

小天体表面纹理曲线精准匹配算法

王光泽¹, 邵巍¹, 郝洪良¹, 姚文龙¹, 黄翔宇²

(1. 青岛科技大学 自动化与电子工程学院, 青岛 266100; 2. 北京控制工程研究所, 北京 100094)

摘要: 探测器着陆过程中可将不规则曲线作为视觉导航陆标, 曲线精准匹配是进行视觉导航的重要前提。针对曲线描述符算法难以精准匹配、曲率匹配算法仅能处理两条曲线的问题, 提出一种曲线描述符与曲率相结合的曲线精准匹配算法。通过Edge Drawing算法完成曲线提取后, 对曲线及支撑区域构建描述符, 根据最近邻距离比率原则完成粗匹配; 之后计算曲线无符号曲率积分, 以等积分间隔对曲率采样, 并基于归一化互相关算法完成曲线精准匹配。实验结果表明, 该算法在尺度、旋转与光照变换下可以达到84%以上精准匹配率。

关键词: 小天体; 曲线描述符; 尺度不变曲率; 互相关归一化

中图分类号: V448.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)03-0306-09

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20200096

引用格式: 王光泽, 邵巍, 郝洪良, 等. 小天体表面纹理曲线精准匹配算法[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(3): 306-314.

Reference format: WANG G Z, SHAO W, CHI H L, et al. Accurate matching algorithm of small celestial body surface texture curve[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(3): 306-314.

引言

近年来, 各国纷纷开展了小天体着陆与采样返回任务^[1-2], 为获得有价值的科学素材, 需要探测器着陆到具有较高的科学价值的特定区域, 这就需要探测器具备精确导航的能力。视觉导航是目前发展较为成熟的自主导航方法, 并在各种深空探测任务中得到不同程度的发展与应用, 其利用光学敏感器件获取天体及其表面图像, 通过图像中提取的特征来确定探测器空间位置等信息。

当前用于视觉导航的地标主要分为两类。一类是使用图像中的特征点信息进行导航, 例如使用角点检测算法来估计检测器的速度^[3-5], Bakambu等^[6]提出这类算法通常不如使用图像区域匹配稳定。特征点反映的信息量远低于边缘特征曲线, 尤其对于多尺度特征点, 存在无法与图像中物理纹理相对应的情况, 其应用场景受限。

另一类是将天体表面的岩石和火山口等自然特征用作导航陆标。同时, 这些特征还能在着陆阶段用于障碍物躲避。许多学者对陨石坑的探测和匹配方法做了很多研究^[7-9]。这些算法中大多数都使用陨石坑形状、阴影等信息进行匹配, 在处理沟壑、重叠的坑或

不规则的岩石时容易发生误匹配^[10]。

不规则曲线特征在天体表面普遍存在, 可作为导航陆标进行导航。对曲线精准匹配是进行视觉导航的重要前提^[11]。国内外众多学者针对曲线匹配方法展开研究。

基于描述符的方法是曲线匹配重要分支。Liu等^[12]通过按亮度划分曲线支撑区域构建了描述符IOCD(Intensity Order Curve Descriptor)。王志衡等^[13]为解决描述符主方向难以确定的问题, 提出了描述符IOMSD(Intensity Order based Mean Standard Deviation Descriptor), 在图像受到模糊、噪声干扰时, 可以保持不变性。Chen等^[14]提出梯度阶曲线描述符, 对光照变化与噪声干扰有较好的鲁棒性。基于曲线描述符曲线匹配方法根据曲线支撑区域相似度来进行匹配, 当局部判断为匹配时, 则认为整条曲线匹配, 因此基于曲线描述符曲线匹配计算量较小, 但难以实现曲线精准匹配。

基于曲率的方法也是曲线匹配重要方向。Cohen等^[15]提出使用B样条来近似拟合曲线, 通过曲率等曲线特征的计算进一步完成曲线匹配工作。Tanaii^[16]等提出基于图像分割的空间曲线局部匹配算法, 该算法可以得到空间曲线分段描述, 并保证了曲线的光滑性^[17]。

收稿日期: 2020-12-25 修回日期: 2021-05-09

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFA0706500); 国家自然科学基金资助项目(61773227, 61673057, 61803028)

Cui 等^[18]通过计算等积分间隔下曲率实现曲线精准匹配，该算法具有尺度与旋转不变性。基于曲率的曲线匹配，适于处理图像中两条曲线匹配问题，当对多条曲线匹配时计算量过于庞大。

为实现曲线精准匹配，提出一种曲线描述符与曲率相结合的曲线精准匹配算法，通过描述符完成曲线粗匹配，再根据曲率完成精准匹配。本文具体结构安排如下：第一部分介绍了多尺度纹理曲线提取算法与曲线描述符构建方法；第二部分在曲线描述符粗匹配基础上，介绍尺度不变曲率计算与匹配；第三部分在光照、尺度及旋转变换下分析实验结果；第四部分对文章进行总结。

1 曲线描述符匹配

1.1 不规则曲线提取

曲线特征提取是匹配的基础，为综合多尺度纹理特征，对原始图像降采样处理，获得一系列不同分辨率图像，建立高斯金字塔模型。

基于Topal等^[19]提出的Edge Drawing算法对每层图像分别进行曲线提取。根据边缘像素特点，使用Sobel算子计算梯度图，为加快计算速度，设置阈值筛选像素梯度，剔除小梯度像素。

为获得连续边缘曲线，放弃逐像素点边缘判断的思路，而采用基于节点的方法。首先根据梯度图，选择局部梯度极大值对应像素点作为节点。之后由节点开始进行像素连接，当满足以下条件之一停止。

- 1) 当不处于边缘区域时，即当前像素点经梯度阈值筛选后，属于被剔除部分；
- 2) 当检测边缘重复时，即对所在曲线进行像素连接过程中，当前像素点已被检测过一次。

对各尺度提取所得曲线，需变换回原尺度空间。在基于采样系数 k 构建的高斯金字塔中，对于第 j 层中检测曲线上一点 (\bar{x}_i, \bar{y}_i) ，变换到原尺度空间后坐标为

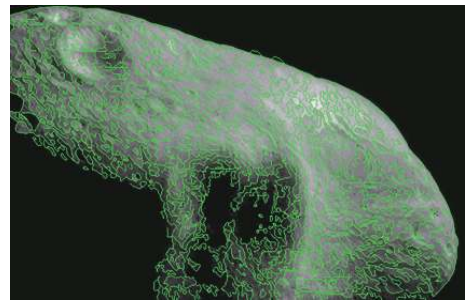
$$\begin{cases} x_i = \bar{x}_i \cdot k^j \\ y_i = \bar{y}_i \cdot k^j \end{cases} \quad (1)$$

将曲线上所有点变换到原尺度后，对离散点进行线性插值。在原尺度空间，对曲线上相邻两点坐标 (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) ，在区间 $[x_1, x_2]$ 上某一位置 x 处纵坐标取值为+

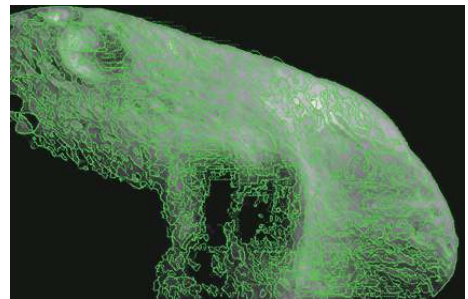
$$y = y_1 + (x - x_1) \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2)$$

经过坐标变换与插值，高斯金字塔各层曲线提取结果被变换原尺度空间。多尺度曲线提取结果如图1 (b)

所示，相比单尺度提取结果如图1 (a)，所得曲线更加全面。同时基于Edge Drawing算法提取的边缘曲线更加连续，并保证单像素宽度，另外曲线基于节点生成，边缘图像噪声较少。



(a) 单尺度提取结果



(b) 多尺度综合提取结果

图 1 曲线提取结果
Fig. 1 Curve extraction result

1.2 曲线描述符构建

对曲线进行描述时，采用分段描述的方法，将每段曲线近似作为直线进行描述符构建^[10,20]，该描述符包含曲线自身特征同时加入其周围纹理信息，具备良好的辨识性。

描述时，将近似直线两侧区域划分为 m 条矩形带如图2所示将近似直线两侧区域划分为 m 条矩形带，记作 $\{B_1, B_2, B_3, \dots, B_m\}$ ，每条矩形带宽度为 w ，每

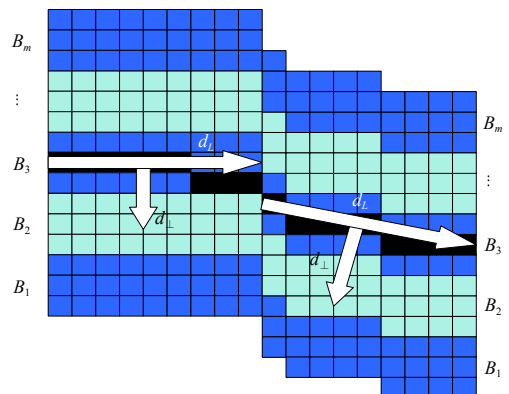


图 2 曲线描述符结构

Fig. 2 Curve descriptor structure

个矩形带都是曲线支撑区域的子区域。为保证描述符的旋转不变性,将像素梯度向近似直线方向与正交方向投影。假设子区域中某像素梯度值为 g ,拟合直线方向为 d_L ,与直线正交方向为 d_\perp ,则局部梯度可表示为

$$g' = (g \cdot d_L, g \cdot d_\perp)^T \quad (3)$$

对于第 i 段曲线支撑区域的 B_j 矩形带,通过对第 k 行不同方向梯度值求和可得

$$\begin{cases} p1_k^{ij} = \sum_{g' \cdot d_\perp > 0} |g' \cdot d_\perp| \\ p2_k^{ij} = \sum_{g' \cdot d_\perp < 0} |g' \cdot d_\perp| \\ p3_k^{ij} = \sum_{g' \cdot d_L > 0} |g' \cdot d_L| \\ p4_k^{ij} = \sum_{g' \cdot d_L < 0} |g' \cdot d_L| \end{cases} \quad (4)$$

对所有曲线段梯度值求和,可得整条曲线 B_j 矩形带的第 k 行梯度信息

$$\begin{cases} p1_k^j = \sum p1_k^{ij} \\ p2_k^j = \sum p2_k^{ij} \\ p3_k^j = \sum p3_k^{ij} \\ p4_k^j = \sum p4_k^{ij} \end{cases}, j \in 1, 2, \dots, l \quad (5)$$

将每行不同方向梯度之和堆叠,可得曲线 B_j 矩形带梯度矩阵

$$H_j = \begin{pmatrix} p1_1^j & p1_2^j & \dots & p1_n^j \\ p2_1^j & p2_2^j & \dots & p2_n^j \\ p3_1^j & p3_2^j & \dots & p3_n^j \\ p4_1^j & p4_2^j & \dots & p4_n^j \end{pmatrix} \in R^{4 \times n} \quad (6)$$

其中: n 为计算第 j 条矩形带所需行数

$$n = \begin{cases} 2w, j = 1 || m \\ 3w, \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

对 H_j 每行进行均值向量 U_j 与标准差向量 S_j 的求解计算,同时为满足光照不变性进行归一化处理,两者共同构成曲线矩形带 B_j 的描述符 BD_j 可表示为

$$BD_j = \left(\frac{U_j^T}{\|U_j^T\|}, \frac{S_j^T}{\|S_j^T\|} \right)^T \in R^8 \quad (8)$$

通过对所有矩形带描述符进行求解,获得曲线描述符 CBD

$$CBD = (BD_1^T, BD_2^T, \dots, BD_m^T)^T \in R^{8 \times m} \quad (9)$$

根据最近邻距离比例原则,采用BF匹配算法匹配曲线描述符,曲线粗匹配结果如图3所示。

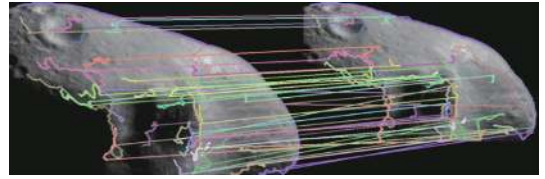


图3 曲线粗匹配
Fig. 3 Curves rough matching

2 曲线曲率匹配

2.1 三次B样条曲线拟合

基于曲线描述符的曲线匹配算法仅能对曲线粗略匹配,难以实现最相似部分匹配,影响后续导航精度。本文在此基础上加入基于曲率的曲线匹配算法,以实现曲线的精准匹配。原始曲线为离散数据形式,为尽可能准确计算曲线曲率,需对曲线数据进行平滑拟合,同时削弱噪声的影响。

传统的贝塞尔曲线拟合方法仅需少量控制点即可生成复杂平滑曲线,控制简便且具有较强控制能力,但灵活性较差,难以修改局部特征,某一控制点发生改变对拟合曲线整体都有影响。针对贝塞尔算法的缺点,B样条拟合算法被提出,该算法逼近多边形特征精度更高,且具备局部修改性^[21],B样条算法曲线拟合表达式为

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i F_{i,k}(t) (0 \leq t \leq 1) \quad (10)$$

其中: n 表示用来拟合曲线的点个数; P_i 表示拟合曲线的离散点; $F_{i,k}(t)$ 表示的 K 阶基函数定义为

$$F_{i,k}(t) = \frac{1}{k!} \sum_{m=0}^{k-i} (-C_{k+1}^m) (t+k-m-j)^k (0 \leq t \leq 1) \quad (11)$$

三次B样条曲线相比二次B样条曲线更加光滑,同时计算量在可接受范围。通过4个相邻离散点计算可得三次B样条曲线,对式(11)进行求解可得

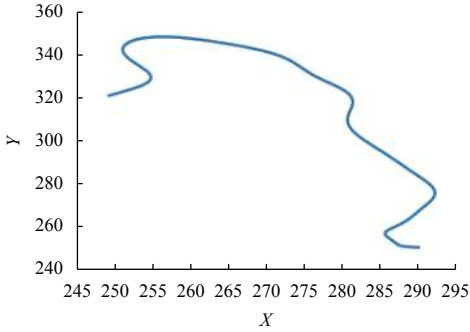
$$\begin{cases} F_{0,3}(t) = \frac{1}{6}(1-t)^3 \\ F_{1,3}(t) = \frac{1}{6}(3t^3 - 6t^2 + 4) \\ F_{2,3}(t) = \frac{1}{6}(-3t^3 + 3t^2 - 3t + 1) \\ F_{3,3}(t) = \frac{1}{6}t^3 \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10),得到三次B样条曲线表达式为

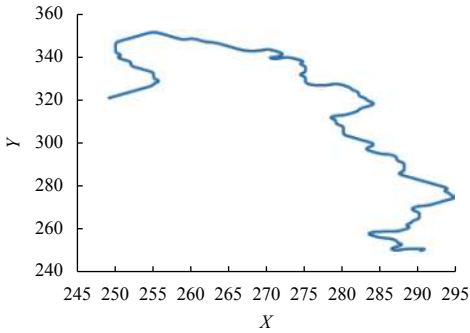
$$P(t) = P_0 F_{0,3}(t) + P_1 F_{1,3}(t) + P_2 F_{2,3}(t) + P_3 F_{3,3}(t) \quad (13)$$

分别用2种算法拟合曲线,结果如图4所示。与3次

B样条曲线拟合图4 (b) 相比, 贝塞尔曲线拟合结果图4 (a) 整体趋势平滑, 但对曲线细节表现力较差。基于曲率的曲线匹配算法是根据曲线弯曲程度进行匹配, 对曲线细节拟合要求高, 贝塞尔拟合曲线易造成误匹配, 故B样条曲线拟合算法更适合。



(a) 贝塞尔曲线拟合



(b) 三次B样条曲线拟合

图 4 曲线拟合结果
Fig. 4 Curve fitting results

2.2 尺度不变性曲率计算

对于图5中连续曲线, 曲率表示为曲线弧切线转角与弧长之比

$$k = \frac{\Delta\alpha}{\Delta s} \quad (14)$$

其中: $\Delta\alpha$ 为弧切线转角, Δs 为对应弧长。

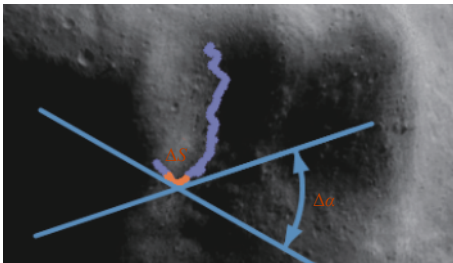


图 5 连续曲线曲率
Fig. 5 Curvature of continuous curve

在曲线曲率基础上进行曲率积分计算, 由于曲线中存在拐点, 且有符号曲率积分非单调变化, 导致同

一积分数值可能对应多个曲率值, 因此本文选择使用无符号曲率积分。给定弧长为 l 的曲线, 曲线曲率绝对值积分为

$$K(0:l) = \int_0^l |k(s)| ds \quad (15)$$

其中, $K(0:l)$ 为曲率绝对值之和。将该曲线缩放 a 倍得到新曲线, 其曲率绝对值之和为

$$\bar{K}(0:al) = \int_0^{al} |\bar{k}(\bar{s})| d\bar{s} \quad (16)$$

其中: $\bar{K}(0:al)$ 为缩放后曲线曲率绝对值之和; $\bar{k}(\bar{s})$ 为缩放后曲线曲率, 由于曲率与曲线长度成反比, 因此

$$|\bar{k}(\bar{s})| = \frac{1}{a} |k(s)| \quad (17)$$

$$d\bar{s} = a ds \quad (18)$$

将式(17)与式(18)代入式(16)可得

$$\begin{aligned} \bar{K}(0:al) &= \int_0^{al} \frac{1}{a} |k(s)| d\bar{s} \\ &= \int_0^l \frac{1}{a} |k(s)| a ds \\ &= \int_0^l |k(s)| ds \end{aligned} \quad (19)$$

由式(19)可得曲率积分的尺度不变性, 即如果两输入曲线具有相同的部分, 则对曲线进行尺度变换, 且两者尺度因子为 m , 则它们在弧长轴上(坐标轴横轴)的跨度之比也为 m , 且曲率积分(坐标轴纵轴)跨度相等^[19], 如图6所示。

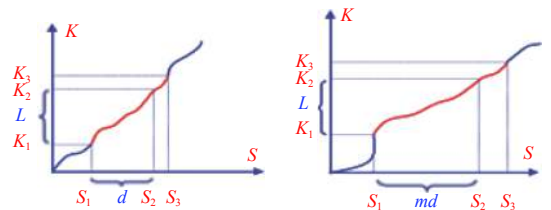


图 6 曲率积分尺度不变性
Fig. 6 Scale invariance of curvature integral

利用曲率绝对值积分尺度不变性, 以等曲率积分间隔对曲率进行采样, 使采样后曲率具有尺度不变特性。对于尺度不同但存在相似部分的两条曲线, 其曲率在经过采样处理后, 其相同部分在横轴上跨越相同长度, 两条曲线精准匹配问题转换为采样后两曲率曲线的精准匹配问题, 简化匹配难度。

等积分间隔采样后, 原曲率曲线变化剧烈处被拉长, 而变化较平缓处被压缩。在设置采样间隔时, 曲率积分间隔越小, 曲线细节信息越准确, 但同时会保

留更多噪声,且计算量大;而间隔增大时会丢失部分数据信息,但可以削弱噪声影响并且减小计算量,如图7所示。经实验,积分间隔设置为5时,能保证数据精度同时加快运行速度。

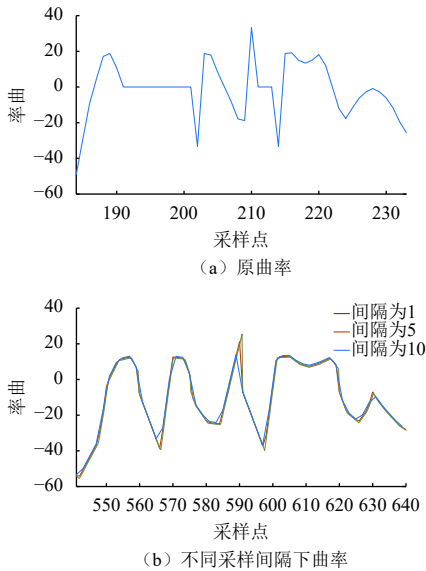


图7 原曲率与采样后曲率

Fig. 7 Original curvature and sampled curvature.

2.3 归一化互相关匹配

对于两条曲线采样后曲率匹配,采用归一化互相关算法进行相似度计算,计算公式为

$$v(u) = \frac{\sum_{i \in \Omega} [f(i) - \bar{f}][t(i-u) - \bar{t}]}{\sqrt{\sum_{i \in \Omega} [f(i) - \bar{f}]^2 \sum_{i \in \Omega} [t(i-u) - \bar{t}]^2}} \quad (20)$$

其中: f 为较短曲线中的一部分,作为模板窗口沿着较长曲线滑动; u 为两条曲线的偏移量; \bar{t} 为模板内曲率均值; \bar{f} 为滑动窗口在第二条曲线上曲率均值; v 取值范围为 $[-1, 1]$,数值越大相似度越高。

为确定两曲线最相似部分,从较短曲线 a 中截取所有可能曲线段与另一曲线 b 进行曲率匹配。对于截取的第 i 条曲线段 c_i 在曲线 b 上滑动匹配时,将互相关系数最大处(图8 P点)作为曲线段 c_i 与曲线 b 的匹配度。曲线

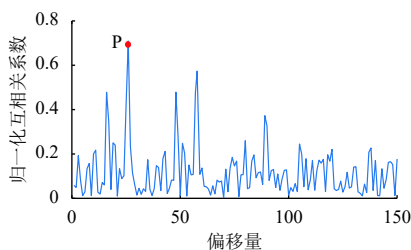


图8 曲线段匹配度

Fig. 8 Curve segment matching score

a 上所有可能曲线段完成计算后,将匹配度最高曲线段作为两曲线最相似部分。

对于所有可能曲线段进行匹配时,曲线段越短通常相关系数越大,直接利用归一化互相关系数暴力匹配,计算量大且得到的大多是长度短、难以利用的曲线如图9所示。

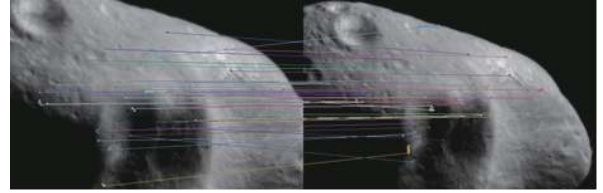


图9 暴力匹配结果

Fig. 9 Brute force match results

为提高匹配效果并减小计算量采取以下策略。

1) 设置曲线段长度与步长

精准匹配时对曲线 a 中所有曲线段进行互相关计算效率较低。经多次试验,设置步长与截取曲线长度为

$$\begin{cases} step = \max(0.02 \cdot n_s, 1) \\ n_j \in A \\ A = \{0.4n_s, 0.5n_s, 0.6n_s, 0.7n_s, 0.8n_s, 0.9n_s, n_s\} \end{cases} \quad (21)$$

其中: $step$ 为步长; n_j 为截取曲线长度; A 为截取曲线长度集合; n_s 为曲线 a 长度。

2) 修改曲线段匹配度计算方式

考虑到曲线长度较长时,计算所得相关系数一般较低,为获得较长曲线匹配结果,计算匹配得分时加入曲线长度作为权重系数

$$S = vL \quad (22)$$

其中: S 为匹配结果最终得分; L 为曲线段 c 的长度。

设曲线 a 长度为 n_s 与 b 长度为 n_l ,暴力匹配方法截取曲线长度 $n_j \in [1, n_s]$,此时匹配计算复杂度

$$\begin{aligned} T(n_s, n_l) &= \sum_{n_j=1}^{n_s} n_l - n_j + 1 \\ &= -0.5n_s^2 + 0.5n_s + n_s n_l \\ &= O(n^2) \end{aligned} \quad (23)$$

采取两策略后,匹配时间复杂度为

$$\begin{aligned} T(n_s, n_l) &= \sum_{n_j \in A} \frac{1}{0.02} \\ &= 350 \\ &= O(1) \end{aligned} \quad (24)$$

比较式(23)与式(24)可知,匹配时间复杂度最高次项由2次降为0次,计算量大幅减少,同时匹配效果得到提升如图10所示。

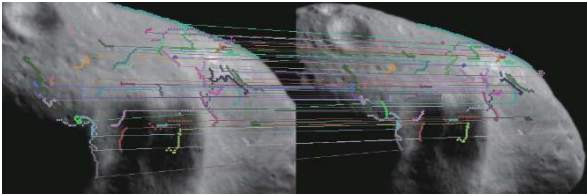


图 10 采取策略后匹配结果
Fig. 10 The matching result after adopting strategies.

3 实验结果分析

对于本文提出的曲线精准匹配算法，从时间复杂度与精准匹配率两方面进行分析。

曲线匹配时间与硬件环境密切相关，因此使用算法执行所需要的计算工作量即时间复杂度来进行比较。基于描述符进行曲线匹配时，采用最近邻比率原则，需要找到最近邻和次近邻匹配项，设两匹配图像提取到的曲线数分别为 n_1 与 n_2 ，则描述符匹配时间复杂度为

$$T_d = n_2 \cdot n_1 = O(n^2) \quad (25)$$

如2.3节中所述，在曲率匹配中一对曲线计算时间复杂度为 $O(1)$ ，则曲率匹配总体时间复杂度为

$$T_c = (n_d) \cdot O(1) = O(n) \quad (26)$$

其中 n_d 为基于描述符匹配得到的匹配曲线对数。

将描述符与曲率结合后算法时间复杂度为

$$T = T_d + T_c = O(n^2) + O(n) = O(n^2) \quad (27)$$

比较式(25)、式(26)、式(27)可得，在基于描述符匹配基础上，加入曲率匹配后时间复杂度仍然为 $O(n^2)$ 。本文提出曲线精准匹配算法与基于描述符的匹配算法相比，算法时间复杂度保持不变。

在精准匹配率方面，由于探测器下降阶段，图像纹理特征会发生缩放、旋转及光照变换，故分别在3种情况下进行实验。为评价不同变换下曲线精准匹配效果，对匹配曲线进行离散弗雷歇距离计算^[22]。对于2条匹配曲线，根据两者长度之比设置采样间隔，得到长度相等的两曲线A、B。之后通过旋转、平移将两曲线端点重合如图11所示。

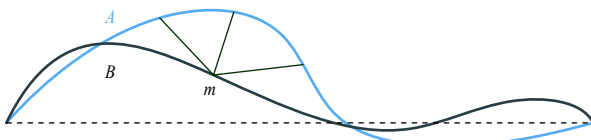
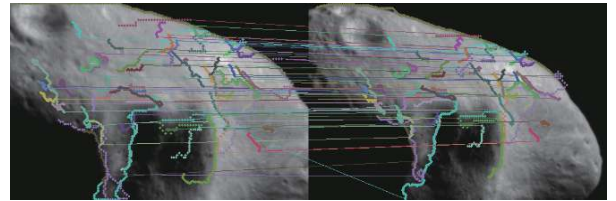


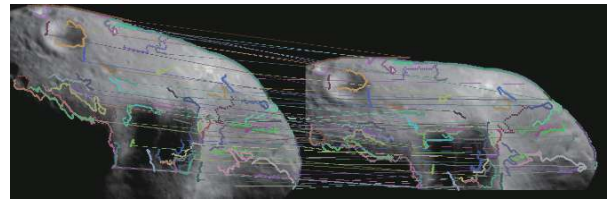
图 11 弗雷歇距离计算
Fig. 11 Fréchet distance calculation.

计算两曲线弗雷歇距离时，对于曲线B上一点 m ，计算该点到曲线A上各点欧氏距离，将所有欧氏距离中最小值作为候选弗雷歇距离。对曲线B中各点完成计算后，将候选弗雷歇距离最大值作为曲线A与曲线B的弗雷歇距离。经实验，在评估时将弗雷歇距离小于5的结果作为精准匹配。

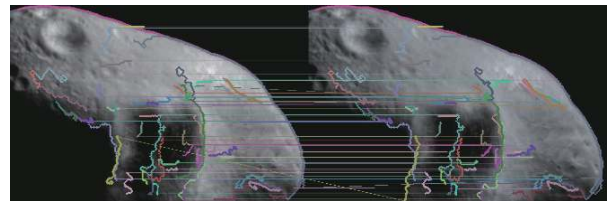
实验所用为从NASA官网得到的真实小天体图像。图12为尺度、旋转与光照变换下描述符匹配算法实验结果，表1为3种变换下相应精准匹配率。结合图12与表1可知，基于描述符匹配算法在尺度与旋转变换下精准匹配效果较差。



(a) 尺度变换



(b) 旋转变换



(c) 光照变换

图 12 不同变换下描述符匹配算法实验结果
Fig. 12 The experimental results of descriptor matching algorithm under different transformations

表 1 不同变换下描述符匹配算法精准匹配率
Table 1 The accurate matching rate of descriptor matching algorithm under different transformations

匹配方法	尺度	旋转	光照
描述符/%	52.54	54.25	80.39

图13~15展示了尺度、旋转与光照变换下本文所述曲线精准匹配算法实验结果，表2为3种变换下相应精准匹配率。结合图13~15与表2可以看出，在尺度、旋转与光照变换下，本文描述的描述符与曲率相结合的曲线精准匹配算法可以达到84%以上精准匹配率。

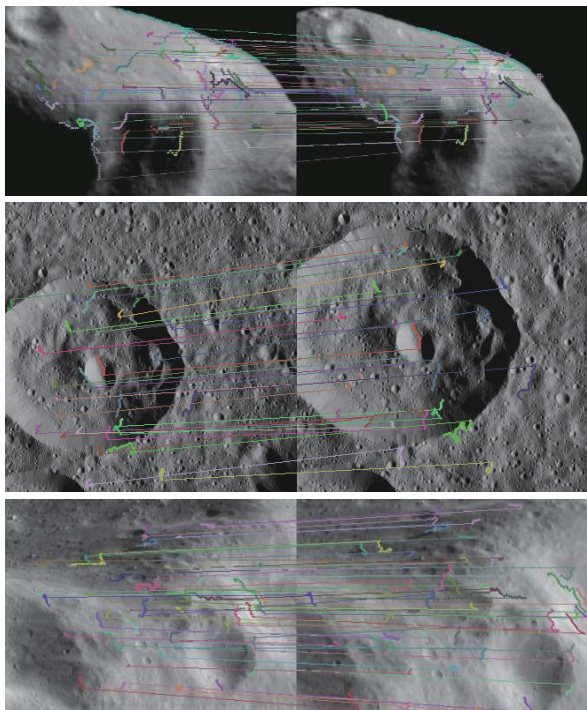


图 13 尺度变换下实验结果
Fig. 13 The experiment results with scale variation

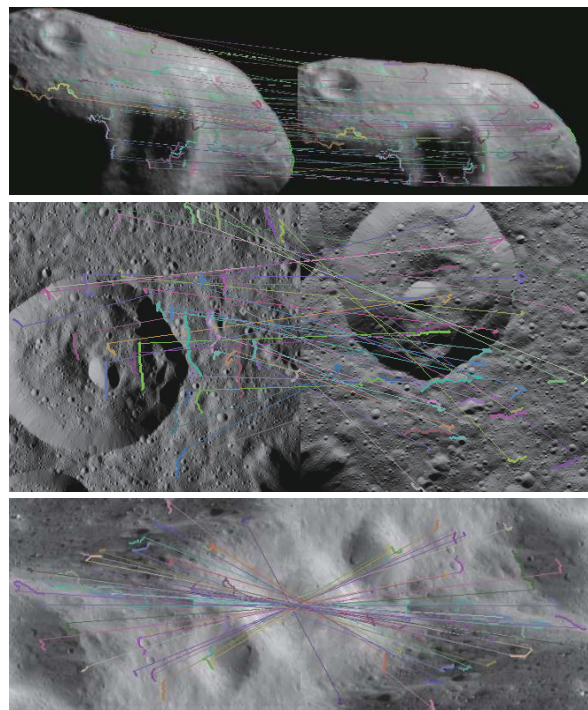


图 14 旋转变换下实验结果
Fig. 14 Matching score with illumination variation

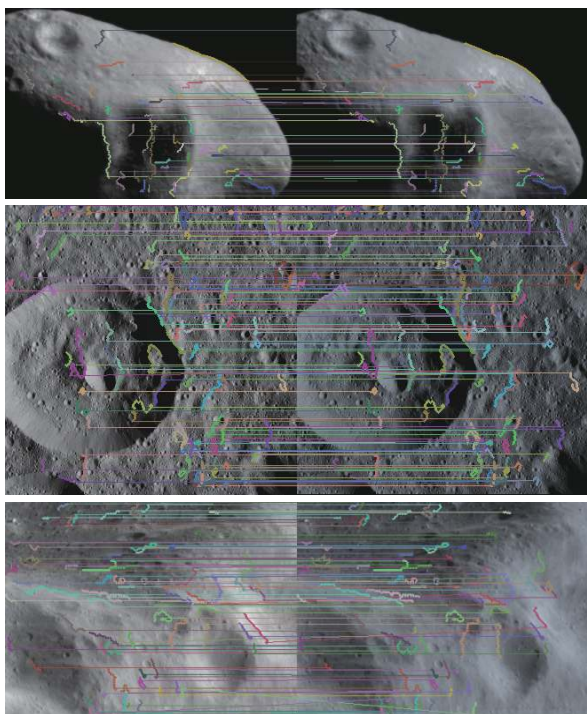


图 15 光照亮度变换下实验结果
Fig. 15 The experiment results with illumination variation

表 2 不同变换下精准匹配率

Table 2 The accurate matching rate under different transformations

匹配方法	尺度	旋转	光照
曲线精准匹配/%	86.49	84.44	89.36

4 结 论

针对曲线描述符难以精准匹配、曲率匹配仅能处理两条曲线的问题，本文提出一种将两者相结合的曲线精准匹配算法，主要包括曲线提取、描述符匹配与曲率匹配3部分。曲线提取部分根据Edge Drawing算法进行边缘曲线检测；描述符匹配部分对曲线及周围支撑区域信息进行描述，根据最近邻距离比率原则完成粗匹配；曲率匹配部分根据无符号曲率积分对曲率曲线重采样，并根据归一化互相关算法完成曲线精准匹配。实验结果表明，本文提出的算法可以达到84%以上的精准匹配率。

参 考 文 献

[1] 崔平远, 贾贺, 朱圣英. 小天体不规则度与光学导航质心提取及应用[J]. 宇航学报, 2021, 42(1): 83-91.
CUI P Y, JIA H, ZHU S Y. Asteroid irregularity degree and application in centroid extraction of optical navigation[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(1): 83-91.

[2] TSUDA Y, YOSHIKAWA M, SAIKI T, et al. Hayabusa2-sample return and kinetic impact mission to near-earth asteroid Ryugu[J]. Acta Astronautica, 2019, 156: 387-393.

[3] 张哲, 孙瑾, 杨刘涛. 融合相关滤波与关键点匹配的跟踪算法[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 259-267.
ZHANG Z, YANG J, YANG L T. Tracking algorithm based on correlation filter fusing with keypoint matching[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 259-267.

- [4] 修春波, 马云菲, 潘肖楠. 基于距离融合的图像特征点匹配方法[J]. 计算机应用, 2019, 39(11): 3158-3162.
XIU C B, MA Y F, PAN X N. Image feature point matching method based on distance fusion[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(11): 3158-3162.
- [5] 李鹤宇, 王青. 一种具有实时性的SIFT特征提取算法[J]. 宇航学报, 2017, 38(8): 865-871.
LI H Y, WANG Q. A Real-time SIFT feature extraction algorithm[J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(8): 865-871.
- [6] BAKAMBU J N, LANGLEY C, PUSHPANATHAN G, et al. Field trial results of planetary rover visual motion estimation in Mars analogue terrain[J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29(3): 413-425.
- [7] 胡涛, 贺亮, 曹涛, 等. 行星陨石坑检测算法研究综述[J]. 载人航天, 2020, 26(5): 656-663.
HU T, HE L, CAO T, et al. Review of planetary crater detection algorithms[J]. Manned Spaceflight, 2020, 26(5): 656-663.
- [8] 田阳, 李国庆, 宋新. 一种三维地形特征提取和匹配方法[J]. 宇航学报, 2018, 39(6): 690-696.
TIAN Y, LI GUO Q, SONG X. A novel 3D terrain feature detecting and matching method[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(6): 690-696.
- [9] 郑磊, 胡维多, 刘畅. 基于深度学习的大型陨石坑识别方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(5): 994-1004.
ZHENG L, HU W D, LIU C. Large crater identification method based on deep learning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(5): 994-1004.
- [10] 邵巍, 陈海燕, 孟琳, 等. 基于鲁棒曲线匹配的星表特征跟踪方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2014, 1(1): 75-80.
SHAO W, CHEN H Y, MENG L, et al. Planetary terrain features tracking method based on robust curve matching[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 75-80.
- [11] CUI P Y, GAO X Z, ZHU S Y, et al. Visual navigation based on curve matching for planetary landing in unknown environments[J]. Acta Astronautica, 2020, 170: 261-274.
- [12] LIU H, ZHI S, WANG Z. IOCD: Intensity order curve descriptor[J]. International Journal of Pattern Recognition & Artificial Intelligence, 2013, 27(7): 980-985.
- [13] 王志衡, 智珊珊, 刘红敏. 基于亮度序的均值标准差描述子[J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(4): 409-416.
WANG Z H, ZHI S S, LIU H M. Intensity order based mean-standard deviation descriptor[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(4): 409-416.
- [14] LIU H, CHEN L, WANG Z, et al. GOCD: Gradient order curve descriptor[J]. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 2017, 100(12): 2973-2983.
- [15] COHEN F S, HUANG Z, YANG Z. Invariant matching and identification of curves using B-splines curve representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(1): 1-10.
- [16] TANAI T, MATSUSHITA Y, SATO Y, et al. Continuous 3D label stereo matching using local expansion moves[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2016, 40(11): 2725.
- [17] 刘双印. 三维自由曲线的立体匹配及重构方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
LIU S Y. Stereo matching and reconstruction of three dimensional free curve[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [18] CUI M, FEMIANI J, HU J, et al. Curve matching for open 2D curves[J]. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(1): 1-10.
- [19] TOPAL C, AKINLAR C. Edge drawing: a combined real-time edge and segment detector[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2012, 23(6): 862-872.
- [20] ZHANG L, KOCH R. An efficient and robust line segment matching approach based on LBD descriptor and pairwise geometric consistency[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(7): 794-805.
- [21] 李莎莎, 徐惠霞, 邓重阳. 数据点加权最小二乘渐进迭代逼近及其B样条曲线拟合[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(9): 1574-1580.
LI S S, XU H X, DENG C Y. Data-weighted least square progressive and iterative approximation and related B-spline curve fitting[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(9): 1574-1580.
- [22] 黄世泽, 陈威, 张帆, 等. 基于弗雷歇距离的道岔故障诊断方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(12): 1690-1695.
HUANG S Z, CHEN W, ZHANG F, et al. Method of turnout fault diagnosis based on Fréchet distance[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2018, 46(12): 1690-1695.

作者简介:

王光泽(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机视觉、深度学习。

通讯地址: 青岛科技大学自动化与电子工程学院(266100)

E-mail: gzwang96@126.com

邵巍(1980-), 男, 教授, 主要研究方向: 深空探测器自主导航、机器视觉、图像处理与智能感知。**本文通讯作者。**

通讯地址: 青岛科技大学自动化与电子工程学院(266100)

E-mail: greatshao@126.com

Accurate Matching Algorithm of Small Celestial Body Surface Texture Curve

WANG Guangze¹, SHAO Wei¹, CHI Hongliang¹, YAO Wenlong¹, HUANG Xiangyu²

(1. College of Automation&Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;

2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: Irregular curves are often used as navigation landmark in the landing of celestial probes. Accurate matching of curves is an important premise for visual navigation. For the problem that curve descriptor matching algorithm are difficult to accurately match and curvature matching algorithm can only handle a pair of curves, an accurate curve matching algorithm combining curve descriptor and curvature is proposed. The curves are extracted by Edge Drawing algorithm first; then the descriptors for curves and supporting regions are built, and the rough matching is completed based on Nearest Neighbor Distance Ratio. After, the unsigned curvature integral is calculated and the curvature is sampled at equal integration intervals. The accurate curve matching is realized based on Normalized Cross Correlation. The experimental results demonstrate that, the algorithm can achieve more than 84% accurate matching rate under scale, rotation and illumination transformations.

Keywords: small celestial; curve descriptor; scale invariant curvature; normalized cross correlation

Highlights:

- The curve descriptors and curvatures are combined for accurate curve matching.
- Constructing scale and rotation invariant curvature based on curvature integral.
- The algorithm in this paper achieves an accurate matching rate of more than 84% under illumination, scale and rotation transformation.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 刘勇]