

一种基于 Facet 模型的 SAR 图像特征点检测算法

黄鹏杰¹, 王宏力¹, 赵爱罡^{1,2}, 陆敬辉¹, 姜伟¹

(1. 火箭军工程大学控制工程系, 西安 710025; 2. 火箭军工程大学士官学院, 山东 青州 262500)

摘要: 针对 SAR 图像特征点匹配问题, 提出了一种基于 Facet 模型的特征点检测方法。首先基于 Facet 模型对局部区域做灰度曲面最佳拟合, 然后计算拟合曲面中心点的二阶方向导数, 取二阶方向导数极大值小于零的点作为潜在特征点, 最后通过对极大值的绝对值归一化和局部非极大值抑制提取特征点。实验结果表明, 该算法可有效检测特征点, 算法的实时性优于传统的 SIFT 算法。

关键词: 合成孔径雷达; 特征点提取; Facet 模型; 二阶方向导数

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)01-0041-05

A Feature Point Extraction Approach of SAR Image Based on Facet Model

HUANG Peng-jie¹, WANG Hong-li¹, ZHAO Ai-gang^{1,2}, LU Jing-hui¹, JIANG Wei¹

(1. Department of Control and Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. School of Sergeancy, Rocket Force University of Engineering, Qingzhou 262500, China)

Abstract: For the feature point matching of SAR images used in navigation system, a feature point extraction approach is proposed based on Facet model. Firstly, the image intensity surface is well fitted through the Facet model. Then the second-order directional derivative of the center point of the fitting surface is calculated out, and the point whose second-order directional derivative is less than zero is taken as the potential feature point. Through normalization of absolute values for maximum values of the potential feature points and local non-maxima suppression, the feature points are obtained. Experimental results show that the proposed algorithm can successfully detect the feature point, and the real-time performance of the algorithm is better than that of the traditional SIFT algorithm.

Key words: SAR; feature point extraction; Facet model; second-order directional derivative

0 引言

合成孔径雷达(SAR)是二战以后发展起来的一种高分辨率成像雷达,利用它可以全天候、全天时、远距离得到类似光学照相的高分辨率雷达图像,具有较高的距离和方位分辨率,并且能穿透一定的伪装^[1]。随着 SAR 景象匹配技术在导弹制导中的应用越来越广泛,对景象匹配算法性能的要求也越来越高。

基于特征点的匹配方法是目前研究最多、应用最广的一类匹配方法。特征点检测的好坏直接影响着匹配质量,是特征点匹配算法的一个关键。迄今,已有许多

特征点检测算法^[2]。常见的特征点检测方法是考察当前点邻域性质,比如灰度梯度、极值性、统计特性等作为选取特征点的依据,包括 Harris 角点、SUSAN 角点和 FAST 角点检测等。在角点检测的基础上融入图像尺度空间理论,就能使检测的角点对尺度变换具有良好的不变性。除此之外,还有基于拉普拉斯滤波的检测算法,其中包括 SIFT^[3-4]特征点检测算法和 SURF^[5]算法。但是,这些特征点提取方法在进行特征点匹配时,为了实现图像的旋转不变性,使特征点具有方向信息,确定特征点的主方向需要另外步骤进行,增加了计算量。本文基于 Facet 模型,提出了一种新的特征点检测算法,计算量较小,在特征点检测的同时确定特征点主方向,从而进一步减小了特征点匹配的计算量。最后通过实验验证了本文提出的特征点检测算法的有效性,并且在实时性上优于传统的 SIFT 算法。

收稿日期:2016-01-12

修回日期:2016-10-21

基金项目:国家自然科学基金(61203189,61374054)

作者简介:黄鹏杰(1988—),男,河南林州人,硕士生,研究方向为导航制导与控制。

1 图像的 Facet 拟合模型

Facet 模型^[6]最早由美国纽约市立大学 HARALICK R M 教授提出,该模型提供了一种对邻域图像快速而准确的拟合方法,能够将二维离散的灰度图像转化为空间曲面,从而为图像分析提供了更加丰富和准确的信息,被广泛地应用于边缘检测^[7]、噪声去除^[8]等领域。

在 HARALICK 提出的小面拟合模型中,以一个像素为中心的对称小邻域可利用二维三次多项式函数做灰度曲面的最佳拟合^[9]。定义在 $R \times C$ 上的图像灰度曲面拟合函数的标准形式为

$$f(r, c) = a_1 + a_2 r + a_3 c + a_4 r^2 + a_5 r c + a_6 c^2 + a_7 r^3 + a_8 r^2 c + a_9 r c^2 + a_{10} c^3 \quad (1)$$

R 和 C 为原始图像中某个像素 (r, c) 的对称邻域,而 R 和 C 为该邻域内的坐标序数集,即 $r \in R, c \in C, a_1, \dots, a_{10}$ 为拟合系数。

计算 a_i 的算法复杂度高,考虑到二维离散正交多项式基(TDDOP)可以分解为两个方向上的一维正交多项式的向量积,并且高于 3 阶函数基可以被忽略, HARALICK 提出了采用 TDDOP 表达拟合曲面 $f(r, c)$, 以减少运算量^[7]。

令 $R = \{-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2\}, C = \{-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2\}$, 对每个像素形成 5×5 的邻域。则式(1)转化为

$$f(r, c) = \sum_{i=1}^{10} a_i \cdot P_i(r, c) \quad (2)$$

式中, $\{P_i(r, c)\} = \left\{1, r, c, r^2 - 2, rc, c^2 - 2, r^3 - \frac{17}{5}r, (r^2 - 2)c, r(c^2 - 2), c^3 - \frac{17}{5}c\right\}$ 。

Facet 模型的拟合系数 k_i 一般采用最小二乘法计算获得。为了求得拟合系数 k_i , 首先计算邻域 $R \times C$ 内拟合曲面与图像灰度值的误差, 即

$$\varepsilon^2 = \sum_R \sum_C [f(r, c) - I(r, c)]^2 \quad (3)$$

式中, $I(r, c)$ 为图像灰度值。利用最小二乘拟合法确定拟合系数 k_1, k_2, \dots, k_{10} , 使得 ε^2 最小。根据正交特性

$$\sum_R \sum_C P_j(r, c) P_i(r, c) = 0, i \neq j, \text{ 得}$$

$$k_i = \frac{\sum_R \sum_C I(r, c) P_i(r, c)}{\sum_R \sum_C P_i^2(r, c)} \quad i = 1, 2, \dots, 10 \quad (4)$$

即拟合系数 k_i 可由定义在邻域 $R \times C$ 上的图像的灰度值 $I(r, c)$ 的线性组合来确定, 相应的卷积核为

$$w_i = \frac{P_i(r, c)}{\sum_R \sum_C P_i^2(r, c)} \quad i = 1, 2, \dots, 10 \quad (5)$$

即可通过模板卷积的方式快速地计算出图像的 Facet

小面模型系数。

2 特征点检测方法

为了将特征点从背景中检测出来, 本文通过建立图像的 Facet 模型, 采用二阶方向导数的极大值来表示特征点与背景的差异, 二阶方向导数极大值用 D_{\max} 表示。特征点和非特征点的差别主要表现在特征点 $D_{\max} < 0$, 而背景中的大面积同质区的像素点在各个方向的 $D_{\max} = 0$, 背景的边缘纹理的像素点 $D_{\max} > 0$, 表示为

$$\begin{cases} D_{\max} < 0 & \text{特征点处} \\ D_{\max} = 0 & \text{同质区域} \\ D_{\max} > 0 & \text{边缘纹理} \end{cases} \quad (6)$$

对于特征点而言, 局部拟合曲面二阶方向导数极大值小于零的点可以作为潜在特征点。因此, 潜在特征点的检测转化为利用极值条件求局部拟合曲面二阶方向导数极大值小于零的点的的问题。

根据图像处理的偏微分方程方法, 对式(2)分别做二阶行、列偏导数估计, 图像曲面 $f(r, c)$ 上的中心点 $(r=0, c=0)$ 的方向导数^[10]为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} = 2k_4 \\ \frac{\partial^2 f}{\partial r \partial c} = k_5 \\ \frac{\partial^2 f}{\partial c^2} = 2k_6 \end{cases} \quad (7)$$

推导出沿 l 方向的方向导数为^[10]

$$D = \frac{\partial^2 f}{\partial l^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \cos^2 \alpha + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial r \partial c} \cos \alpha \cos \beta + \frac{\partial^2 f}{\partial c^2} \cos^2 \beta = (k_4 - k_6) \cos 2\alpha + k_5 \sin 2\alpha + k_4 + k_6 \quad (8)$$

式中, $\cos \alpha, \cos \beta$ 为沿 l 方向的方向余弦。

下面推导二阶方向导数取极大值时的条件。式(8)对 α 求导可得

$$\frac{\partial D}{\partial \alpha} = -2(k_4 - k_6) \sin 2\alpha + 2k_5 \cos 2\alpha \quad (9)$$

令 $\partial D / \partial \alpha = 0$, 可得

$$(k_4 - k_6) \sin 2\alpha = k_5 \cos 2\alpha \quad (10)$$

对式(9)两边同时平方, 并由 $\sin^2 2\alpha = 1 - \cos^2 2\alpha$, 可得

$$(k_4 - k_6)^2 (1 - \cos^2 2\alpha) = k_5^2 \cos^2 2\alpha \quad (11)$$

由式(11)进一步可得

$$\cos^2 2\alpha = \frac{(k_4 - k_6)^2}{k_5^2 + (k_4 - k_6)^2} \quad (12)$$

从而可得

$$\cos 2\alpha = \pm \sqrt{\frac{(k_4 - k_6)^2}{k_5^2 + (k_4 - k_6)^2}} \quad (13)$$

由 $\sin^2 2\alpha = 1 - \cos^2 2\alpha$, 可得

$$\sin^2 2\alpha = 1 - \frac{(k_4 - k_6)^2}{k_5^2 + (k_4 - k_6)^2} \quad (14)$$

化简可得

$$\sin^2 2\alpha = \frac{k_5^2}{k_5^2 + (k_4 - k_6)^2} \quad (15)$$

从而可得

$$\sin 2\alpha = \pm \sqrt{\frac{k_5^2}{k_5^2 + (k_4 - k_6)^2}} \quad (16)$$

从以上可得出,当满足式(13)和式(16)时,沿 l 方向的二阶方向导数可以取得极值。为使二阶方向导数 D 取得极大值,把式(13)和式(16)代入式(8)。由于 $k_4 + k_6$ 是常量,故当 $(k_4 - k_6) \cos 2\alpha \geq 0, k_5 \sin 2\alpha \geq 0$ 时, D 取得极大值,即需要 $\cos 2\alpha$ 与 $k_4 - k_6$ 同号, $\sin 2\alpha$ 与 k_5 同号。可得

$$D_{\max} = \frac{(k_4 - k_6)^2}{\sqrt{k_5^2 + (k_4 - k_6)^2}} + \frac{k_5^2}{\sqrt{k_5^2 + (k_4 - k_6)^2}} + k_4 + k_6 \quad (17)$$

化简可得 D_{\max} 的表达式为

$$D_{\max} = \sqrt{k_5^2 + (k_4 - k_6)^2} + k_4 + k_6 \quad (18)$$

根据 HARALICK 小面模型, (k_4, k_5, k_6) 是邻域 $R \times C$ 上图像灰度值的线性组合,可根据式(5)导出的方向导数算子与图像进行卷积运算来计算。在 $R = \{-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2\}$ 和 $C = \{-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2\}$ 上定义的 5×5 邻域上相应的卷积和表示为

$$\begin{cases} \mathbf{w}_4 = \frac{1}{70} \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -2 & -2 & -2 & -2 & -2 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{w}_5 = \frac{1}{100} \begin{bmatrix} 4 & 2 & 0 & -2 & -4 \\ 2 & 1 & 0 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ -4 & -2 & 0 & 2 & 4 \end{bmatrix} \\ \mathbf{w}_6 = \mathbf{w}_4^T \end{cases} \quad (19)$$

由此可得 k_4, k_5, k_6 的值,代入式(18)即可得 D_{\max} 。

对图像的每个像素建立 Facet 小面拟合模型,并计算其二阶方向导数的极大值 D_{\max} ,提取二阶方向导数极大值 $D_{\max} < 0$ 的点作为潜在特征点;然后对二阶方向导数极大值 D_{\max} 的绝对值 $|D_{\max}|$ 进行归一化,通过设定 $|D_{\max}|$ 归一化后的阈值,可以调整提取特征点的数目;最后,进行局部非极大值抑制,提取特征点。由于背景中同质区二阶方向导数的极大值 $D_{\max} = 0$,边缘纹理二阶方向导数极大值 $D_{\max} > 0$,从而将这些点排除。

对于一个特征点,在特定的 l 方向上,二阶方向导

数取得极大值,可以把 $\partial D / \partial \alpha = 0$ 时,确定出特征点二阶方向导数极大值时的 α 方向,确定为特征点的主方向,使特征点具有方向信息,从而特征点具有旋转不变性。

当特征点取得极值时, $\partial D / \partial \alpha = 0$,由式(10)可得

$$\tan 2\alpha = \frac{k_5}{k_4 - k_6} \quad \alpha \in [0, 360^\circ) \quad (20)$$

满足式(20)条件的 α 有 4 个,分别用 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 表示,满足以下关系

$$\begin{cases} \alpha_2 = \alpha_1 + 90^\circ \\ \alpha_3 = \alpha_1 + 180^\circ \\ \alpha_4 = \alpha_1 + 270^\circ \end{cases} \quad (21)$$

式中: α_1, α_3 同时使二阶方向导数 D 取得极大值或极小值; α_2, α_4 同时使二阶方向导数 D 取得极大值或极小值。由于特征点的主方向只能取得一个,所以将 α_1 或 α_2 确定为特征点的主方向。本文提出的确定特征点主方向的方法在景象匹配制导中是可行的,这是由于在图像匹配之前可用惯导提供的导弹姿态信息对参考图和实时图进行旋转角度的校正,从而可以确定特征点唯一的主方向。

3 实验与结果分析

3.1 特征点检测实验

首先通过一组实验对本文特征点检测算法的有效性进行验证。

图 1a 为一幅含有多种大小和不同属性的典型特征的 BMP 图像,图像像素大小为 77×77 ,作为测试特征点检测效果的原始图像。图 1b 为提取图 1a 二阶方向导数极大值 $D_{\max} < 0$ 的点后,对 $|D_{\max}|$ 归一化后分布的三维图像空间。图 1c 是归一化后阈值取 0.2 时的检测效果图,作为对比,图 1d 是归一化后阈值取 0.4 时的检测效果图。

由图 1b 可以看出,由 $D_{\max} < 0$ 对潜在特征点进行提取,对于亮度和属性不同的潜在特征点,其 $|D_{\max}|$ 是不同的,即亮度越高和背景的差别越明显,其 $|D_{\max}|$ 越大。由此可以通过设定阈值来调整提取特征点的数目。由图 1c 和图 1d 可以看出,在设定的阈值较小时,提取的特征点较多,设定的阈值较大时,提取的特征点数目较少。

为了验证本文算法对 SAR 图像特征点检测的有效性,下面对真实的 SAR 图像进行特征点检测实验,并且在对原始图像旋转和缩放后进行特征点检测。

图 2a 是原始 SAR 图像中截取的像素大小为 223×220 的部分岛屿图像;图 2b 是本文算法阈值为 0.2 时的特征点检测效果图;图 2c 是将图 2a 顺时针旋转 45° 时特征点检测效果图;图 2d 是将图 2a 同比例缩小成像素

大小为 115×152 后本文算法的检测效果图。

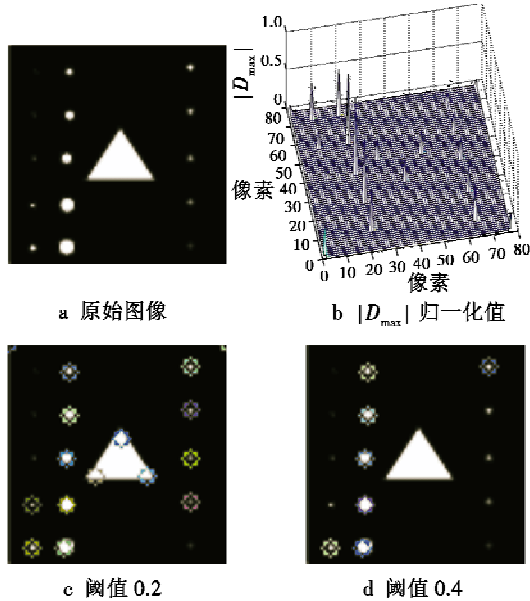


图1 特征点检测效果图

Fig. 1 Feature point extraction with test images

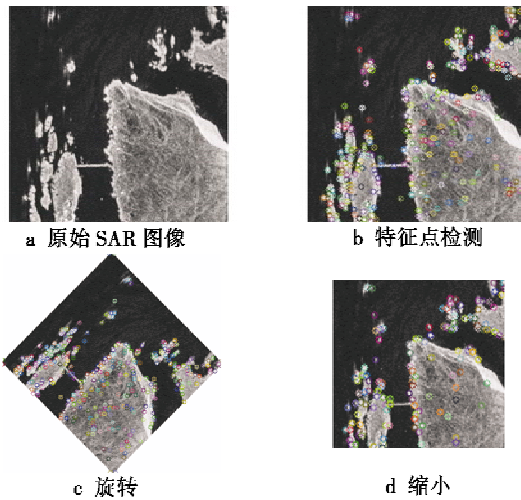


图2 SAR 图像特征点检测效果

Fig. 2 Feature point extraction with SAR images

从 SAR 图像的实验结果可以看出,背景中的大面积同质区,如海面,没有特征点被检测出来,还有图像的边缘纹理上的点也没有被检测出,说明了本文算法特征点提取的有效性。在旋转和缩放条件下,从图 2c 和图 2d 可以看出,提取的特征点可重复性较高,说明特征点检测受图像旋转和尺度变化影响较小。

3.2 特征点匹配算法实验

为验证本文特征点检测算法的实时性,设计特征点匹配算法实验来验证。

SIFT 算子采用对特征点邻域的统计描述方式,使其对特征的描述更稳定可靠,同时为了和 SIFT 算法进行比较,本文借鉴这种方法对本文提取的特征点进行

类 SIFT 的描述。SIFT 算法中给关键点分配一个主方向,目的是为了确保持描述符的旋转不变性,本文可以直接将特征点二阶方向导数取极大值的方向 α 作为主方向,从而省略这个步骤。匹配算法的流程如图 3 所示。

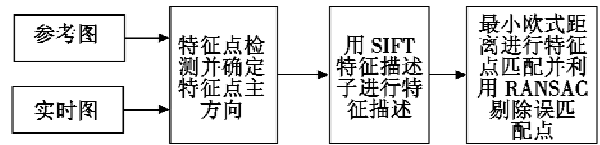


图3 特征点匹配算法流程图

Fig. 3 Flow chart of feature point matching

本文使用 Visual Studio 2012 和 OpenCV 进行编程仿真实验,计算机系统是 Windows7 Intel (R) i3-4150 CPU3.50 GHz, RAM 4GB。一组图像的匹配结果如图 4 所示,为了便于观察,只显示了部分特征点匹配效果。

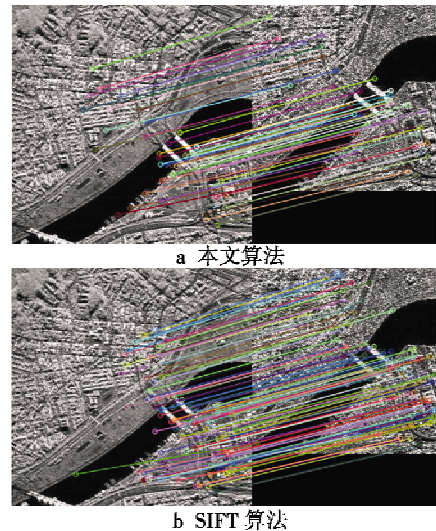


图4 本文算法和 SIFT 算法效果对比图

Fig. 4 Effect of the proposed matching algorithm and SIFT algorithm

通过对 50 组 SAR 图像进行实验,得出如表 1 所示的统计结果。其中,特征点正确匹配数目指的是采用随机抽样一致算法 (RANSAC) 去除误匹配点后,正确匹配的特征点对数目。

表1 本文算法与 SIFT 算法实验结果对比

Table 1 Experimental result of the proposed matching algorithm and SIFT algorithm

匹配算法	平均运行时间/s	特征点正确匹配数目
本文算法	0.326	79
SIFT 算法	0.522	96

从表 1 可以看出,在运行时间上,本文算法匹配性能优于 SIFT 方法。这是由于本文方法经过三次卷积来提取特征点,计算量较小;同时,特征点主方向的确定与特征点提取同步进行,节省了额外的计算步骤,因此实时性更好。

4 结束语

本文针对特征点检测算法计算量大的问题,基于 Facet 模型,提出了一种新的特征点检测方法。本文算法旨在提高特征点提取的速度。通过卷积计算 Facet 模型的系数,在特征点检测的同时确定特征点的主方向,计算复杂度较小。实验结果表明,本文特征点检测方法比较稳定,可有效对 SAR 图像的特征点进行检测,并且实时性优于传统的 SIFT 算法。

参考文献

- [1] 邵慧,刘建业,熊智. 惯性/SAR 图像组合导航技术的发展[J]. 航空科学技术,2013(5):71-75.
- [2] 刘景能. 图像局部不变特征提取技术及其应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.
- [3] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]//IEEE International Conference on Computer Vision, 1999:1150-1157.
- [4] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision,

2004, 60(2):91-110.

- [5] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, et al. Speeded-Up Robust Features (SURF) [J]. International Journal on Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3):346-359.
- [6] HARALICK R M. Digital step edges from zero crossing of second directional derivatives[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 6(1):58-68.
- [7] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7):629-639.
- [8] FRENCH P A, ZEIDLER J H, KU W H. Enhanced detectability of small objects in correlated clutter using an improved 2-D adaptive lattice algorithm [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3):383-397.
- [9] JI Q, HARALICK R M. Efficient facet edge detection and quantitative performance evaluation [J]. Pattern Recognition, 2002, 35(3):689-700.
- [10] QI S X, MA J, TAO C, et al. A robust directional saliency-based method for infrared small-target detection under various complex backgrounds [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(3):495-499.

(上接第13页)

最后,通过构建 AFS 系统逻辑的实例来验证方法的可用性。本文只是对于 AGENT 化元件以及元件对系统的影响做了初步描述,之后还需对其进行更为深入的研究。

参考文献

- [1] 谷德权,李荣清,杨世伟. 基于混合系统的飞机控制系统建模和分析[J]. 系统仿真学报,2008, 20(s2):317-322,340.
- [2] 杨伟丽. 基于 ISM 有向图的求可达矩阵的简洁算法[D]. 厦门:厦门大学,2007.
- [3] 南松辉,关永,姜楠,等. 基于可达矩阵的组件化空间任务仿真系统体系结构优化问题研究[J]. 军事运筹与系统工程,2011,25(2):64-68.
- [4] 安金霞,朱纪洪,王国庆,等. 多余度飞控计算机系统分级组合可靠性建模方法[J]. 航空学报,2010,31(2):302-309.
- [5] LANUS M, YIN L, TRIVEDI K S. Hierarchical composition and aggregation of state-based availability and performance models [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2003, 52(1):44-52.
- [6] YEH Y C B. Triple-triple redundant 777 primary flight computer [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Applications Conference, 1996:293-307.

- [7] 杨菊平,董妍,程俊强. 民机飞控计算机冗余设计及可靠性分析[J]. 计算机技术与发展,2014,24(6):211-214.
- [8] DONG P P, ZHAO M R, LIU B W, et al. A new method of computing the reachability matrix of directed graph [C]//The Second International Workshop on Education Technology and Computer Science (ETCS), 2010:774-776.
- [9] WANG X, GAO C Y, ZHANG Q. Reachability matrix-based path computation using matrix self-multiplication [C]//The 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2013:1-3.
- [10] 刘家学,郭瑾. 基于弱定义 Agent 的补充勤务维修行为建模[J]. 中国民航大学学报,2015,33(3):28-31.
- [11] 焦玉民,王强,徐婷,等. 智能虚拟维修环境多 Agent 协作机制[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(6):1348-1352.
- [12] 王亚康,郭晶,江汀,等. 基于 Agent 的复杂系统建模与仿真研究[J]. 电子设计工程,2011,19(9):100-103.
- [13] 廖守亿,陈坚,陆宏伟,等. 基于 Agent 的建模与仿真概述[J]. 计算机仿真,2008,25(12):1-7.
- [14] 谭同超. 有限状态机及其应用[D]. 广州:华南理工大学,2013.
- [15] A320 aircraft maintenance manual [Z]. China Eastern Airline, REVISION NO. 30, Aug 01/05.