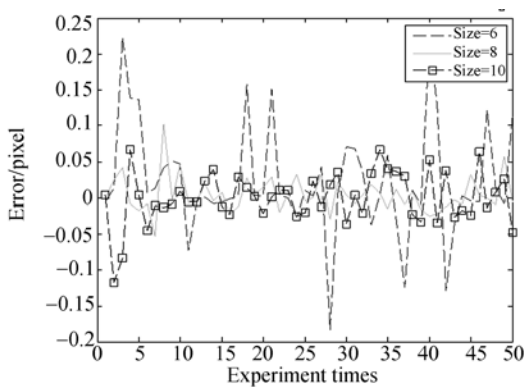


图 5 不同星像尺度的质心定位误差曲线

Fig. 5 Curves of positioning errors with different star sizes

在不同信噪比条件下,采用高斯曲面拟合^[10]、一阶矩质心定位、平方加权质心定位和基

于能量累加的质心定位法分别计算定位误差,采用 50 次定位误差的平均值作为相应算法的估计误差,结果如表 4 所示。可以看出,高斯曲面拟合法在信噪比高的情况下定位精度最高,基于能量累加的方法次之;而在低信噪比条件下,由于基于能量累加法具有较强的抗噪性,此时定位精度最高,平方加权质心法次之。

表 4 不同信噪比条件下的定位精度分析

Tab.4 Analysis of positioning precision with different SNRs

计算质心方法	信噪比	
	SNR=2	SNR=10
高斯曲面拟合法	0.014 3	0.001 1
一阶矩质心定位法	0.017 3	0.003 9
平方加权质心定位法	0.011 1	0.008 7
基于能量累加定位法	0.007 1	0.001 9

5 结 论

高精度的质心定位是天文定位的技术基础,而由于目标星像离散性影响,采用像元的几何中心代替灰度的平衡点将引入系统误差,同时由于图像传感器设备及电路噪声等影响将引入随机误差,并且由于受到目标有效区域窗口选择等因素的影响,大大降低了质心定位的精度。本文在系统分析影响定位精度主要因素的基础上,提出了一种基于弥散斑能量累加的质心定位方法,实验结果表明,通过插值方式可有效地削弱系统误差的影响;通过能量累积自适应确定目标星像窗口范围,并对目标星像区域进行灰度优化,可有效地避免低信噪比情况下对弱信号截断引入的定位误差。并且该方法具有较强的抗干扰能力和稳定性,平均定位精度可达到 0.01 pixel,可适用于低信噪比条件下的质心定位计算。

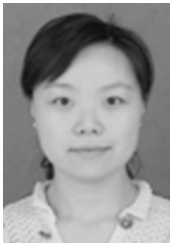
参考文献:

[1] 蔡喆,邓年茂.单星星图细分定位算法研究[J].计算机仿真,2006,23(3):34-37.
CAI ZH, DENG N M. Subdivided locating method of single star image for star sensor[J]. *Computer Simulation*, 2006, 3(3):34-37. (in Chinese)
[2] 赵剌,张怡.星图识别质心提取算法研究[J].空间电

子技术,2004(4):5-9.
ZHAO Y, ZHANG Y. The research of star chart recognition with centroid location algorithm [J]. *Space Electronic Technology*, 2004 (4): 5-9. (in Chinese)
[3] 冒蔚,季凯帆,李彬华,等.CCD 天体测量学[M].昆明:云南科技出版社,2003:60-73.
MAO W, JI K F, LI B H. *Celestial Metrology Based on CCD* [M]. Kunming: Yunnan Science

- Press, 2003:60-73. (in Chinese)
- [4] 刘海波, 谭吉春, 沈本剑, 等. 像差对星敏感器星点定位精度的影响[J]. 光学技术, 2009, 35(3): 471-473.
LIU H B, TAN J CH, SHEN B J, *et al.*. Aberrations effect on position accuracy of star sensor[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(3): 471-473. (in Chinese)
- [5] 张辉, 钟建勇, 袁家虎. 电路噪声对星敏感器星点定位精度的影响[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 1052-1056.
ZHANG H, ZHONG J Y, YUAN J H. Circuit noise effects on star sensor position accuracy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1052-1056. (in Chinese)
- [6] 李玉峰, 郝志航. 星点图像超精度亚像元细分定位算法的研究[J]. 光学技术, 2005, 31(5): 666-671.
LI Y F, HAO ZH H. Research of hyper accuracy subpixel subdivision location algorithm for star image[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(5): 666-671. (in Chinese)
- [7] 杨君, 张涛, 宋靖雁, 等. 星点质心亚像元定位的高精度误差补偿法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 1002-1010.
YANG J, ZHANG T, SONG J Y, *et al.*. High accuracy error compensation algorithm for star image sub pixel subdivision location[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 1002-1010. (in Chinese)
- [8] 潘波, 杨根庆, 刘勇. 星点质心定位算法最优门限研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1787-1792.
PAN B, YANG G Q, LIU Y. Study on optimization threshold of centroid algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1787-1792. (in Chinese)
- [9] 王学伟, 张春华, 赵钊, 等. 低信噪比星像质心定位算法分析[J]. 红外技术, 2009, 31(6): 342-347.
WANG X W, ZHANG CH H, ZHAO ZH, *et al.*. High accuracy centroid calculation of low SNR star image[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(6): 342-347. (in Chinese)
- [10] 王海涌, 费崢红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1672-1677.
WANG H Y, FEI ZH H, WANG X L. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1672-1677. (in Chinese)

作者简介:



孙瑾秋(1980—),女,陕西西安人,博士,讲师,2009年于西北工业大学获得博士学位,主要从事空间目标图像处理方面的研究。E-mail: sunjinqiu@nwpu.edu.cn



周军(1966—),男,江苏常州人,教授,博士生导师,1993年于西北工业大学获得博士学位,1995年在中国空间技术研究院502所第一站博士后出站,1997年在西北工业大学航天学院第二站博士后出站,主要从事航天器控制与仿真技术、先进控制理论及应用等方面的研究。E-mail: zhoujun@nwpu.edu.cn



张臻(1987—),男,四川达州人,博士研究生,2010年于西北工业大学获得博士学位,主要从事空间图像处理,模式识别等方面的研究。E-mail: zhang-zhen@mail.nwpu.edu.cn



张永鹏(1987—),男,河南漯河人,硕士研究生,2009年于西北工业大学获得博士学位,主要从事图像处理和识别方面的研究。yinghui12@gmail.com