

文章编号 1004-924X(2013)07-1881-10

亚像素精度的行星中心定位算法

陈 阔,冯华君*,徐之海,李 奇,陈跃庭

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室,浙江 杭州 310027)

摘要:为实现深空探测中对行星目标的光学自主导航,提出了亚像素精度的行星中心定位方法。首先,建立了导航相机和目标行星的坐标变换关系,结合光学成像理论分析了行星成像的边缘特性;提出使用行星图像有且仅有的一段半圆形边缘,通过圆拟合法实现行星的中心定位。然后,根据行星图像的边缘分布特征,改进了 Canny 算法以快速提取行星的真实边缘,并利用最大距离法提取半圆形边缘。最后,分析了传统高斯函数亚像素边缘检测算法的理论依据,基于成像理论提出了改进型高斯函数亚像素边缘检测算法,并通过圆拟合求得行星的亚像素中心。仿真和月亮实拍实验显示,改进型定位算法的精度达到了 0.02 和 0.68 pixel,比传统插值算法约高 0.03 和 0.21 pixel,在可靠性、定位精度、抗噪声等方面均满足深空探测的需要。

关键词:深空探测;行星中心;边缘检测;亚像素;圆拟合

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1881

Sub-pixel location algorithm for planetary center measurement

CHEN Kuo, FENG Hua-jun*, XU Zhi-hai, LI Qi, CHEN Yue-ting

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

* Corresponding author, E-mail: fenghj@zju.edu.cn

Abstract: To realize the autonomous optical navigation of planets in deep space exploration, a planetary center measurement method with sub-pixel accuracy was presented. Firstly, the coordinate transformation between a navigation camera and a target planet was established. According to optical imaging theory, the edge characteristics of a planetary image were analyzed. Using the only one semi-circle edge of the planetary image, planetary center was measured through circle fitting. Then, according to the edge distribution characteristics of the planetary image, the real semi-circle edge of planet was extracted by modified Canny algorithm and the longest distance method. Finally, the theory basis of traditional sub-pixel edge detection algorithm was analyzed based on Gauss fitting, improved sub-pixel edge detection algorithm based on Gauss fitting was presented according to imaging theory and the sub-pixel center of planet was obtained through circular curve fitting. In simulation experiment and moon testing experiment, the accuracies of modified algorithm are 0.02 and 0.68 pixels, which are higher about 0.03 and 0.21 pixels than that of traditional algorithm. It can satisfy the requirement

收稿日期:2012-12-04;修订日期:2013-02-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61107009)

of deep space exploration for reliability, positioning accuracy and noise immunity.

Key words: deep space exploration, planetary center, edge detection, sub-pixel, circle fitting

1 引言

近年来,人类在卫星应用和载人航天领域取得了重大成就,并在此基础上展开了深空探测方面的研究。这些研究主要包括月球探测、行星及其卫星探测和行星际探测 3 大方向,深空探测自主导航目前主要是基于光学成像测量的自主导航^[1]。国外,B. Williams^[2]等人通过在轨拍摄水星图像实现了水星的自主导航;Johnston^[3]等人阐述了光学自主导航在火星探测中的成功应用,其根据探测器在轨拍摄的行星图像,通过图像处理手段对行星进行中心定位;而 Michael A. Paluszek^[4]等人则在实验室搭建了光学自主导航系统,并基于 Canny 算法求取行星的边缘来拟合行星的中心。在国内,刘济林^[5]等人基于 Zernike 矩提取出太阳质心,以辅助观测太阳的月球车的天文导航系统的工作;彭青玉^[6-7]等人分析了不同边缘检测方法在木星、土星定心中的应用与比较。

根据行星成像比较大的特点,目前主流思路是通过行星的边缘拟合出行星的中心,因此行星中心定位的精度直接取决于行星边缘检测精度。在数字图像处理领域,边缘检测常用的算子主要有 LOG 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子、Canny 算子等,上述都是微分检测算子。另外,还有形态学边缘检测方法^[8],即通过膨胀,腐蚀,开、闭等基本形态学运算,构造出具有不同结构元的形态学边缘检测算法。然而这些都只能达到像素级的边缘检测,为了进一步提高边缘检测精度,人们提出了不同类型的亚像素边缘检测理论与技术,这些方法可以简单地分为插值法、拟合法、矩方法^[9] 3 种类型,它们的边缘检测精度、抗噪声能力以及算法复杂度各不相同^[10],具体应用效果同图像信息有关。M. R. Shortis^[11]等人分析了不同亚像素定位算法受各方面因素的影响情况;MitraBasu^[12]则单独对高斯函数应用于边缘检测进行了一项调查;谭庆昌^[13]、刘国栋^[14]等人分别对几类亚像素边缘定位算法的稳定性以及定位精度的评价方法进行了研究,通过综合考虑定位精度和定位效率,得出高斯拟合法用于亚像素边缘检测效

果更佳。

本文首先分析了行星成像的几何特性以及图像上的灰度特性,并提出改进的 Canny 算法,设计了最大距离法来提取行星图像上合适的初始边缘候选点集;然后从理论上分析了高斯拟合亚像素边缘法的可行性,并提出修正项以进一步提高亚像素边缘检测精度;最后在改进的高斯函数亚像素拟合算法中设计了自适应选取待拟合点数的方法,并通过实验验证了本文的行星中心定位算法的可行性。

2 边缘的粗检测

2.1 行星成像特性分析

深空探测任务中,巡航段期间为完成光学自主导航,探测器上搭载的光学导航相机对目标行星进行拍摄,其成像描述如图 1 所示。设物方目标行星 A 的坐标系为 $O_M - X_M Y_M Z_M$,将其作为

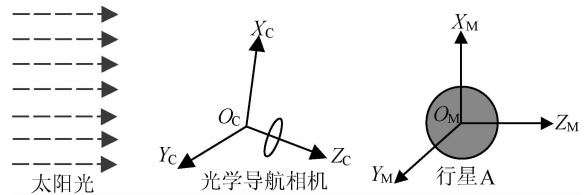


图 1 光学导航相机对目标行星成像示意图

Fig. 1 Framework of imaging target planet by optical navigation camera

世界坐标系,探测器坐标系即相机坐标系为 $O_c - X_c Y_c Z_c$,它们的关系可描述为^[15]:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, $[x_c, y_c, z_c, 1]^T$ 是空间某物点 M 在探测器坐标系中的齐次坐标, $[x_m, y_m, z_m, 1]^T$ 是物点 M 在世界坐标系中的齐次坐标, $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{3 \times 3}$ 和 $\mathbf{T} = [t_i]_{3 \times 1}$ 是探测器坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵和平移向量。设像面坐标系为 $O-UV$,那么根据成像原理结合式(1)可以得到物点 M 的像在

像面坐标系中的坐标满足^[15]:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $[u \ v \ 1]^T$ 是物点 M 经导航相机成像后在像面坐标系上的像素坐标值,且有 $\alpha = f/du, \beta = f/dv, \alpha, \beta$ 分别表示焦距 f 在 U 方向和 V 方向上的像素长度; du 和 dv 是成像器件在 U 方向和 V 方向的像元尺寸; u_0 和 v_0 表示导航相机成像器件的成像中心。

理论上,已知物空间某点的世界坐标,根据式(2)即能求解出它经相机成像后在像平面上的像素坐标。设深空探测中物空间目标是行星 A ,将其近似为半径为 r 的球体,如图 1 所示,令世界坐标系与探测器坐标系的 Z 轴平行,因为球体的对称性,旋转矩阵 \mathbf{R} 可简化为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta & \cos\alpha & -\sin\alpha\cos\beta \\ -\cos\alpha\sin\beta & \sin\alpha & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, α, β 分别表示 X, Y 2 个方向上的旋转角度。当太阳、探测器、行星 A 三者的位置关系发生变化时,行星 A 的成像将发生如图 2 所示的变化,其中图 2 左表示相机正对行星 A 的受光面,而中图和右图分别表示相机发生了不同程度的偏离。结合式(2)和太阳光照条件分析可得到,行星经导航相机成像所产生的边缘一定有一段是完整的半

圆形边缘,而另一部分边缘点必定是行星受光面与背光面交界的圆环在成像面投影而成。令世界坐标系的 Z_M 与太阳光平行,那么前述圆环可用 $x_m^2 + y_m^2 = r^2$ 表示。设平移向量 \mathbf{T} 满足式(11),将其与式(3)代入式(2),可得到在成像面的像素坐标系下另一部分边缘点即圆环的投影满足以下关系:

$$Au^2 + Bv^2 + Cuv + Du + Ev + F = 0, \quad (4)$$

其中,6 个参数 A, B, C, D, E, F 是基本参数 $\alpha, \beta, \mathbf{R}, \mathbf{T}$ 的非线性组合,具体见式(5)-式(10),这说明行星 A 所成像的边缘是半圆形边缘 P 和不确定边缘 Q 的组合,边缘 P 如图 2 中蓝色曲线(彩图见期刊电子版)部分, Q 则对应了行星外边缘的另外一边,其中 Q 的数学描述如式(4)所示,由于旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T} 的不确定性,导致 Q 具有很大的任意性,鉴于此,本文认为任意一幅行星图像,肯定有一段半圆形边缘能够用于行星的中心定位,并研究了如何提取这一段半圆形边缘,以及怎样利用它来精确地确定行星中心,实现高精度的行星中心定位。



图 2 行星 A 不同形态的成像情况

Fig. 2 Imaging conditions of various forms of planet A

$$A = \beta^2 (r^2 \cos^2 \beta - r^2 - t_y^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + t_y^2 - \sin(2\alpha) t_y t_z \cos^2 \beta + t_z^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta - t_z^2 \cos^2 \beta + t_z^2), \quad (5)$$

$$B = (\alpha t_z \cos \beta + \alpha t_x \cos \alpha \sin \beta)^2 + t_x^2 \alpha^2 \sin^2 \alpha - r^2 \alpha^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \beta, \quad (6)$$

$$C = -2\alpha\beta(-r^2 \sin \alpha \sin \beta \cos \beta + t_z^2 \sin \alpha \sin \beta \cos \beta - t_x t_z \sin \alpha \cos \alpha \cos^2 \beta + t_y t_z \cos \alpha \sin \beta \cos \beta - t_x t_y \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + t_x t_y), \quad (7)$$

$$D = 2\beta r^2 (\beta u_0 \cos^2 \beta - \beta u_0 + 2\beta \cos \alpha \cos \beta \sin \beta + 2v_0 \sin \alpha \sin \beta \cos \beta) - 2\beta(t_z \cos \alpha - t_y \sin \alpha) \cdot (\alpha \beta t_x \cos \alpha + \beta u_0 t_z \cos \alpha + \alpha v_0 t_x \sin \alpha - \beta u_0 t_y \sin \alpha) + 2\beta \sin \beta (t_y \cos \alpha + t_z \sin \alpha) \cdot [2\cos \beta - u_0 \cos \alpha \sin \beta] \cdot (t_y \beta + t_z v_0) - \sin \beta (\beta \sin \alpha - v_0 \cos \alpha) \cdot (\alpha t_x + u_0 t_z), \quad (8)$$

$$E = -2\alpha r^2 \cos \beta (-\alpha v_0 \cos^2 \alpha \cos \beta + \alpha \beta \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta + \alpha v_0 \cos \beta - \beta u_0 \sin \alpha \sin \beta) - 2(\alpha t_z \cos \beta + \alpha t_x \cos \alpha \sin \beta) \cdot [(\alpha \cos \beta - u_0 \cos \alpha \sin \beta) \cdot (\beta t_y + v_0 t_z) - \sin \beta (\beta \sin \alpha - v_0 \cos \alpha) \cdot (\alpha t_z + u_0 t_z)] - 2\alpha t_x \sin \alpha (\alpha \beta t_x \cos \alpha + \beta u_0 t_z \cos \alpha + \alpha v_0 t_x \sin \alpha - \beta u_0 t_y \sin \alpha), \quad (9)$$

$$F = (\alpha \beta t_x \cos \alpha + \beta u_0 t_z \cos \alpha + \alpha v_0 t_x \sin \alpha - \beta u_0 t_y \sin \alpha)^2 - r^2 (\alpha \beta \cos \alpha \cos \beta - \beta u_0 \sin \beta + \alpha v_0 \sin \alpha \cos \beta)^2 + [(\alpha \cos \beta - u_0 \cos \alpha \sin \beta) \cdot (\beta t_y + v_0 t_z) - \sin \beta (\beta \sin \alpha - v_0 \cos \alpha) \cdot (\alpha t_x + u_0 t_z)]^2, \quad (10)$$

$$\mathbf{T} = [t_x \quad t_y \quad t_z]^T. \quad (11)$$

2.2 有效边缘的粗检测

常用的边缘检测算子,如 LOG 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子等能够用于木星、土星、太阳等的边缘提取并且计算速度较快,但在抗噪声性能或者边缘定位精度上它们都不及 Canny 算子,然而 Canny 算法需要人工确定高低分割阈值^[16],于是人们提出许多不同的改进的自适应 Canny 边缘检测算法^[17-20]并将它们获取尽量多的真实边缘,同时,又能够自动计算高低分割阈值,避免了人工干预。本文的目标是提取出半圆形边缘,若采用传统 Canny 算法将会提取出无用的行星表面纹理信息,虽然通过适当调整高低阈值可以避免纹理信息,但在深空探测光学自主导航的应用中,不允许存在人工干预,所以本文旨在找到一种新的自适应方法,它对于任意行星图像都能较好地提取出需要的半圆形边缘。行星图像的信息能分为两类,一类是具有较大梯度幅值和较小数量的强边缘,另一类是具有较小梯度幅值和较大数量的纹理信息,于是本文将传统的 Canny 边缘提取算法中的双阈值分割改进为最大类间分割^[21],直接将行星图像的梯度直方图分割为两部分,并提取出行星图像中的真实边缘。

深空探测任务中拍摄的行星图像,通过上述处理能提取出真实的行星边缘。2.1 节中分析指出只有一段半圆形边缘能够用于行星的中心定位,于是根据圆中直径是最长弦的特性,本文采用最大距离法提取初始边缘点集中的半圆形边缘,即求解下式:

$$\{(x_0, y_0), (x_1, y_1)\} = \max\{\|(x_i, y_i), (x_j, y_j)\|_2\}, \\ i, j = 0 \cdots n, i \neq j. \quad (12)$$

其中, $\{(x_i, y_i), (x_j, y_j)\}$ 是初始边缘点集中的某点对, $\{(x_0, y_0), (x_1, y_1)\}$ 是初始边缘点集中距离最大的点对, n 是初始边缘点集的坐标点个数。计算得到初始边缘点集中具有最大距离的一对坐标点,认为它们之间的连线便是行星圆边缘的直径,并以此为分界线将初始边缘点集分为两类:一类是半圆形边缘 P ,另一类是不确定边缘 Q 。图 3 展示了最大距离法求得的半圆形边缘 P 的定位结果,即行星中心定位算法中的第一步——有效边缘的粗检测。



图 3 行星图像有效边缘粗检测结果

Fig. 3 Results of coarse detection for effective planetary edge

3 亚像素边缘检测

3.1 高斯函数亚像素边缘检测的分析

阶跃形边缘模型^[22]的一维阶跃形边缘 $g(x)$ 可描述为:

$$g(x) = \begin{cases} c_0 + c, & x > 0 \\ c_0, & x < 0 \end{cases}. \quad (13)$$

其中, $c_0 + c$ 代表边缘区域目标的灰度值, c_0 代表边缘区域背景的灰度值,它描述了客观世界中的一条阶跃形边缘。

光学系统对该边缘成像的过程表现在图像上即是该边缘经光学系统的点扩散函数退化的过程,记点扩散函数为 $h(x)$ 。一维边缘 $g(x)$ 经光学系统成像的过程可以描述为 $g(x) * h(x)$,其中点扩散函数 $h(x)$ 可以近似为高斯分布^[23]:

$$h(x) = A e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (14)$$

且 A 是正比于光学系统透过率的常量, σ 是衡量光学系统锐化程度的量, σ 的值越小表示光学系统的锐化程度越强。

一维边缘 $g(x)$ 经光学系统成像以后再经过电子成像器件的采样和量化,最终以数字图像的形式输出,电子成像器件的量化能力决定了输出数字图像的灰阶,而采样过程可以通过矩形孔径采样定理来描述:

$$f(x) = \int_{x-0.5}^{x+0.5} [g(\tau) * h(\tau)] d\tau, x = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

式中, $f(x)$ 表示电子成像器件输出的数字图像中的一维边缘,变量 x 表示一维成像器件的像元编号, n 是像元的总个数,而符号 $*$ 是卷积运算符,它代表了光学系统的成像过程。

如果某电子成像器件的像元大小达到了光学衍射极限,可忽略矩形孔径采样定理,将数字图像中的一维边缘 $f(x)$ 直接描述为式(16),由于 $g(x)$ 是理想阶跃形边缘,它的微分可用冲击函数 $\delta(x)$ 表示,于是对式(16)两端求微分可得到式(17),其中 $\nabla f(x)$ 表示图像中边缘的梯度幅值分布。已知光学系统的点扩散函数 $h(x)$ 服从高斯分布,可认为图像中边缘的梯度幅值也服从高斯分布。因此,在忽略矩形孔径采样定理的前提下,一维边缘的亚像素检测可基于高斯函数,对边缘的梯度幅值进行

曲线拟合来实现,二维图像同理可得到相同的结论,即二维边缘在水平方向和垂直方向的梯度幅值都服从高斯分布,可实现高斯函数亚像素边缘检测算法。

$$f(x) = g(x) * h(x), \quad (16)$$

$$\nabla f(x) = c \cdot \delta(x) * h(x) = ch(x). \quad (17)$$

3.2 改进型的高斯函数亚像素边缘检测算法

基于高斯函数,对边缘的梯度幅值进行曲线拟合从而实现边缘的亚像素检测,前提是不考虑矩形孔径采样定理,在实际应用中电子成像器件的像元大小远没有达到光学衍射极限水平^[27],因此直接对边缘梯度幅值进行高斯曲线拟合得到的边缘定位误差会比较大。为解决这个问题,常用方法是对边缘的梯度在梯度方向上进行插值处理,或者在像面坐标的 x 方向和 y 方向上进行插值处理,但该方法需要假设成像器件的像元尺寸相对于被观测边缘要足够小,才能使得某个像元内的边缘灰度足够真实,进而保证插值的正确性。另一方面如果采用线性插值算法,它和真实边缘梯度的非线性相悖,而采用高次函数插值,又将导致时间上的资源浪费。

本文先分析了矩形孔径采样对边缘灰度分布的影响,为弥补它带给高斯拟合算法的误差,提出了基于高斯拟合的修正算法。以一维边缘为例,在矩形孔径采样定理的作用下,结合式(13)、式(14)、式(15)可得到数字图像中一维边缘的梯度函数 $\nabla f(x)$ 满足:

$$\nabla f(x) = \int_{x-0.5}^{x+0.5} cAe^{-\frac{\tau^2}{2\sigma^2}} d\tau = \int_{x-0.5}^{x+0.5} s(\tau) d\tau. \quad (18)$$

其中,函数 $s(\tau)$ 是一个替换变量,它等同于式(17)中的 $\nabla f(x)$,即不考虑矩形孔径采样定理时的边缘梯度,且它服从高斯分布。为讨论区间积分的影响,本文对函数 $\nabla f(x)$ 在点 x_i 处进行泰勒展开,如式(19), $t(x)$ 是边缘梯度函数 $\nabla f(x)$ 的低阶泰勒展开函数。

泰勒级数只能保证函数在展开处点 x_i 的局部区域内收敛,因此对于图像边缘的每个采样点 x_i ,在它的局部区域内都可满足式(20)的收敛结果,其中 n 表示边缘的总采样点个数。展开函数 $t(x_i)$ 在每个采样点 x_i 的局部区域内分别收敛,而常用成像器件的像元尺寸一般都很小,使得每个采样点 x_i 在区域 $(x_i - 0.5, x_i + 0.5)$ 内都满足式(20)的收敛结果,因此式(20)中展开函数 $t(x)$ 在边缘梯度

函数 $\nabla f(x)$ 上全局收敛。

$$\nabla f(x) \approx t(x) = s(x_i) + s'(x_i)(x - x_i) + \frac{1}{2}s''(x_i)\left(x^2 - 2xx_i + x_i^2 + \frac{1}{12}\right), \quad (19)$$

$$\nabla f(x_i) \approx t(x_i) = s(x_i) + \frac{1}{24}s''(x_i),$$

$$x_i = [x_1, x_2, \dots, x_n]. \quad (20)$$

图4给出了不考虑矩形孔径采样定理时的边缘梯度函数 $s(x)$ 、矩形孔径采样定理作用下的边缘梯度函数 $\nabla f(x)$ 、矩形孔径采样定理作用下的边缘梯度函数的泰勒展开式 $t(x)$ 三者的关系,其中图4(b)是图4(a)中红框内(彩图见期刊电子版)的放大图像,可以看出矩形孔径采样定理使得边缘梯度函数 $\nabla f(x)$ 相对于 $s(x)$ 发生了改变,而曲线 $t(x)$ 与 $\nabla f(x)$ 吻合度很好,说明用泰勒展开函数 $t(x)$ 来近似边缘梯度函数 $\nabla f(x)$ 是合理的。同时,在低阶部分式(21)近似成立,它的物理意义是:矩形孔径采样定理作用下图像边缘的三次导数 $\nabla^3 f(x)$,即梯度幅值的二次导数与不考虑矩形孔径采样定理时边缘梯度幅值的二次导数 $s''(x)$ 近似相等,图5展示了通过图4中边缘计算得到的函数 $\nabla^3 f(x)$ 与 $s''(x)$ 的曲线关系,进一步证实了式(21)的正确性。

$$\nabla^3 f(x) = \int_{x-0.5}^{x+0.5} s''(\tau) d\tau \approx s''(x). \quad (21)$$

因此结合式(20)、式(21)可得到结论式(22),其中 $\nabla f(x)$ 表示图像中边缘的梯度幅值, $\nabla^3 f(x)$ 表示图像中边缘的三次导数,而 $s(x)$ 是服从高斯分布的,于是可以采用最小二乘法定位亚像素精度的边缘位置,这就是在一维边缘模型下对高斯函数亚像素边缘检测的改进。将其扩展到二维模型,对图像中边缘在水平方向和垂直方向的梯度进行求解分析,可得到相同结论,即对边缘在图像水平方向或垂直方向的梯度分布进行修正以后,再进行高斯函数拟合,这样得到的边缘位置消除了矩形孔径采样的影响,能够更加准确地获得边缘的亚像素位置。本文利用边缘梯度在水平方向或垂直方向上的二次导数对矩形孔径采样定理进行修正,相较于传统的插值算法,不需要做复杂的函数计算,运算速度更快并且通过实验验证了算法的有效性。

$$s(x) = \nabla f(x) - \frac{1}{24} \nabla^3 f(x) = cAe^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \quad (22)$$

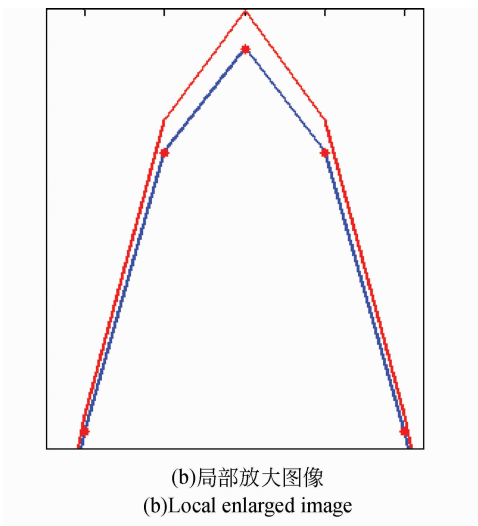
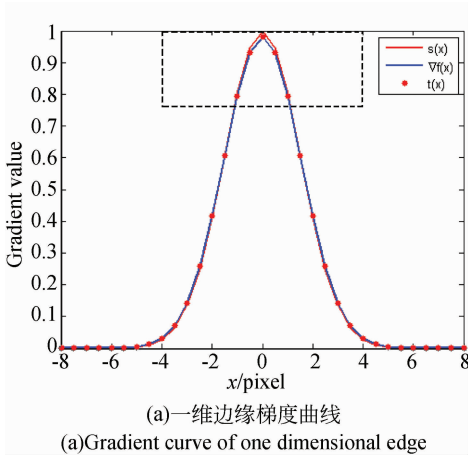


图 4 一维边缘梯度曲线对比

Fig. 4 Contrast of gradient curves of one dimensional edge

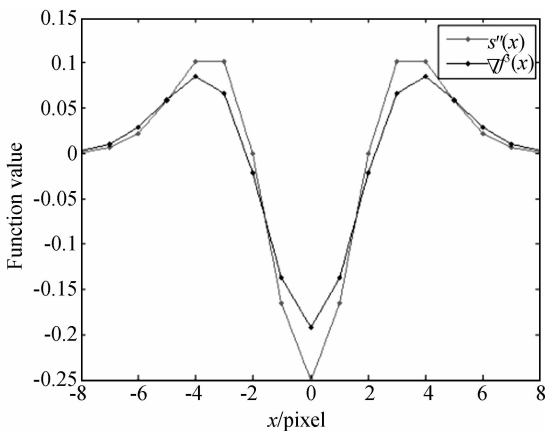


图 5 函数 $s''(x)$ 与 $\nabla^3 f(x)$ 的对比

Fig. 5 Comparison between function $s''(x)$ and $\nabla^3 f(x)$

4 实验

4.1 行星中心定位算法流程

本文提出的行星中心定位算法的流程如下:首先从输入图像中提取出行星目标,行星探测任务中拍摄图像的主体是目标行星,故直接对输入图像做二值化处理,将最大连通区域标记为行星目标区域,并把该区域提取出来定义为子图像,然后在子图像中利用第 2 节中的算法进行有效半圆边缘的粗检测。本文还设计了自适应计算待拟合点数的方法,它的实现流程是:

(1)以初始边缘点 x_0 为中心,在图像水平方向或垂直方向上向两侧分别搜索下一点对 $[x_i, x_j]$,若点 x_i 的灰度值大于点 x_0 的灰度值,则在该方向上停止搜索的条件是下一点 x_{k+1} 的灰度值小于当前点 x_k ;若点 x_j 的灰度值大于点 x_0 的灰度值,则在该方向上停止搜索的条件是下一点 x_{i+1} 的灰度值小于当前点 x_i ,这样得到最真实的边缘待拟合候选点集 S 。

(2)利用式(23)计算候选点集 S 的标准差 σ_s ^[24],并构建标准差为 σ_s 的高斯函数 $G(x)$,如式(24)所示,然后便可通过式(25)计算拟合高斯函数的最佳待拟合点数,且取满足式(25)的最小整数 N 。

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{x=x_i}^{x_k} |\nabla f(x)| x^2}{|x_k - x_i|}}, \quad (23)$$

$$G(x) = \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_s \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma_s^2}}, \quad (24)$$

$$\int_{-N}^N G(x) dx \geq 90\% \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} G(x) dx. \quad (25)$$

对于行星图像的每个初始边缘点,都可以自适应计算出待拟合点数 N ,再根据 3.2 中提出的改进高斯函数亚像素边缘检测算法计算亚像素边缘点坐标值,它的具体方法是,首先提取每个初始边缘点在待拟合点数 N 下的灰度分布函数 $f(x)$,分别计算它的一次导数即梯度幅值 $\nabla f(x)$ 和三次导数 $\nabla^3 f(x)$,再根据式(22)对梯度幅值进行修正,接着利用传统的高斯函数拟合算法计算每个初始边缘点的亚像素坐标,最后采用最小二乘法对亚像素边缘点集进行圆拟合,得到圆的中心坐标,即行星的中心坐标。

4.2 仿真实验

图 6 为行星图像的仿真图,其中图 6(a)描述

的是图像中行星从左上角逐渐向右下角平移,图 6 (b)描述的是图像中行星从左下角逐渐从右上角平移。仿真图生成方法是,首先用 Bresenham 画圆算法生成含半圆边缘和椭圆边缘的行星图像^[25],然后再用高斯型的点扩散函数卷积图像,接着根据矩形孔径采样定理对图像进行 5 倍采样^[26],最后对每幅仿真图加入相同程度的高斯白噪声^[28],得到图 6 所示的结果。本文比较了传统

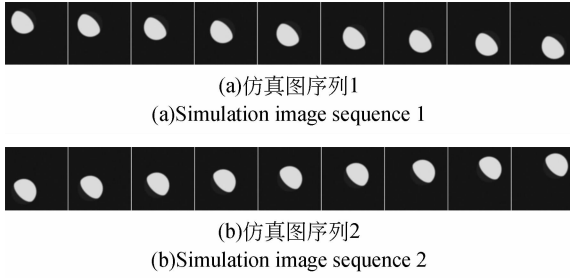
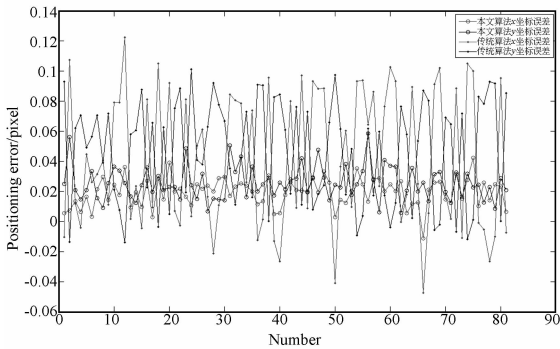
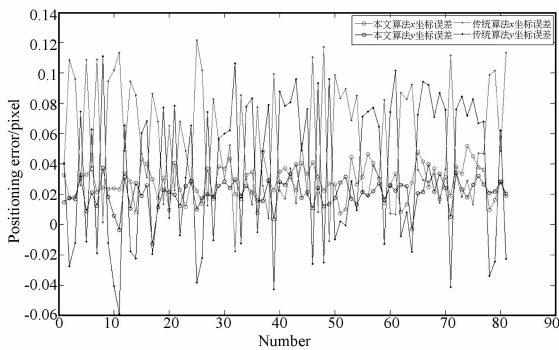


图 6 行星图像仿真图像序列

Fig. 6 Simulation image sequences for planet



(a)Center detection error of simulation image sequence 1



(b)仿真图序列2中心定位误差

图 7 本文算法与传统算法的仿真实验对比

Fig. 7 Comparison between proposed method and traditional methods in simulation experiment

的基于插值的高斯函数亚像素边缘检测算法^[10]与本文算法的效果,结果如图 7 所示,其中横坐标是实验次数,纵坐标是通过两种不同算法求得的行星中心坐标与实际坐标的差值。从实验结果可以看出,本文算法的定位精度比传统算法更高,并且抗噪声能力更强,表现为随着实验次数的增加,本文算法的结果更加平稳,可计算两种算法实现的行星中心定位误差的绝对平均值如表 1 所示。

表 1 仿真实验的误差绝对平均值

Tab. 1 Absolute average error of simulation experiment (pixel)

对比算法	仿真序列 1		仿真序列 2	
	x 坐标	y 坐标	x 坐标	y 坐标
本文算法	0.019	0.026	0.028	0.021
传统算法	0.047	0.048	0.055	0.051

4.3 月亮实拍实验

本文设计了以月亮为目标的实拍实验,实验设备包括佳能 5D II 单反相机,300 mm 佳能镜头,三角架,电脑。实验中通过电脑控制相机实时录像,并通过软件准确地以 5 s 时间间隔提取其中的 100 张图片序列,图 8 为部分实验数据,且只截取图像中的月亮区域显示。同样采用传统的基于插值的高斯函数亚像素边缘检测算法^[10]与本文算法对该组实验数据进行处理,得到图 9 所示的定位结果,其中横坐标表示实验次数,纵坐标表示中心定位结果的误差,它的计算方法如下:



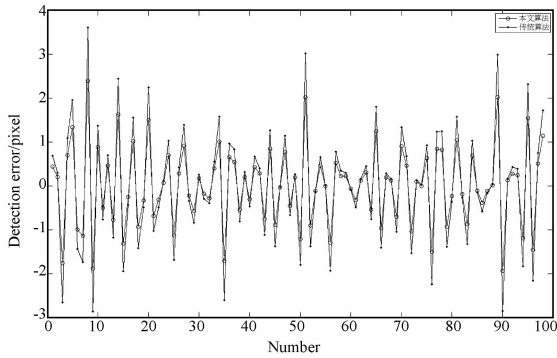
图 8 月亮实拍图像序列

Fig. 8 Image sequences of real testing for moon

(1) 计算每张图像中月亮的中心坐标点,得到中心坐标点集 (x_i, y_i) 。

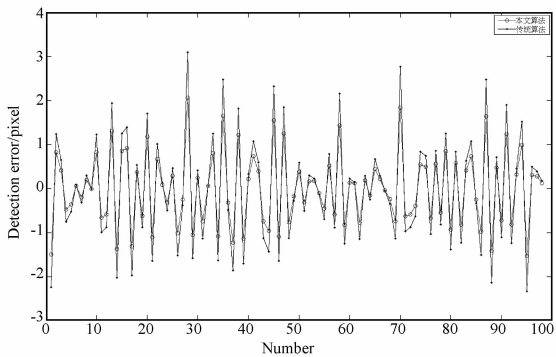
(2) 计算相邻图像的月亮相对移动量 $\Delta d = (x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1})$,因为相机采用实时录像模式,其后又通过软件精准地提取 5 s 时间间隔的图像序列,并且在该 5 s 时间间隔内,月亮在图像中移动的距离是相等的,因此 Δd 是一个常数。

(3) 于是再次计算 $\Delta d = (\Delta x, \Delta y)$ 的差分值,理



(a)月亮实拍实验x坐标定位误差

(a)Detection error of moon testing experiment at x direction



(b)月亮实拍实验y坐标定位误差

(b)Detection error of moon testing experiment at direction y

图9 本文算法与传统算法的实拍实验对比

Fig.9 Comparison between proposed method and tradition method in moon testing experiment

论上它在 x 坐标和 y 坐标的分量都应该是 0, 实验中本文将本文算法和传统算法求得的月亮中心坐标经过上述计算, 得到 Δd 的差分在 x 坐标和 y 坐标的分量, 分别如图 9(a) 和 9(b) 所示, 并定义为定位算法在 x 坐标和 y 坐标的误差。

从实验结果中可看出本文算法对月亮的中心定位精度较高, 并且稳定性也比传统算法强, 具有实用价值。本实验中两种算法对月亮中心的定位误差的绝对平均值如表 2 所示。

表 2 实拍实验的误差绝对平均值

Tab.2 Absolute average errors of moon testing experiment (pixel)

对比算法	误差分量	
	x 坐标	y 坐标
本文算法	0.702	0.682
传统算法	0.910	0.889

5 结 论

本文对行星中心定位算法进行了研究, 提出了改进的 Canny 算法对行星边缘进行粗检测, 分析了深空探测任务中行星的成像特点, 并设计了一种利用最大距离法提取行星图像半圆形初始边缘的方法。根据光学成像理论分析了高斯函数亚像素边缘检测原理, 并针对矩形孔径采样定理引入的误差提出了修正方法, 同时实现了自适应待拟合点的选取, 最后与传统的插值高斯函数拟合方法进行了实验对比。在仿真实验和月亮实拍实验中, 本文的改进型定位算法的精度达到了 0.02 pixel 和 0.68 pixel, 比传统插值算法约高 0.03 pixel 和 0.21 pixel, 在可靠性、定位精度、抗噪声等方面都基本满足深空探测的需要。

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 Science*, 2006, 8(10): 13-18. (in Chinese)
- [2] WILLIAMS B, TAYLOR A, CARRANZA E, et al.. Early navigation result for NASA's messenger mission to Mercury [J]. *Advances in the Astronautical Sciences.*, 2005, 120:1233-1250.
- [3] JOHNSTON M D, JAMES E G, RICHARD W Z,

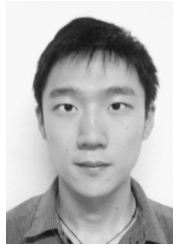
et al.. The mars reconnaissance orbiter mission [J]. *In Aerospace Conference, IEEE*, 2005: 447-464.

- [4] MICHAEL A P, JOSEPH B M, MICHAEL G L. Optical navigation system [C]. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Infotech @Aerospace, Atlanta, Georgia: AIAA*, 2010.
- [5] 杨鹏, 谢立, 刘济林. 基于 Zernike 矩的高精度太阳图像质心提取算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(9): 1963-1970.
YANG P, XIE L, LIU J L. Zernike moment based high-accuracy sun image centroid algorithm [J].

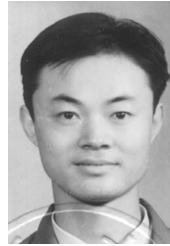
- Journal of Astronautics*, 2011, 32(9): 1963-1970. (in Chinese)
- [6] 古万荣. 不同边缘检测方法在木星定心中的应用与比较[D]. 广州:暨南大学硕士学位论文,2007.
GU W R. *Application and comparison of edge detectors in center measurement of Jupiter* [D]. Guangzhou: Jinan University, 2007. (in Chinese)
- [7] 彭青玉. 木星土星边缘的椭圆拟合[J]. 云南天文台台刊,2003, 4: 43-48.
PENG Q Y. Least-square fit to the edge of Jupiter and Saturn for its precise position [J]. *Publications of Yunnan Observatory*, 2003, 4: 43-48. (in Chinese)
- [8] CHITCHIAN, SHAHAB, ADAM R, *et al.*. An edge detection approach for mapping of the human cone photoreceptor mosaic using adaptive optics scanning laser ophthalmoscope [J]. *In Biomedical Optics, Optical Society of America*, 2012.
- [9] 王珏,伍立芬,邹永宁,等. Zernike 矩边缘检测与多项式拟合的 CT 图像三维测量算法[J]. 仪器仪表学报,2012, 33(2): 442-449.
WANG Y, WU L F, ZOU Y N, *et al.*. 3D measurement algorithm of CT images based on zernike moment edge detection and polynomial fitting [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(2): 442-449. (in Chinese)
- [10] 尚雅层,陈静,田军委. 高斯拟合亚像素边缘检测算法[J]. 计算机应用,2011, 31(1): 179-181.
SHANG Y C, CHEN J, TIAN J W. Sub-pixel edge detection algorithm based on gauss fitting [J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, 31(1): 179-181. (in Chinese)
- [11] SHORTIS, MARK R, TIMOTHY A, *et al.*. A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images [C]. *Videometrics III. SPIE, Boston: SPIE*, 1994: 239-250.
- [12] MITRA B. Gaussian-based edge-detection methods-a survey [J]. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Application and Reviews, IEEE Transactions*, 2002, 32(3): 252-260.
- [13] 田原娜,谭庆昌,张海波,等. 亚像素边缘定位算法的稳定性分析[J]. 计算机工程,2010,36(7): 211-213.
TIAN Y Y, TAN Q CH, ZHANG H B, *et al.*. Stability analysis of subpixel edge location algorithm [J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(7): 211-213. (in Chinese)
- [14] 刘国栋,刘炳国,陈凤东,等. 亚像素定位算法精度评价方法的研究[J]. 光学学报,2009, 29(12): 3446-3451.
LIU G D, LIU B G, CHEN F D, *et al.*. Study on the method of the accuracy evaluation of sub-pixel location operators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3446-3451. (in Chinese)
- [15] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [16] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transaction*, 1986, (6): 679-698.
- [17] 刘建林,温显斌. 基于 K 邻近均值滤波器的自适应 Canny 边缘检测[J]. 天津理工大学学报,2011, 27(3): 42-45.
LIU J L, WIN X B. New adaptive Canny edge detection based on K neighbor mean filter [J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2011, 27(3): 42-45. (in Chinese)
- [18] 丁文,李勃,陈启美. Canny 色彩边缘检测及分类新方法[J]. 北京邮电大学学报,2012, 35(1): 115-119.
DING W, LI B, CHEN Q M. A new approach of Canny edge detection and classification for color images [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2012, 35(1): 115-119. (in Chinese)
- [19] 王珏,黄苏红,蔡玉芳. 改进 Canny 算法的 CT 图像环形伪影校正[J]. 光学精密工程,2011, 19(11): 2767-2773.
WANG Y, HUANG S H, CAI Y F. Improved Canny algorithm for correcting ring artifacts of CT images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2767-2773. (in Chinese)
- [20] 邓仕超,刘铁根,萧泽新. 应用 Canny 算法和灰度等高线的金相组织封闭边缘提取[J]. 光学精密工程,2010, 18(10): 2314-2323.
DENG SH CH, LIU T G, XIAO Z X. Extraction of enclosing image edge for metallographic structure based on Canny and grayscale contour line [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2314-2323. (in Chinese)
- [21] OTSU N. A threshold selection method from gray level histograms [J]. *Automatica*, 1975, 11(285-296): 23-27.
- [22] SHAH, MUBARAK, ARUN S, *et al.*. Pulse

- and staircase edge models [J]. *Computer vision, Graphics, and Image processing*, 1986, 34(3): 321-343.
- [23] STALLINGA, SJOERD, BERND R. Accuracy of the gaussian point spread function model in 2D localization microscopy [J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 24461-24476.
- [24] CHUNG, YUN C, JUNG M W, *et al.*. A non-parametric blur measure based on edge analysis for image processing applications [J]. *In Cybernetics and Intelligent Systems, IEEE Conference*, 2004, 1: 356-360.
- [25] 贺忠海, 王宝光, 廖怡白. 理想边缘产生方法的研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(1): 89-93.
HE ZH H, WANG B G, LIAO Y B. Study of method generating ideal edges [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(1): 89-93. (in Chinese)
- [26] CHEEZUM, MICHAEL K, WILLIAM F, *et al.*. Quantitative comparison of algorithms for tracking single fluorescent particles [J]. *Biophysical Journal*, 81, 2001, (4): 2378.
- [27] 孙辉, 马天玮. 基于相位相关的目标图像亚像元运动参数估计[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(6): 858-862.
SUN H, MA T W. Sub-pixel motion estimation based on phase-only correlation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(6): 858-862. (in Chinese)
- [28] 陈伦海, 黄君凯, 杨帆, 等. 基于 FPGA 的实时边缘检测系统[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(2): 200-204.
CHEN L H, HUANG J K, YANG F, *et al.*. Real-time edge detection system based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(2): 200-204. (in Chinese)

作者简介:



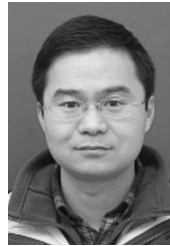
陈 阔(1989—),男,四川岳池人,博士研究生,2010年于四川大学获得学士学位,现为浙江大学博士研究生,主要从事视觉导航、图像处理等方面的工作。E-mail: ck89316@163.com



李 奇(1973—),男,黑龙江人,副教授,硕士生导师,2001年获浙江大学光学工程博士学位,从事光学工程、图像获取与处理的研究。E-mail: liqi@zju.edu.cn



冯华君(1963—),男,浙江余姚人,教授,博士生导师,1982年于浙江大学获得硕士学位,现任浙江大学光学工程研究所所长,主要从事成像系统、遥感等方面的研究。E-mail: fenghj@zju.edu.cn



陈跃庭(1981—),男,浙江平湖人,助理研究员,2009年获浙江大学光学工程博士学位,主要从事电子稳像技术、计算机视觉等的研究。E-mail: chenyt@zju.edu.cn



徐之海(1964—),男,浙江嘉兴人,教授,博士生导师,1989年、1996年于浙江大学分别获得硕士、博士学位,现任浙江大学先进技术研究院副院长,主要从事光学遥感、成像技术等方面的研究。E-mail: xuzh@zju.edu.cn