

## \* 专题评述 \*

## 空间飞行器特征提取与相对定姿研究进展\*

李克昭 袁建平 岳晓奎

西北工业大学航天学院, 西安 710072

**摘要** 在人类探索太空的活动中, 空间飞行器特征提取与相对定姿是一个非常重要的空间应用问题, 相应的算法是迫切需要解决的核心问题. 文中首先介绍了空间飞行器特征提取与相对定姿算法的国内外相关研究现状, 分析了相关算法存在的不足. 研究和探讨了数学形态学和双四元数理论及其成功应用. 在此基础上, 提出了基于数学形态学和多组双四元数的新算法. 该算法克服了传统方法的不足, 有效地将空间飞行器姿轨控信息应用到结构元素的动态重构与分解、多组双四元数方程的动态建立与解算中, 尤其是把空间飞行器特征提取与相对定姿统一考虑的研究思路在解决同类空间应用问题中具有一定的参考价值.

**关键词** 特征提取 相对定姿 数学形态学 多组双四元数

伴随着空间探索的不断深入, 出现了诸如空间碎片、卫星的在轨维护、空间平台的在轨组装等难以解决的新问题, 空间飞行器特征提取与相对定姿正是解决上述问题的关键. 然而传统的特征提取算法存在计算量大、实时性和可操作性差等缺陷, 难以满足空间复杂的高动态环境<sup>[1-4]</sup>. 同时, 传统的思路将空间飞行器特征提取和相对定姿作为两个独立的问题进行解决, 导致了系统间的互不匹配性.

近几年, 在研究新的空间目标特征提取算法的同时, 有学者将空间目标特征提取与相对定姿结合起来进行研究. 1997年, James 在他的博士论文中提出了基于扩展 Kalman 滤波的双四元数方法进行空间目标特征提取和姿态确定<sup>1)</sup>, 该算法对于确定运动目标的相对姿态是一种很好的思路, 但在目标特征点的提取方面并没有考虑空间目标的相对运动导致特征点的动态变化问题; 2001年, Piotr 等用二维的图像匹配法结合相

应的三维变换模型解决卫星捕获中的定姿与跟踪问题<sup>[5]</sup>, 该方法具有一定的参考价值, 但难于操作且计算量大, 无法保证其实时性; 2002年, Adnan 等提出了基于点和线的目标线性姿态估计算法<sup>[6]</sup>, 该方法的缺点同样是计算复杂、耗时、可操作性差; 2003年, 出现了用 Kalman 滤波技术估计空间目标的状态、形状、内部参数和姿态的方法<sup>[7]</sup>, 该方法存在的缺陷是计算量大且对于空间高噪声干扰的图像问题显得力不从心.

数学形态学是一门新兴的图像分析和处理学科, 它具有非线性、形态学分析和快速并行处理等特点, 加之简单、易于实现等优势, 使其逐渐成为图像处理及其相关领域的一个研究热点. 近年来, 数学形态学在国内外诸多领域取得了一些成功的应用实例, 如噪声的处理、地雷的探测、SAR 图像的处理等(详见文献[8-10]). 这些研究表明, 数学形态学在空间飞行器特征提取中具有广阔的应用前景.

2005-06-28 收稿, 2005-09-12 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10402034)

E-mail: lkznwpu@126.com

1) James Samuel Goddard, Jr. Pose and motion estimation from vision using dual quaternion-based extended Kalman filtering. Ph. D. Dissertation, The University of Tennessee, Knoxville, 1997

四元数的研究和应用均较早出现,其空间应用的优越性是伴随着空间技术、计算机技术、特别是捷联惯导技术的发展而体现出来的.双四元数是在四元数和双代数理论的基础上提出的,是描述两个运动物体相对姿态的一种有效手段.最近几年,已有几位专家注意到双四元数的优越性,并把该方法引入到相对姿态的确定中,取得了一定的成绩.前面提到的 James 于 1997 年在他的博士论文中提出利用双四元数的方法;2002 年, Perez 等把双四元数的方法引入到机器人的运动控制问题中,至今一直在进行该方面的研究<sup>[11,12]</sup>.

针对以上不足,本文在分析数学形态学和双四元数理论及其应用优势的前提下,提出基于数学形态学和多组双四元数的空间飞行器特征提取与相对定姿新算法.该算法的思路是:利用空间飞行器姿轨控信息和相对定姿中反馈的信息实现结构元素的动态重构与分解;利用空间飞行器姿轨控信息实现多组双四元数方程主要参数的初始化,提高计算速度,利用结构元素的动态分解提供双四元数方程的分组信息.以下对这些关键技术和研究思路进行详细的介绍和分析.

## 1 基于数学形态学的空间飞行器特征提取

### 1.1 理论基础<sup>[4,13]</sup>

数学形态学的理论基础是集合论,它由一组形态学的代数算子组成.最基本的形态学运算有:腐蚀、膨胀、开和闭4种.用这些基本的算法及其组合来进行图像形状和结构的分析及处理,包括图像分割、特征提取、边界检测、图像滤波、图像增强和恢复等方面的工作,具有独特的优势.

#### (1) 腐蚀运算

集合  $A$  被集合  $B$  腐蚀,表示为

$$A \ominus B = \{x: B + x \subset A\}, \quad (1)$$

其中  $\subset$  表示子集关系,  $x$  为平移量.

#### (2) 膨胀运算

膨胀运算是腐蚀运算的对偶运算(逆运算),可以通过对补集的腐蚀来定义.  $A$  被  $B$  膨胀表示为  $A \oplus B$ , 其定义为

$$A \oplus B = [A^c \ominus (-B)]^c, \quad (2)$$

其中,  $A^c$  表示  $A$  的补集.

#### (3) 开运算

利用图像  $B$  对图像  $A$  作开运算,用符号  $A \circ B$  表示,其定义为

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B. \quad (3)$$

#### (4) 闭运算

闭运算是开运算的对偶运算,定义为先作膨胀然后再作腐蚀.利用  $B$  对  $A$  作闭运算表示为  $A \bullet B$ , 其定义为

$$A \bullet B = [A \oplus (-B)] \ominus (-B). \quad (4)$$

### 1.2 结构元素在空间飞行器特征提取中的作用

数学形态学的基本思想是利用一个称作结构元素的“探针”收集图像的信息,当探针在图像中移动时,可考察图像各个部分之间的相互关系,了解图像的结构特征.这种基于探测思想的方法,与人的 FOA(focus of attention) 视觉特点有类似之处,作为探针的结构元素,可直接携带知识(形状、大小、甚至加入灰度和色度信息)来探测研究图像的结构特点<sup>[13]</sup>.因此,结构元素的选择意义重大.

图1给出了不同结构元素的飞行器特征提取结

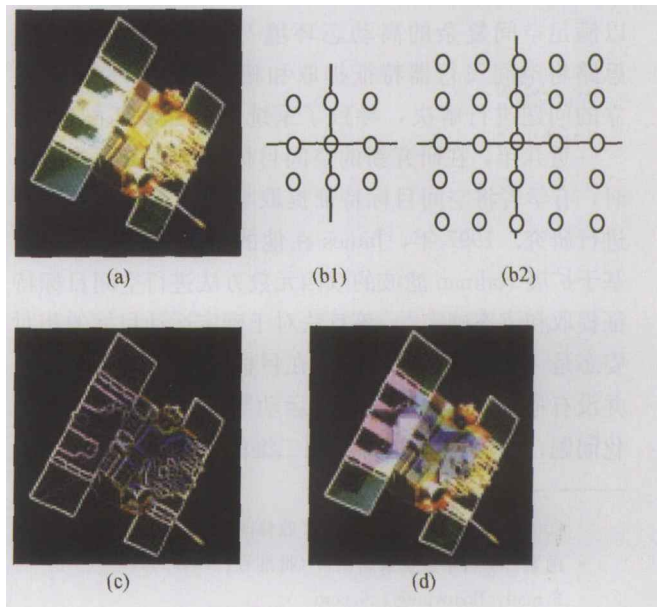


图1 不同结构元素的卫星特征提取

(a) 原卫星图; (b1), (b2) 是两种不同的结构元素;  
(c), (d) 是 (b1), (b2) 对应的特征提取结果

果. 从图 1 可以看出, 在边缘特征的提取中, 选择结构元素(b1)所得的结果(c)比选择结构元素(b2)所得的结果(d)较好. 可见, 不同的结构元素在特征提取时效果差别较大, 因此, 要针对不同的情况选择不同的结构元素. 在空间飞行器的特征提取中, 可以根据飞行器的结构特征及定姿计算的要求, 通过实际采集数据和仿真分析, 选择最为适宜的结构元素. 另外, 空间飞行器在空间时刻运动, 其相互间的相对姿态时刻发生变化(如图 2), 这样, 实现结构元素的动态选择就成为基于数学形态学的空间飞行器特征提取之趋势.

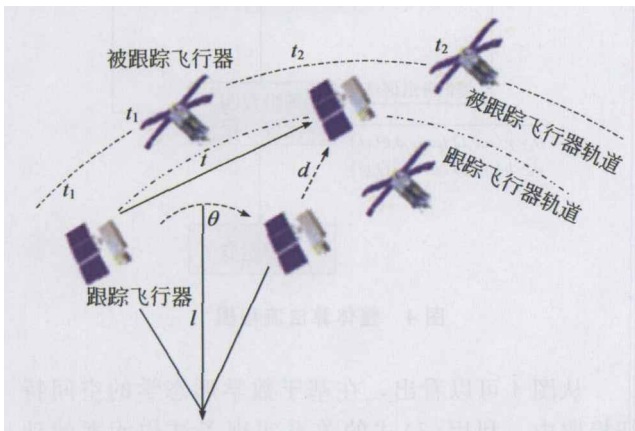


图 2 跟踪与被跟踪飞行器运行示意图

### 1.3 利用空间飞行器的姿轨控信息动态构造结构元素

在理想情况下, 空间飞行器按照所设计的轨道六要素(半长轴  $a$ ; 偏心率  $e$ ; 升交点  $\Omega$ ; 轨道倾角  $i$ ; 近地点幅角  $\omega$ ; 过近地点时刻  $t_p$ )和一定的姿态角(滚转角  $\phi$ ; 俯仰角  $\Theta$ ; 偏航角  $\psi$ )在轨运行. 如上所提, 结构元素在空间飞行器的特征提取中起着关键性的作用, 可以预先通过一定的手段建立其适宜的结构元素库, 把空间飞行器的运动规律与结构元素的运动联系起来. 假定函数  $f(a, e, \Omega, i, \omega, t_p, \phi, \Theta, \psi)$  表示了  $t$  时刻空间飞行器位置和姿态的关系. 见图 2, 在  $t_1$  时刻, 设跟踪飞行器的位置和姿态表示为  $M_1$ , 被跟踪飞行器的位置和姿态表示为  $N_1$ ; 在  $t_2$  时刻, 设跟踪飞行器的位置和姿态表示为  $M_2$ , 被跟踪飞行器的位置和姿态表示为  $N_2$ , 则有如下关系式:

$$\Delta M_1 N_1 = f_{N_1} - f_{M_1}, \quad (5)$$

$$\Delta M_2 N_2 = f_{N_2} - f_{M_2}, \quad (6)$$

$$\nabla \Delta M_{1,2} N_{1,2} = \Delta M_2 N_2 - \Delta M_1 N_1. \quad (7)$$

$\nabla \Delta M_{1,2} N_{1,2}$  代表了跟踪飞行器和被跟踪飞行器从  $t_1$  时刻到  $t_2$  时刻的相对位置和姿态变化关系, 利用(7)式求得  $\nabla \Delta M_{1,2} N_{1,2}$  后, 我们可以从预先设计的结构元素库中预选择其相对应的结构元素.

## 2 基于多组双四元数的空间飞行器相对定姿

双四元数是在四元数和双代数理论的基础上提出的, 是描述两个运动物体相对姿态的一种有效手段. 在绕双轴旋转的问题中, 双四元数具有独特的描述功能, 克服了四元数必须分次解决的缺陷. 图 3 是利用双四元数描述 3-D 物体的旋转运动变换关系.

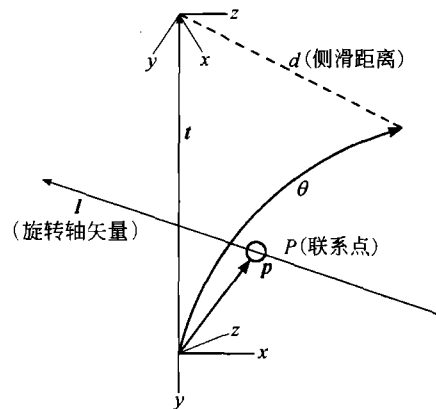


图 3 3-D 物体的运动变换关系示意图

根据文献[14], 图 3 的变换关系可以通过如下双四元数来描述:

$$\tilde{q} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta + \epsilon d}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta + \epsilon d}{2}\right)(l + \epsilon m) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中  $m = p \times l, \epsilon^2 = 0, d = l^T t,$

$$p = \frac{1}{2}(t - (t^T l)l + \cot \frac{1}{2} l \times t).$$

对于图 2, 我们可以根据(8)式分别对跟踪和被跟踪飞行器建立其从  $t_1$  时刻到  $t_2$  时刻的双四元数方程  $\tilde{q}_1$  和  $\tilde{q}_2$ :

$$\tilde{q}_1 = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta_1 + \varepsilon_1 d_1}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta_1 + \varepsilon_1 d_1}{2}\right) (\mathbf{I}_1 + \varepsilon_1 \mathbf{m}_1) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\tilde{q}_2 = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta_2 + \varepsilon_2 d_2}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta_2 + \varepsilon_2 d_2}{2}\right) (\mathbf{I}_2 + \varepsilon_2 \mathbf{m}_2) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

由此可通过解算双四元数方程  $\tilde{q}_1$  和  $\tilde{q}_2$  的参数, 从而得到跟踪与被跟踪空间飞行器  $t_2$  时刻的相对姿态. 另外, 从(8)式可以看出, 在解算双四元数方程时,  $\theta, d$  是主要的求解参数, 在方程的线性化处理中,  $\theta, d$  的初始值对于计算的实时性有着重要的意义, 如 1.3 部分, 同样可以通过空间飞行器的姿轨控信息预测  $\theta, d$  的值  $\theta_c, d_c$ :

$$\theta_c = g(a, e, \Omega, i, \omega, t_p, \phi, \Theta, \psi), \quad (11)$$

$$d_c = h(a, e, \Omega, i, \omega, t_p, \phi, \Theta, \psi). \quad (12)$$

由于跟踪与被跟踪空间飞行器都在空间运动, 被跟踪空间飞行器在跟踪空间飞行器像框平面内的影像也在变化, 即双四元数方法中所要跟踪的空间飞行器特征点在变化. 为了保证跟踪与被跟踪空间飞行器相对姿态确定的连续性, 本文提出利用多组双四元数描述空间飞行器间相对姿态信息, 每四个或四个以上被跟踪空间飞行器的特征点为一组, 建立相应的双四元数方程, 确保在相邻时刻有一组相同的双四元数方程, 这样便解决了目标相对姿态的连续性确定问题.

### 3 特征提取与相对定姿的有机结合

正如前文所述, 在传统的处理方法中, 特征提取与定姿通常是作为两个独立的部分考虑. 作者认为, 在空间飞行器的特征提取与相对定姿中, 特征提取是为进一步的定姿服务, 只有将两者统一考虑, 才能使得整体算法具有合理性、实用性.

在这一部分, 主要在上述介绍和分析的基础上, 寻求空间飞行器特征信息提取与相对定姿之间的联系, 从而得到一个特征提取与相对定姿有机结合的算法. 如上所述, 结构元素的动态重构与分解在基于数学形态学的特征提取中至关重要, 多组双

四元数方程的分组建立则是基于多组双四元数实现连续定姿的关键. 本文 1.3 部分已提到利用空间飞行器的姿轨控信息实现结构元素的动态选择, 在第二部分的定姿中, 也提出利用空间飞行器的姿轨控信息进行多组双四元数方程主要参数初始化的思路, 以提高求解速度. 那么, 在此基础上, 能否找出两者的紧密联系, 使特征提取与相对定姿算法有机地结合起来呢? 图 4 给出了该统一算法的整体构思流程图.

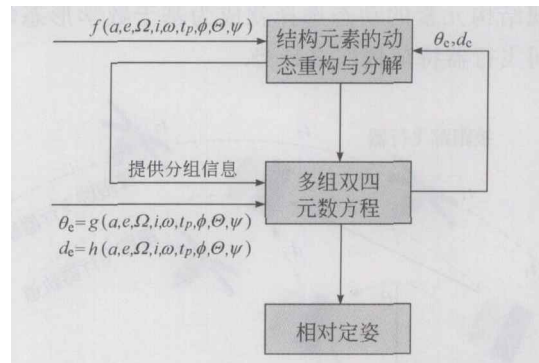


图 4 整体算法流程图

从图 4 可以看出, 在基于数学形态学的空间特征提取中, 利用(7)式的关系实现了结构元素的动态预选择. 同时, 在基于多组双四元数的定姿中, 利用(11), (12)式的关系实现了多组双四元数方程中主要参数  $\theta, d$  的初始化. 与此同时, 将结构元素的动态重构与分解信息提供给多组双四元数方程的动态、连续建立, 将  $\theta, d$  的预测值  $\theta_c, d_c$ , 反馈给结构元素的动态重构与分解. 这样, 通过图 4 的思路把空间飞行器特征提取和相对定姿两个问题有机地结合起来.

### 4 结论

(1) 在分析传统特征提取算法的基础上, 提出基于数学形态学的空间飞行器特征提取算法, 并提出将空间飞行器的姿轨控信息应用于结构元素的动态提取算法的构思.

(2) 提出基于多组双四元数的空间飞行器连续相对定姿算法, 并提出利用空间飞行器的姿轨控信息进行  $\theta, d$  参数初始化的构思, 以加快求解速度.

(3) 提出以结构元素的动态重构与分解、多组

双四元数方程的动态建立为纽带,将空间飞行器特征提取与相对定姿有机地结合起来的思路,并对其流程进行了详细的分析.

在进一步的研究中,文中所提出的  $f$ ,  $\theta_c$ ,  $d_c$  函数的详细推导和建立是我们研究的重点,也将通过相应的仿真工作进一步证实算法的正确性.

### 参 考 文 献

- 1 王广君,田金文,柳 健. 基于局部熵的红外图像小目标的检测. 红外与激光工程, 2000, 29(4): 26—29
- 2 李国宽,彭嘉雄. 基于小波变换的红外成像弱小目标检测方法. 华中理工大学学报, 2000, 28(5): 69—71
- 3 梁 鹏,黄心汉. 复杂条件下运动物体的视频检测. 计算机工程与应用, 2003, 4: 120—123
- 4 何 斌,马天予,王运坚,等. Visual C++ 数字图像处理(第二版). 北京:人民邮电出版社, 2002, 335—500
- 5 Piotr J, Greenspan M, Roth G. Pose determination and tracking for autonomous satellite capture. In: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS 2001, Canadian Space Agency, St-Hubert, Quebec, Canada, June 18—22, 2001, 1—8
- 6 Adnan A, Daniilidis K. Linear pose estimation from points or lines. ECCCV 2002, LNCS 2353: 282—296
- 7 Licher M D, Dubowsky S. Estimation of state, shape, and inertial parameters of space objects from sequence of range images. Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA02139 USA, <http://robots.mit.edu>, [2003—12—25]
- 8 Peters II R A. A new algorithm for image noise reduction using mathematical morphology. IEEE Translation on Imaging Processing, 1995, 4 (3): 554—568
- 9 Paik J, Lee C P, Abidi M A. Image processing-based mine detection techniques: A review. Subsurface Sensing Technologies and Applications, 2002, 3 (3): 203—252
- 10 Ulisses B N, Manish C, Goutsias J. Automatic target detection and tracking in forward-looking infrared image sequences using morphological connected operators. Preprint Submitted to Journal of Electronic Imaging, June 2003, 3: 1—22
- 11 Perez A, McCarthy J M. Dual quaternion synthesis of a 2-TPR constrained parallel robot. In: Proceedings of the Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators. Quebec City, Quebec, Canada, October 3—4, 2002, 150—158
- 12 Perez A, McCarthy J M, Bennett B. Dual quaternion synthesis of constrained robots. Robotics and Automation Laboratory, University of California
- 13 崔 屹. 图像处理与分析—数学形态学方法及应用. 北京: 科学出版社, 2000, 1—30
- 14 Daniilidis K, Bayro C E. The dual quaternion approach to hand-eye calibration. 1015-4651/96, IEEE 1996: 318—322