

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012
Vol.17 No.

4

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年4月 第17卷 第4期(总第192期)

目次

综述

图像分割中的模糊聚类方法 李旭超, 刘海宽, 王飞, 白春艳(447)

图像处理和编码

GPU 辅助的希尔伯特变换轮廓术 周波, 赵小敏, 王东平(459)

引入连续性强度和置信度因子的快速图像修复 李开宇, 孙玉刚(465)

自适应的有效非局部图像滤波 许光宇, 檀结庆, 钟金琴(471)

改进的 PMD 距离图像超分辨率重建算法 张旭东, 沈玉亮, 胡良梅, 陈菁菁(480)

压缩感知在 Micro-CT 图像超分辨率重建中的应用 王丽艳, 韦志辉, 罗守华, 顾宁(487)

对偶四元数单片空间后方交会算法 姬亭, 盛庆红, 王惠南, 刘微微(494)

利用运动强度判据的高效自适应运动估计算法 郭晓珉, 姚睿, 刘智跃, 王友仁(504)

图像分析和识别

核空间散度阈值法 吴成茂(512)

近邻自适应局部尺度的谱聚类算法 孔万增, 孙昌思核, 张建海, 胡三清, 杨灿(523)

LUV 色彩空间中多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法 刘雅蓉, 汪西莉(530)

结合图像增强的心血管内超声中-外膜边缘检测 邱璇, 黄靖, 杨丰, 邢栋, 涂圣贤(537)

融合图像特征的一致点匹配方法及其应用 张久楼, 李春丽, 冯前进, 陈武凡, 阳维(546)

图像理解和计算机视觉

多蚁群动态协作优化的道路图像分割算法 林丽莉, 周文晖(553)

篮球比赛视频中持球队员行为预测	王千,夏利民,谭论正(560)
利用 Principal Warps 评估颅面几何相似度	朱新懿,耿国华,温超(568)

计算机图形学

图形处理器空间插值并行算法的实现	赵艳伟,程振林,董慧,方金云(575)
------------------------	---------------------

虚拟现实与增强现实

面向 GPU 的批 LOD 地形实时绘制	张兵强,张立民,张建廷(582)
----------------------------	------------------

遥感图像处理

光学遥感舰船目标识别方法	杜春,孙即祥,李智勇,滕书华(589)
自适应超完备字典学习的 SAR 图像降噪	杨萌,张弓(596)

第 18 届中国遥感大会征文通知	封 2
第 33 届亚洲遥感会议征文通知	封 2

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 4 期

2012 年 4 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
 中国图象图形学学会
 北京应用物理与计算数学研究所
主 编 李小文
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
 北京 9718 信箱 邮编 100101
 电子信箱:jig@irsa. ac. cn
 电话:010-68407995 010-82614429
 网 址:www. cijg. cn
印刷装订 北京北林印刷厂
广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
 (中国国际书店)
 (北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
 CAS China Society of Image and Graphics
 Institute of Applied Physics and Computational
 Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
 of Journal of Image and Graphics
 (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
 E-mail: jig@irsa. ac. cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
 and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
 (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

第 18 届中国遥感大会征文通知

“第 18 届中国遥感大会”将于 2012 年 10 月 19 日-23 日在武汉召开。本届会议由中国遥感委员会主办,中国测绘学会摄影测量与遥感专业委员会和武汉大学承办。会议将围绕“遥感—全方位的社会服务”这一宗旨,以遥感学界院士与知名专家的特邀报告,分会场专题技术交流与技术讲座,重点项目研讨汇报、技术展览,新技术与新产品发布,专业委员会理事会等多种形式开展,同时举行“第 7 届中国青年遥感辩论会”和“第 2 届全国高分辨率遥感数据处理与应用研讨会”。

会议将全方位地展示遥感(RS)、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)等方面的最新成果,为专家、学者和政府主管部门搭建联系纽带,为研发和用户提供技术交流平台,共同促进遥感科技的发展、遥感产业化的推进和大遥感体系的建立。

本届会议围绕大会主题将就遥感新理论、技术、方法和应用进行征文,范围包含但不限于以下方面:

- 1) 国家遥感中长期发展战略、国际遥感前沿与进展;
- 2) 航天、航空、低空、地面遥感技术及系统;
- 3) 光学、红外、高光谱及激光遥感技术;
- 4) 主、被动微波及雷达遥感技术;

- 5) 数字摄影测量与制图;
- 6) 高分辨率遥感数据处理与应用;
- 7) 地理空间数据处理技术与方法;
- 8) 地理国情监测(土地、农业、林业、矿产、环境、地质及水资源等);
- 9) 海洋、气象与全球变化;
- 10) 遥感、地理信息系统与导航定位系统(3S)集成与应用;
- 11) 智慧城市与数字地球;
- 12) 深空探测与行星测绘;
- 13) 教育、培训与社会公益事业。

征文采用在线方式投稿;

投稿要求:论文内容不涉密,且未在国内外学术刊物或正式学术会议上发表过;被录用的全文将收入大会论文集(送 ISTP 检索),并精选 70~90 篇口头报告论文编辑出版英文 SPIE 会议文集;大会将评选青年优秀论文(参加口头报告),论文将直接进入英文 SPIE 会议文集。

论文摘要截止日期为 2012 年 5 月 15 日,全文截稿日期为 2012 年 6 月 15 日。

会议相关信息,请查阅会议网址:<http://rsgis.whu.edu.cn/18ccrs/index.html>

“第 18 届中国遥感大会”组委会

第 33 届亚洲遥感会议征文通知

“第 33 届亚洲遥感会议”将由泰国地理信息和空间技术发展局(GISTDA)、科技部(MOST)和亚洲遥感协会(AARS)联合主办,于 2012 年 11 月 26-30 日,在泰国芭堤雅市宗滴恩酒店举行。这是亚洲遥感协会每年一届的系列学术会议。本届大会征文包括传感器与平台、算法和图像处理、GIS 与 Web GIS、全球导航卫星系统、灾害、自然资源、环境科学、教育和宣传、健康科学、制图、其他等方面。

会议重要日期:

论文摘要提交截止:2012 年 5 月 15 日;
论文接收通知:2012 年 7 月 1 日;
论文全文提交截止:2012 年 9 月 30 日;
网上注册截止:2012 年 10 月 26 日;
会议召开日期:2012 年 11 月 26-30 日。
会议还将组织学生专场和技术展览,其他信息请访问会议网站:<http://acrs2012.gistda.or.th>

与往年一样,中国遥感委员会仍将鼓励中国遥感科研人员和企事业单位参加会议,并组团参加学术交流和会议展览。

中国遥感委员会

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 4 April 2012

Contents

Review

The survey of fuzzy clustering method for image segmentation Li Xuchao, Liu Haikuan, Wang Fei, Bai Chunyan (447)

Image Processing and Coding

GPU assisted Hilbert transform profilometry Zhou Bo, Zhao Xiaomin, Wang Dongping (459)

Fast image inpainting algorithm introducing continuous strength and confidence factor Li Kaiyu, Sun Yugang (465)

Adaptive efficient non-local image filtering Xu Guangyu, Tan Jieqing, Zhong Jinqin (471)

Improved super-resolution reconstruction algorithm for PMD range image
..... Zhang Xudong, Shen Yuliang, Hu Liangmei, Chen Jingjing (480)

Image superreconstruction for Micro-CT based on compressed sensing Wang Liyan, Wei Zhihui, Luo Shouhua, Gu Ning (487)

Dual quaternion of space resection with single-image Ji Ting, Sheng Qinghong, Wang Huinan, Liu Weiwei (494)

Efficient adaptive motion estimation algorithm based on motion intensity Guo Xiaomin, Yao Rui, Liu Zhiyue, Wang Youren (504)

Image Analysis and Recognition

Divergence thresholding method in kernel space Wu Chengmao (512)

Spectral clustering based on neighboring adaptive local scale
..... Kong Wanzeng, Sun Changsihe, Zhang Jianhai, Hu Sanqing, Yang Can (523)

Adaptive spectral clustering algorithm based on Nyström method with multi-level structure in LUV color space
..... Liu Yarong, Wang Xili (530)

Image enhancement based media-adventitia border detection in intravascular ultrasound images
..... Qiu Xuan, Huang Jing, Yang Feng, Xing Dong, Tu Shengxian (537)

Coherent point drift registration combined with image feature and its application
..... Zhang Jiulou, Li Chunli, Feng Qianjin, Chen Wufan, Yang Wei (546)

Image Understanding and Computer Vision

Dynamic multi-colony ant cooperative optimization schemes for road image segmentation
..... Lin Lili, Zhou Wenhui (553)

Behavior prediction of ball carriers in basketball match videos Wang Qian, Xia Limin, Tan Lunzheng (560)

Estimate of craniofacial geometry shape similarity based on principal warps
..... Zhu Xinyi, Geng Guohua, Wen Chao (568)

Computer Graphics

Realization of GPU parallel spatial interpolation method
..... Zhao Yanwei, Cheng Zhenlin, Dong Hui, Fang Jinyun (575)

Virtual Reality and Augmented Reality

GPU-based real-time terrain rendering algorithm using batched LOD
..... Zhang Bingqiang, Zhang Limin, Zhang Jianting (582)

Remote Sensing Image Processing

Method for ship recognition using optical remote sensing data
..... Du Chun, Sun Jixiang, Li Zhiyong, Teng Shuhua (589)

SAR images de-speckling algorithm via an adaptive over-complete learning dictionary
..... Yang Meng, Zhang Gong (596)

中图法分类号: TP911.73 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)04-0553-07

论文引用格式: 林丽莉, 周文晖. 多蚁群动态协作优化的道路图像分割算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 553-559

多蚁群动态协作优化的道路图像分割算法

林丽莉¹, 周文晖²

1. 浙江工商大学信息与电子工程学院, 杭州 310018; 2. 杭州电子科技大学计算机学院, 杭州 310018

摘要: 2维图像的道路检测是移动机器人视觉导航中的难点问题。基于图像分割问题的能量最小化函数, 推导出一种适用于群集优化迭代求解的视觉能量最小化模型, 并提出一种基于多蚁群动态协作的优化策略, 实现道路图像检测的优化算法。该方法根据“分而治之”的原则, 先由各蚁群独立优化各自子问题, 然后针对约束条件动态变化的特点采用一种新的动态自适应信息交换策略, 实现一种近似全局最优的2维道路图像检测。与基于 Graph Cut 的道路图像检测算法相比, 动态多蚁群协作优化算法不仅具有更好的检测性能, 并且可实现任意类数的检测, 适用于包含多种类型的复杂道路场景。

关键词: 道路检测; 图像分割; 多蚁群算法; 能量最小化

Dynamic multi-colony ant cooperative optimization schemes for road image segmentation

Lin Lili¹, Zhou Wenhui²

1. College of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

2. College of Computer and Software, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Road detection of 2-dimension images is a key problem in vision navigation of mobile robots. Based on the energy minimization function of image segmentation, a new vision energy minimization model is derived which can be solved conveniently by the iterative optimization of swarm intelligence. And a multi-colony ant based dynamic cooperation optimization strategy is proposed to implement the optimized road detection. According to the divide-and-conquer principle, each colony optimizes a sub-problem independently. Then, a set of information exchange strategies are proposed for adaptive dynamic cooperation between neighboring colonies to realize the global optimization of road detection. Compared with the Graph cut based road detection method, the proposed dynamic multi-colony ant cooperative optimization method not only has better detection performance, but also can detect arbitrary number of clusters. It can be applied to detect complex road scenes that obtain multiple types of road.

Key words: road detection; image segmentation; multi-colony ant algorithm; energy minimization

0 引言

2维图像的道路检测和跟踪是移动机器人视觉导航中的关键任务。由于道路环境的复杂性, 图像

表示的模糊性, 道路检测和跟踪仍然是个极具挑战性的难点问题。基于图像分割的道路检测和跟踪方法因其内在的统计特性, 使其对单像素表示的歧义性、边缘模糊、噪声等具有一定的鲁棒性, 受到国内外研究人员的广泛关注^[1]。

收稿日期: 2011-07-20; 修回日期: 2011-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(60902077, 61102146); 浙江省自然科学基金项目(Y1091074)

第一作者简介: 林丽莉(1976—), 女, 副教授, 2005年于浙江大学获通信与信息系统专业博士学位, 主要研究方向为信号检测、图像处理、计算机视觉。E-mail: sunshine@hzncnc.com

图像分割属于早期视觉问题,该问题总是可以写成 MAP-MRF 框架下的能量函数最小化形式。采用能量函数的优点在于可以很容易地加入一些约束。通过求解能量函数最小可获得具有全局最优的分割性能,但最小化该能量函数仍然是一个 NP 难问题。Graph Cuts^[2-3]是当前较为流行的求解该能量函数的有效方法之一,许多 Graph Cuts 快速实现和优化的方法也相继提出^[4-5]。但基于 Graph Cuts 的分割方法通常只适用于“目标”和“背景”的二值划分,对于存在复杂且多样的实际道路场景,该方法往往无法获得令人满意的性能。

近年来,蚁群优化(ACO)^[6-7]成为人工智能中的新热点,其思想源于蚂蚁觅食行为,尽管蚂蚁个体非常简单,但却表现出令人惊讶的社会群体行为。由于个体行为间相互独立,因此蚁群优化算法适用于并行操作。已证实蚁群优化适合于求解各类复杂的优化问题,特别是在求解旅行商问题(TSP)上 ACO 算法表现出很高的效率。基于蚁群优化的图像分割算法也有提出^[8-9]。但这些都是静态优化问题,即问题的约束条件不会随时间而变化。

2 维道路图像分割的能量最小化问题具有高维、解空间结构复杂,以及约束条件动态变化等特点。本文针对该能量函数最小化求解问题,提出一种基于多蚁群动态协作的优化策略。根据“分而治之”原则,首先将能量函数分解为多个子问题,每个蚁群独立优化一个子问题;然后针对约束条件动态变化的特点采用一种新的动态自适应信息交换策略,实现一种近似全局最优的 2 维道路图像检测。实验结果表明,该方法不仅具有良好的性能,且适用于复杂道路场景。

1 相关工作

1.1 图像分割问题的能量函数最小化表示

图像分割问题可描述为对图像各像素的标记过程。令 $f = (f_1, \dots, f_p, \dots)$ 为一组二进制矢量,其中 f_p 为像素 p 的标号,其取值为“路”或“非路”,则称矢量 f 定义了一次划分。因此,可将分割问题转换为求解以马尔可夫随机场形式表现的能量函数最小化问题^[2-3]。标准能量函数 $E(f)$ 可用数据项和平滑项表示为

$$E(f) = \lambda \cdot \sum_{p \in P} R_p(f_p) + \sum_{p, q \in N} B_{p, q} \cdot \delta(f_p, f_q) \quad (1)$$

式中, $\delta(f_p, f_q) = \begin{cases} 1 & f_p \neq f_q \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$, $R_p(\cdot)$ 表现为区域特性,它是将像素 p 划分为“路”或“非路”的代价,即像素 p 的亮度或色彩与已知的道路或非路模型间的相配程度。 $B_{p, q}$ 则表现为边缘特性,即像素 p 和 q 之间亮度或色彩的差异程度,通常简化为像素 p 和 q 间的距离函数。最小化式(1)中的能量函数是个 NP 难问题。

1.2 基于 Graph Cuts 的图像分割算法

Graph Cuts 算法可有效求解式(1)中的能量函数最小化问题^[2-3]。根据式(1)构建图 $G = [V, E]$,其中节点集 V 由像素集 P 和两个附加顶点 s (“路”)和 t (“非路”)组成。而 E 则包含两类无向边,即相邻节点间的 N 类边和与顶点相连的 T 类边。假定一次割切 C 将像素集 P 划分为两个不相交的子集 O 和 B ,它们分别代表着“路”和“非路”,则割切 C 的代价为所有割边的权重和。设像素 p 亮度值为 I_p ,则根据 MAP-MRF 随机场公式可推导出区域项 $R_p(\cdot)$,它是一个非负的对数似然值

$$R_p(\text{"路"}) = -\ln P_r(I_p | O) \quad (2)$$

$$R_p(\text{"非路"}) = -\ln P_r(I_p | B)$$

当像素 p 和 q 相似度高时,边缘项 $B_{p, q}$ 的值较大;反之, $B_{p, q}$ 的值较小。即

$$B_{p, q} \propto \exp\left(-\frac{(I_p - I_q)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \frac{1}{\text{dist}(p, q)} \quad (3)$$

2 视觉能量迭代最小化模型

根据“分而治之”原则,将式(1)中的能量最小化问题分解成若干个子问题,以便各自独立优化。然而,由于视觉问题的高度复杂性以及约束条件的多样性,难以将视觉能量函数分解为多个无重复变量的独立子问题之和。具体而言,令 $E_i(f_i)$ 表示第 i 个子问题,它所包含的变量子集为 f_i 。令 $E_{ij}(f_i, f_j)$ 为第 i 和第 j 个子问题间的交互项。则式(1)中的能量函数可写为

$$\min_f \{E(f)\} = \sum_i \min_{f_i} \{E_i(f_i)\} + \sum_i \sum_{j \neq i} \min_{f_i, f_j} \{E_{i, j}(f_i, f_j)\} \quad (4)$$

式(4)很难直接分割为各个独立的子问题。因此我们通过引入状态变量,采用如下式所示的近似连续公式

$$\min_f \{E(f, t)\} \approx \sum_i \min_{f_i} \{E'_i(f_i, t)\} \quad (5)$$

式中, $E'_i(f_i, t) = \min_{f_i} \{E_i(f_i) + E_i(f_i, s_j(t - \Delta t))\}$ 为 t 时刻第 i 个独立子问题, 而 $s_j(t - \Delta t) = \min_{f_j} \{E'_j(f_j, t - \Delta t)\}$ 为 $t - \Delta t$ 时刻第 j 个独立子问题的状态, 是 f_j 在 $t - \Delta t$ 时刻的优化结果, 并且在 t 时刻可认为是常数。 $E'_j(f_j, t - \Delta t)$ 可看做是第 i 个独立子问题在 t 时刻的约束。显然, 若 $\Delta t \rightarrow 0$ 且 $t \rightarrow \infty$, 则式(4)和式(5)等价。式(5)的离散形式为

$$\min_f \{E(f, k)\} \approx \sum_i \min_{f_i} \{E'_i(f_i, k)\} \quad (6)$$

式中, $E'_i(f_i, k) = \min_{f_i} \{E_i(f_i) + E_i(f_i, s_j(k - 1))\}$, $s_j(k - 1) = \min_{f_j} \{E'_j(f_j, k - 1)\}$, k 为迭代次数。

因此, 最小化式(1)中的能量函数可通过迭代求解式(6)中的子问题 $E'_i(f_i, k)$ 的最小解来实现。并且, 由于交互项的存在使得每次迭代中各子问题的约束条件都是不同的, 即每个子问题的最小化都不是静态优化问题。

图像分割问题的视觉能量函数可按扫描线分解成若干子问题, 每个子问题只处理一条扫描线。即

$$E(f, k) \approx \sum_i E_{l_i}(f_{p \in l_i}, k) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E_{l_i}(f_{p \in l_i}, k) = & \sum_{p \in l_i} R_p(f_p) + \lambda_1 \sum_{p, q \in l_i} B_{p, q}^{intra} \cdot \delta(f_p, f_q) + \\ & \lambda_2 \sum_{j, l \neq j} \left\{ \sum_{m \in l_i, n \in l_j} B_{m, n}^{inter}(f_m, s_n(k - 1)) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $B_{p, q}^{intra}$ 是同一扫描线上相邻像素间的边界项; $B_{m, n}^{inter}$ 是相邻扫描线间的边界项; $s_n(k - 1)$ 是像素 n 在第 $k - 1$ 次迭代中的状态, 在第 k 次迭代中可看做是常数。

3 基于多蚁群动态协作优化模型的道路检测

Stutzle 和 Hoos 在 1996 年提出最大-最小蚂蚁系统, 它是求解组合优化问题的最佳蚁群优化算法之一^[10-11]。其优化算法通常可表示为以下两步迭代过程:

1) 每只蚂蚁根据转移概率选择下一个解分量。第 k 只蚂蚁, 从当前解分量 i 选择目标解 j 的转移概率定义如下

$$P_{ij}^k(t) = \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} \tau_{il}^\alpha(t) \cdot \eta_{il}^\beta} \quad j \in N_i^k \quad (9)$$

式中, η_{ij} 为启发式信息, 它通常与距离成反比。 τ_{ij} 为解分量 i 和 j 之间的信息素轨迹, N_i^k 为可能解集合。 α 和 β 则决定了信息素和启发信息之间的比例关系。

2) 信息素更新。信息素更新包含信息素挥发和堆积。通常的信息素更新规则为

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}(t) \quad (10)$$

式中, ρ 为局部信息素衰减参数, $0 < \rho < 1$ 。 $\Delta\tau_{ij}(t)$ 为当前蚂蚁新释放的信息素。

将最大-最小蚂蚁系统扩展到多蚁群协作优化的关键在于蚁群间信息素的有效交换, 以及相互间的协作策略。在文献[12-13]中, 针对双目立体匹配算法已提出一种有效的多蚁群协作策略。在此基础上, 本文针对 2 维道路图像检测的应用需求, 提出一种适用于道路图像分割的多蚁群动态协作优化方法。受 Middendorf 等人^[14]的启发, 蚁群间不应该交换过多信息, 交换也不应过于频繁。此外由第 2 节可知, 每个蚁群优化的子问题其约束都是不同的, 且问题状态会随着信息交换不断变化, 即每个蚁群所优化的问题是动态的, 因此提出一种动态信息素扩散策略。

1) 只有相邻扫描线上的蚁群才交换信息, 且每 k 次迭代后执行一次信息交换。即在每次信息交换前, 各蚁群应处于一个相对稳定的解。

2) 在每次信息交换过程中, 每个蚁群将自己局部最佳解传送给相邻蚁群。

3) 由于不同蚁群所优化的问题约束条件各不相同, 所以相邻蚁群传播的信息仅具建议性。因此需要加权一个衰减系数 γ , $0 < \gamma < 1$ 。根据这个观点, 此时表述为“信息扩散”要比“信息交换”更恰当。

此外, 随着相邻蚁群间的信息扩散, 问题的约束也随之改变, 这意味着每个蚁群所优化的问题不再是静态的, 而是随着每次的信息扩散动态改变。不过, 我们可以知道问题约束条件何时发生变化。Angus 等人^[15]提出信息素归一化的方法并获得了较好的效果, 他们将城市 i 和 j 间的信息素值 $\tau_{i, j}$ 用

$\frac{\tau_{i, j}}{\tau_{imax}}$ 替换, 其中 τ_{imax} 为连接城市 i 的所有边上的最大信息素值。在我们的算法中, 也采用类似方法, 在完成信息扩散后对信息素归一化。考虑到最大-最小蚂蚁系统的信息素范围, 归一化后还需乘 τ_{imax} 。

多蚁群动态协作优化的实现:

```

(输入图像  $P$ )
INITIAL 多蚁群系统
REPEAT  $M$  次迭代
FOR 每个蚁群(子问题  $i$ ) DO
  START 从源节点  $s$  开始
  FOR 每个像素  $p(p \in i)$  DO
    每个蚂蚁为像素  $p$  选择一个候选标号
    计算此次迭代中每只蚂蚁行过的距离
  END-FOR
  END 在汇节点  $t$ 
  SEEK 迭代中最好的蚂蚁 UPDATE 信息素路径
END-FOR
IF 需要合作 THEN
  通过更新状态项完成蚁群间的信息扩散
END-IF
UNTIL  $M$  次迭代完成

```

4 实验结果与分析

为检验本文提出的基于多蚁群动态协作优化方法的道路检测性能,我们在总长约为 2 km 的实验场上测试算法性能,共采集了约 5 138 帧图像,包含了若干典型类型的室外道路(如半结构化砂石路、半结构化砂石弯路、半结构化砂石路转柏油路、半结构化柏油路等)。随机抽取不同道路类型的图像进行测试,图像分辨率为 320×240 。为便于更直观地比

较本文所提方法与 Graph Cuts 算法的性能,我们不做任何图像滤波等预处理,以及形态学等后处理。采用与 Graph Cuts 相同的数据项和平滑项,具体而言,数据项采用对应像素的亮度差的绝对值,平滑项采用 Potts 模型^[3]。

在 Graph Cuts 中只能假定图像分为“路”、“非路”两类,而我们的方法无此假定限制。在本次实验中,我们提出的方法可以将图像划分为“路”、“非路”、“天空”3类。动态协作的优化策略参数值为 $\lambda_1 = \lambda_2 = 5$ 。蚁群算法参数为 $\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0.9, \gamma = 1, k = 10$,最大-最小蚂蚁系统中信息素范围为 $0.01 \sim 0.9$ 。使用 100 只蚂蚁迭代 300 次。

针对 4 种道路的检测结果显示于图 1—图 4 中。图 1—图 4 中(b) 是 Graph Cuts 算法对 4 种道路图像的检测结果。图 1—图 4 中(c) 是多蚁群动态协作优化算法的检测结果。

将图 1(b)(c) 相比较,可以发现,正如我们所预知的,多蚁群动态协作优化算法可以有效地将图像分割为“路”、“非路”和“天空”3类,而 Graph Cuts 方法只能获得“路”和“非路”的二值检测结果。并且,多蚁群动态协作优化算法的检测结果更接近于实际的道路情形。而 Graph Cuts 方法的检测性能不太理想,尤其是在近处(即图像下半部分)有很大失真。

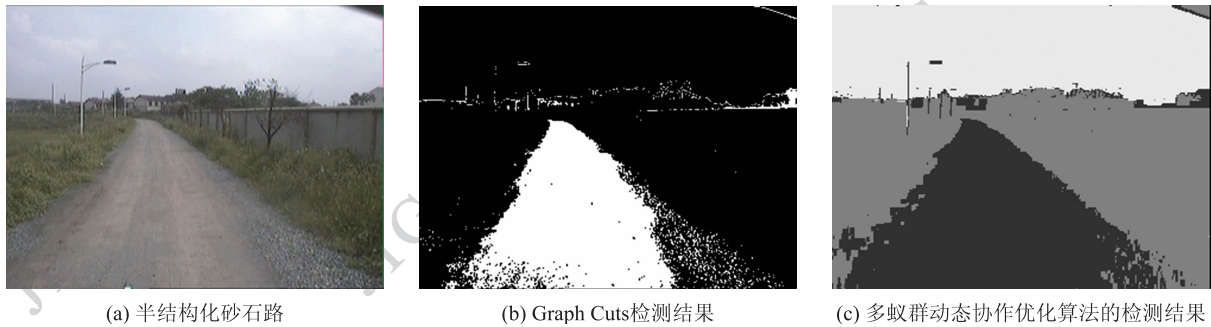
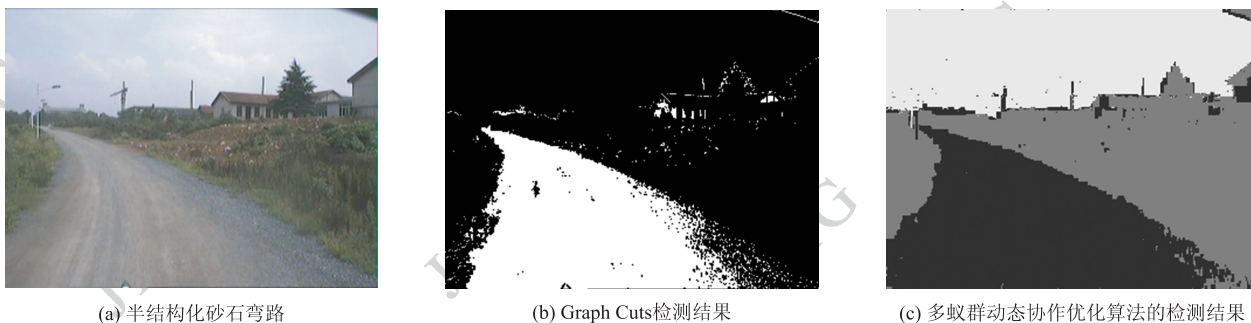


图 1 半结构化砂石路检测结果对比

Fig. 1 Comparison of detection results for semi-structure sandstone road

将图 2(b)(c) 相对比、图 3(b)(c) 相对比、图 4(b)(c) 相对比,均可得出类似结论。并且多蚁群动态协作优化算法的优势在图 3(b)(c)、图 4(b)(c) 这两组对比中表现得更为突出。具体来说,图 3 中同时包含了 2 种不同类型道路的交汇,由于 Graph Cuts 算法对颜色/亮度差异敏感,因此

在道路交汇处出现错误分割,如图 3(b) 所示。而图 3(c) 表明所提方法能有效克服该问题,具有较好的鲁棒性。同样,图 4(c) 中道路主干右侧的小块区域也被划分到道路类中,也说明这点。因为右侧的小块区域也可看做是一个新类型的道路路口的开始。



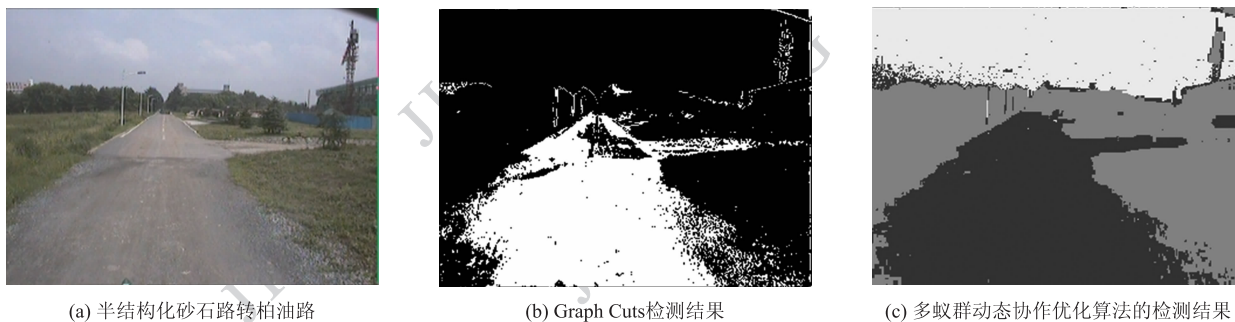
(a) 半结构化砂石弯路

(b) Graph Cuts检测结果

(c) 多蚁群动态协作优化算法的检测结果

图2 半结构化砂石弯路检测结果对比

Fig. 2 Comparison of detection results for semi-structure crooked sandstone road



(a) 半结构化砂石路转柏油路

(b) Graph Cuts检测结果

(c) 多蚁群动态协作优化算法的检测结果

图3 半结构化砂石路转柏油路检测结果对比

Fig. 3 Comparison of detection results for semi-structure sandstone and blacktop road



(a) 半结构柏油路

(b) Graph Cuts检测结果

(c) 多蚁群动态协作优化算法的检测结果

图4 半结构柏油路检测结果对比

Fig. 4 Comparison of detection results for semi-structure blacktop road

实验结果表明,多蚁群动态协作优化算法的检测性能明显优于 Graph Cut 算法。多蚁群动态协作优化方法可以实现任意类数的检测,而 Graph Cuts 方法只能获得二值检测结果。更重要的是,多蚁群动态协作优化算法更鲁棒,检测结果更准确。尤其是在存在复杂且多样的实际道路场景(多种类型道

路交汇)下,具有较好的分割结果。

图5为多蚁群动态协作优化算法在道路检测过程中的代价曲线。从图5中的4条曲线可以看出:通常在约40次迭代后,曲线趋于平稳。这表明所提的多蚁群动态协作优化算法具有良好、快速的收敛特性。

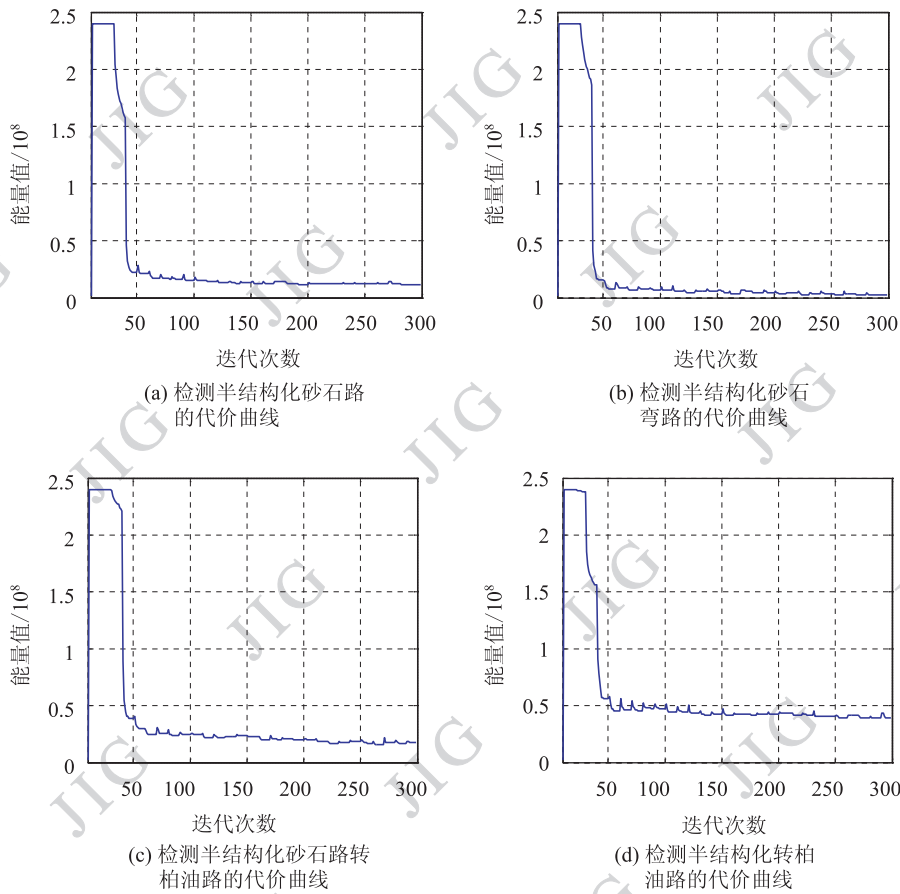


图 5 4 种道路检测的代价曲线

Fig. 5 Detection cost curves of four types of road

5 结 论

基于 2 维图像的道路检测是自主移动机器人视觉导航中的关键任务,并且是目前相关领域的研究热点。

本文基于图像分割问题的能量最小化函数,推导出一种适用于群集优化的视觉能量最小化迭代求解模型,并提出一种基于多蚁群动态协作的优化策略,实现 2 维图像道路检测的优化算法。在多蚁群动态协作的优化策略中,针对约束条件动态变化的特点,提出一种新的自适应动态信息交换策略,实现近似全局最优的 2 维道路图像检测。

与 Graph Cuts 算法结果相比,本文提出的方法具有良好的检测性能,且适用于复杂道路场景。未来工作将主要集中于定量分析,以及多蚁群参数对系统性能的影响及其误差分析。

参考文献 (References)

[1] Zhou W H, Lin L L, Wu E Y. Novel robust and self-adaptive road following algorithm based on graph cuts and clustering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2366-2371. [周文晖,林丽莉,武二永.融合图切割和聚类算法的鲁棒自适应道路跟踪[J].仪器仪表学报,2009,30(11):2366-2371.]

[2] Kumar M P, Torr P H S, Zisserman A. OBJ CUT [C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway. United States: IEEE Computer Society, 2005: 18-25.

[3] Kolmogorov V, Zabih R. What energy functions can be minimized via graph cuts [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(2):147-159.

[4] Han S D, Zhao Y, Tao W B, et al. Gaussian super-pixel based fast image segmentation using graph cuts [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(1): 11-20. [韩守东,赵勇,陶文兵,等.基于高斯超像素的快速 Graph Cuts 图像分割方法[J].自动化学报,2011,37(1):11-20.]

- [5] Jiang J G, Guo Y R, Hao S J, et al. Graph cuts segmentation based on Bayesian nonparametric estimation [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16 (6) : 947-952. [蒋建国, 郭艳蓉, 郝世杰, 等. 贝叶斯框架下的非参数估计 Graph Cuts 分割算法 [J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16 (6) : 947-952.]
- [6] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, 1996, 26(1) : 29-41.
- [7] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the travelling salesman problem [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1) : 53-66.
- [8] Han Y F, Shi P F. An improved ant colony algorithm for fuzzy clustering in image segmentation [J]. *Neurocomputing*, 2007, 70(4-6) : 665-671.
- [9] Cao H Z, Huang P, Luo S Q. A novel image segmentation algorithm based on artificial ant colonies [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2008, 4987 : 63-71.
- [10] Stutzle T, Hoos H. The max-min ant system and local search for the traveling salesman problem [C] // *Proceedings of International Conference on Evolutionary Computation*. Piscataway, United States: IEEE, 1997 : 309-314.
- [11] Stutzle T, Hoos H. Improvements on the ant system; Introducing the max-min ant system [C] // *Proceedings of Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms*. New York: Springer Verlag, 1998 : 245-249.
- [12] Zhou W H, Lin L L, Gu W K. A swarm optimization model for energy minimization problem of early vision [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 4233 : 1128-1137.
- [13] Zhou W H, Lin L L. A dynamic cooperative swarm optimization model for MRF-Based early vision problem [C] // *Proceedings of Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and Systems*. Piscataway, United States: IEEE Computer Society, 2009 : 730-734.
- [14] Middendorf M, Reischle F, Schmeck H. Multi colony ant algorithms [J]. *Journal of Heuristics*, 2002, 8(3) : 305-320.
- [15] Angus D, Hendtlass T. Dynamic ant colony optimisation [J]. *Applied Intelligence*, 2005, 23(1) : 33-38.