



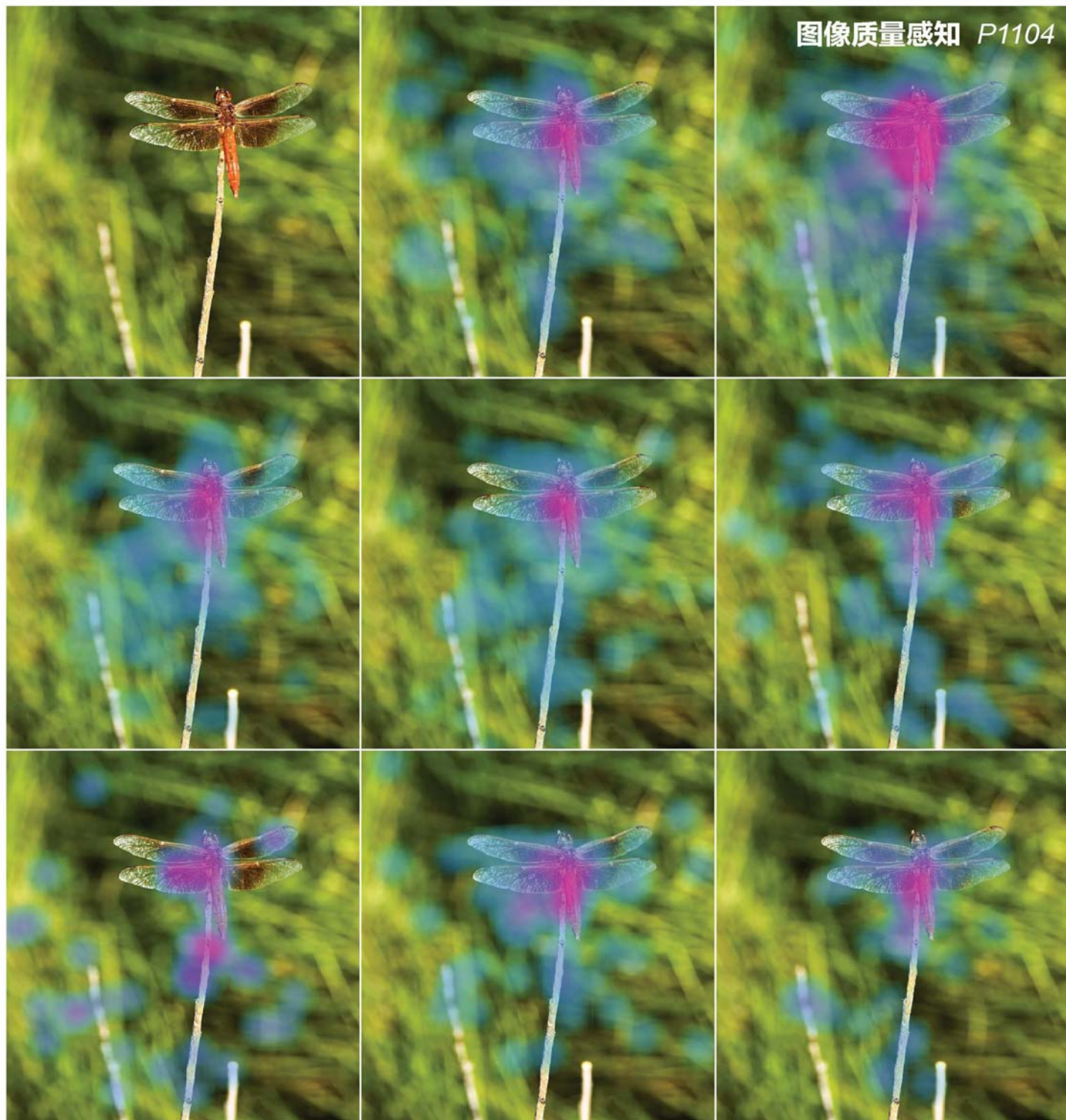
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

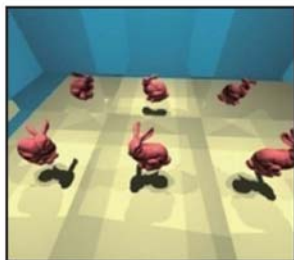
2014
07
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



多特征融合的图像自动变形
(第1012页)

多通道Haar-like特征多示例学习目标跟踪(第1038页)

快速虚顶点光子映射的焦散
绘制(第1062页)

综述

打印机光谱特性化方法研究综述

万晓霞, 刘强 0985

图像处理和编码

图像场方向导数的局部区域重建

叶学义, 齐珍珍, 何志伟, 李汪兵 0998

Lytro相机的光场图像校正与重对焦方法

周文晖, 林丽莉 1006

多特征融合的图像自动变形

肖红光, 肖树根, 刘京, 李淳芃, 陈立福 1012

结合频谱扩散的指纹图像滤波增强

卞维新, 封举富, 罗永龙, 徐德琴 1021

图像分析和识别

中心投影变换的抗噪性分析

黄永东, 李三三, 杨建伟 1031

多通道Haar-like特征多示例学习目标跟踪

宁纪锋, 赵耀博, 石武祯 1038

自主移动机器人自适应室外道路检测

杜明芳, 王军政, 李静, 崔广涛, 方建军, 曹海青 1046

分层树结构字典编码的行为识别

周同驰, 程旭, 吴镇扬 1054

计算机图形学

快速虚顶点光子映射的焦散绘制

李瑞瑞, 秦开怀 1062

双重视图下的3维网格模型可见水印

陆尘, 朱长青, 王玉海 1068

虚拟现实与增强现实

个性化编辑的轻量化3维树木模型构建

董天阳, 纪磊, 刘思远, 范菁, 熊丽荣 1074

遥感图像处理

带距离徙动校正的压缩感知PFA成像方法

段化军, 朱岱寅 1085

结合边缘和区域的活动轮廓模型SAR图像目标轮廓提取

王沛, 周鑫, 彭荣鲲, 符鹏 1095

第2届全国图像图形联合学术会议专栏

视线跟踪技术的图像质量主观数据库构建及其可视化

张昀, 牟轩沁 1104

丰富图像标签的正则化非负矩阵分解方法

夏召强, 冯晓毅, 彭进业 1112

CONTENTS

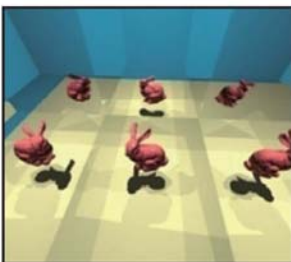
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Multi-feature fusion-based image morphing(P1012)



Multiple instance learning based object tracking with multi-channel Haar-like feature(P1038)



Fast caustics rendering by photon beam tracing based on virtual vertex transformations(P1062)

Review

- Review of spectral printer characterization
Wan Xiaoxia, Liu Qiang 0985

Image Processing and Coding

- Reconstructing image local regions based on directional derivative of a field
Ye Xueyi, Qi Zhenzhen, He Zhiwei, Li Wangbing 0998
- Light field image rectification and refocus method for Lytro camera
Zhou Wenhui, Lin Lili 1006
- Multi-feature fusion-based image morphing
Xiao Hongguang, Xiao Shugen, Liu Jing, Li Chunpeng, Chen Lifu 1012
- The fingerprint enhancement using filtering combined with spectrum diffusion
Bian Weixin, Feng Jufu, Luo Yonglong, Xu Deqin 1021

Image Analysis and Recognition

- Robustness to noise of central projection transformation
Huang Yongdong, Li Sansan, Yang Jianwei 1031
- Multiple instance learning based object tracking with multi-channel Haar-like feature
Ning Jifeng, Zhao Yaobo, Shi Wuzhen 1038
- Adaptive outdoor road detection for autonomous mobile robot
Du Mingfang, Wang Junzheng, Li Jing, Cui Guangtao, Fang Jianjun, Cao Haiqing 1046
- Action recognition using hierarchically tree-structured dictionary encoding
Zhou Tongchi, Cheng Xu, Wu Zhenyang 1054

Computer Graphics

- Fast caustics rendering by photon beam tracing based on virtual vertex transformations
Li Ruirui, Qin Kaihuai 1062
- Visible watermarking for three-dimensional mesh model in two views
Lu Chen, Zhu Changqing, Wang Yuhai 1068

Virtual Reality and Augmented Reality

- Construction of lightweight three-dimensional tree models supporting personalization editing
Dong Tianyang, Ji Lei, Liu Siyuan, Fan Jing, Xiong Lirong 1074

Remote Sensing Image Processing

- PFA imaging with range migration correction by compressive sensing
Duan Huajun, Zhu Daiyin 1085
- Active contour model based on edge and region attributes for target contour extraction in SAR image
Wang Pei, Zhou Xin, Peng Rongkun, Fu Peng 1095

Column of UCIG'2013

- Eye tracking based image quality assessment database and visualization method
Zhang Yun, Mou Xuanqin 1104
- Regularized non-negative matrix factorization method for image tag enrichment
Xia Zhaoqiang, Feng Xiaoyi, Peng Jinye 1112

中图法分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)07-1046-08

论文引用格式: Du M F, Wang J Z, Li J, Cui G T, Fang J J, Cao H Q. Adaptive outdoor road detection for autonomous mobile robot[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(7): 1046-1053. [杜明芳, 王军政, 李静, 崔广涛, 方建军, 曹海青. 自主移动机器人自适应室外道路检测[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(7): 1046-1053.] [DOI:10.11834/jig.20140708]

自主移动机器人自适应室外道路检测

杜明芳^{1,2}, 王军政¹, 李静¹, 崔广涛¹, 方建军², 曹海青¹

1. 北京理工大学复杂系统智能控制与决策国家重点实验室, 北京 100081; 2. 北京联合大学自动化学院, 北京 100101

摘要: 目的 为降低室外自主移动机器人视觉导航中遇到的阴影、裂纹及道路边界不规则造成的道路检测算法不鲁棒性, 提出一种每帧灰度阈值可调的快速自适应道路检测方法。方法 先采用2维离散小波进行道路图像分解与重构, 比较各级小波重构后的近似道路图像, 确定出不影响“路—非路”灰度二分类的最佳分辨率等级; 在低分辨率尺度空间中, 用灰度类间最大方差和类内最小方差共同构造适应度函数, 采用改进的遗传算法对各帧道路图像进行阈值自适应分割, 找到准确的道路边界, 最近两边界中心位置即机器人行驶方向。采用小型陆地自主车作为研究平台, 并在卡耐基梅隆大学(CMU)提供的室外移动机器人道路视频中进行算法测试。结果 本文方法能够在具有阴影、裂纹、光照度变化的道路条件下鲁棒分割出道路边界, 机器人可以平均30 km/h的速度在有较严重阴影干扰的校园道路上行驶, 视觉系统的处理速度平均可达到20 ms/帧。结论 本文方法比传统的灰度直方图分割法表现出更强的环境自适应性, 可实现较为鲁棒的室外道路检测, 并可作为室外自主移动机器人非结构化道路检测的一种鲁棒性较强的方法加以推广。

关键词: 自主移动机器人; 小波压缩; 遗传算法; 自适应道路检测

Adaptive outdoor road detection for autonomous mobile robot

Du Mingfang^{1,2}, Wang Junzheng¹, Li Jing¹, Cui Guangtao¹, Fang Jianjun², Cao Haiqing¹

1. Key Laboratory of Complex System Intelligent Control and Decision of China, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
 2. College of Automation, Beijing Union University, Beijing 100101, China

Abstract: **Objective** In process of outdoor autonomous mobile robot visual navigation, shadows, causing cracks and irregular road boundary are encountered, which make the detection algorithms not so robust. The objectives of this paper are to resolve these problems. **Method** The proposed method in this paper is called a fast adaptive road detection method evolving adjustable gray thresholds per frame. First, a two-dimensional discrete wavelet analysis is used for road image decomposition and reconstruction. After comparing the approximate wavelet reconstruction of the road image in multiple-levels, a best resolution grade is determined which does not affect the “road-non-road” classification. In the best scale space, the grayscale maximum variance between-class and minimum variance within-class are used to create a fitness function, and the improved genetic algorithm is used in road image segmentation with each frame having an adaptive grayscale segmentation threshold. After that, the accurate road boundary is found, and if using the nearest two boundaries to calculate the central position of the road, the robot can know its driving directions. Content of main experiments: In this paper, a small auto-

收稿日期: 2013-07-08; 修回日期: 2013-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(61103157); 北京市学术创新团队项目(PHR201107149); 北京市教委科技计划面上项目(SQKM201311417010)

第一作者简介: 杜明芳(1976—), 女, 副教授, 现为北京理工大学控制科学与工程专业博士研究生, 主要研究方向为自主移动机器人环境感知与控制。E-mail: 1314310@163.com

通信作者: 王军政, E-mail: wangjz@bit.edu.cn

mous land vehicle is used as a research platform, and the algorithm is tested by the outdoor path driving video of a mobile robot provided by CMU. **Result** The experimental results show that this method can detect the boundaries robustly under varying road conditions including shadows, cracks, and illumination changes. The real-time performance of the road detection system is good. The robot with this algorithm can run at a speed of 30 km/h on the school road covered with shadows, and the process rate of the vision system can reach to 20 ms per frame. Comparisons with reviewed researches: This segmentation method showed stronger self-adaptability to the environment than the traditional gray level histogram based segmentation method. **Conclusion** A robust detection for the outdoor road is realized by the method of this paper. The proposed method in this paper can be seen as a robust method to the outdoor autonomous mobile robot's unstructured road detection, and should be extended.

Key words: autonomous mobile robot; wavelet compression; genetic algorithms; adaptive road detection

0 引言

近年来,室外自主移动机器人利用视觉进行环境感知成为机器人领域的研究热点之一。室外光照度变化大、气候条件多变、机器人的可通行区域不规则等不确定性为室外移动机器人的视觉导航带来诸多富有挑战性的难题。室外移动机器人在运动过程中采集到的是一个图像序列,将2维平面空间的计算问题延伸为3维空间中的计算问题,因此传统静态图像处理和分析的算法并不完全适用于移动机器人视觉导航系统。目前,室外移动机器人视觉环境感知中遇到的主要问题集中体现在感知算法的实时性和鲁棒性仍不能完全满足机器人大范围移动的需求,机器人对环境的自适应性不强。

以往对室外自主移动机器人道路环境检测的研究基本是沿着结构化道路和非结构化道路两条路线展开的。在非结构化道路检测方面, Pedro 等人^[1-2]提出采用视觉显著性特征对自然道路进行跟踪的方法,取得了鲁棒的跟踪结果。Mohan 等人^[3-4]提出通过颜色学习方法改善室外光照变化对感知环境的干扰。Raia 等人^[5]提出了大范围内对视觉特征进行学习感知的策略。Michael 等人^[6]采用对地形进行学习和分类的方法实现对非结构化环境的理解。Grisetti^[7]提出采用非线性网络优化实现对地图进行高效学习和记忆的方法。综合以往的研究结果看,各种方法都是从某一种角度对检测方法进行了局部改进,目前在室外移动机器人道路检测方面并未形成完整统一的算法体系,还存在着极大的研究空间。本文从室外移动机器人的实时性要求强这一本质特点入手,同时考虑室外道路存在随机阴影和裂纹干扰及具有不规则边界的实际特点,提出一种新的检测方法:采用2维离散小波进行道路图像分解与重

构以达到多尺度分析和压缩的目的,以实验法离线确定图像灰度阈值的最佳响应尺度空间,在最佳尺度空间中采用改进的遗传算法进行道路图像的自适应分割,找到准确道路边界,最近两边界中心位置即机器人行驶方向。在标准室外机器人道路视频中进行测试,表明本文方法具有较好的实时性和鲁棒性。

1 系统总体描述

采用小型陆地自主车作为研究平台,该机器人由4个模块组成:运动底盘模块、电源及驱动模块、传感器模块、控制计算机模块,如图1所示。将视觉

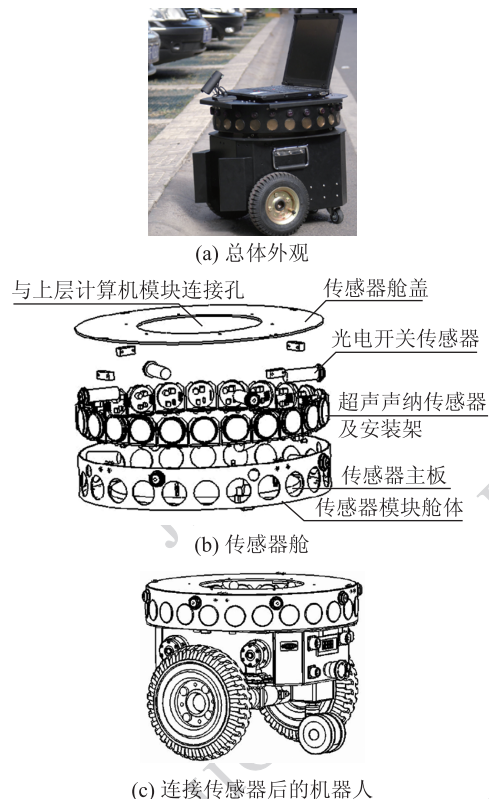


图1 小型陆地自主车平台

Fig. 1 Small autonomous land vehicle platform

传感器通过接口与机器人本体相连,并固定在本体上,标定后即可进行实验研究。

利用图像分割得到道路边界坐标,再进行道路平面坐标系与机器人图像坐标系间的转换,即可实现对机器人运动的视觉伺服控制。

2 道路图像的小波分析

2.1 道路图像的小波域建模

基于小波变换的多尺度图像分析法能够提供对边缘的尖锐和平滑程度的估计^[8]。假设道路数字图像 I 是大小为 $M \times N$ 的格网,共有 l 个波段。对机器人检测到的道路图像作 S' 层小波分解,每一小波尺度空间标号用层号 s ($s \in [0, \dots, S' - 1]$) 表示。分解后的图像记为 L 。图像的小波分解相当于对每个波段分别进行小波分解后再累加。记小波系数图像为 L^b ($b \in \{1, 2, \dots, l\}$)。一幅道路图像采用 2 维小波作 3 层分解的过程如图 2 所示。

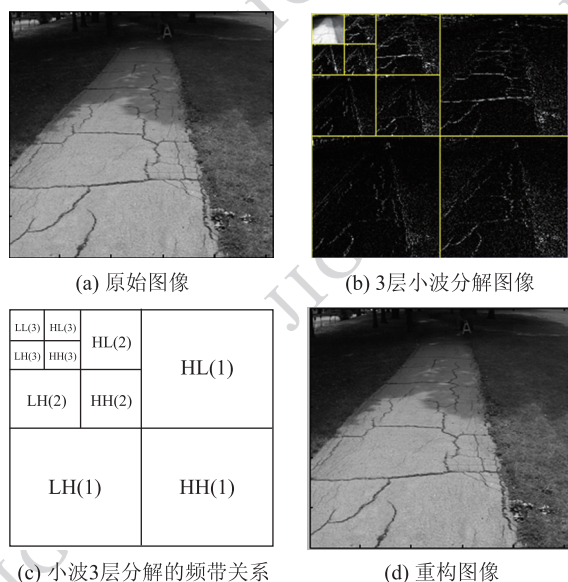


图2 道路图像的小波分解与重构

Fig. 2 Wavelet decomposition and reconstruction of road image

最低分辨率($S' - 1$)尺度空间包含 l 个波段、4 个频带(LL、LH、HL、HH)的小波系数,其他分辨率尺度空间则包含 l 个波段、3 个频带(LH、HL、HH)的小波系数。将多尺度空间中每一分辨率上不同波段、不同频带的小波系数组成系数特征向量,就形成该分辨率下的一幅小波系数向量图像。这样总共可得到 S' 个分辨率的图像序列。

2.2 最佳低分辨率尺度空间选择

受压缩采样思想的启发^[9],结合移动机器人视觉特点,尝试在低分辨率空间中进行道路感知。首先在不同尺度中做道路图像的近似重构实验,方法为:将单幅原始道路图像作 2 维小波分解,只选择 LL 部分作为重构图像^[10],在各种级别的重构图像上进行灰度阈值分割实验。用 bior3.7 对道路图像进行 6 个尺度上的分解实验,得到的逼近图像如图 3。

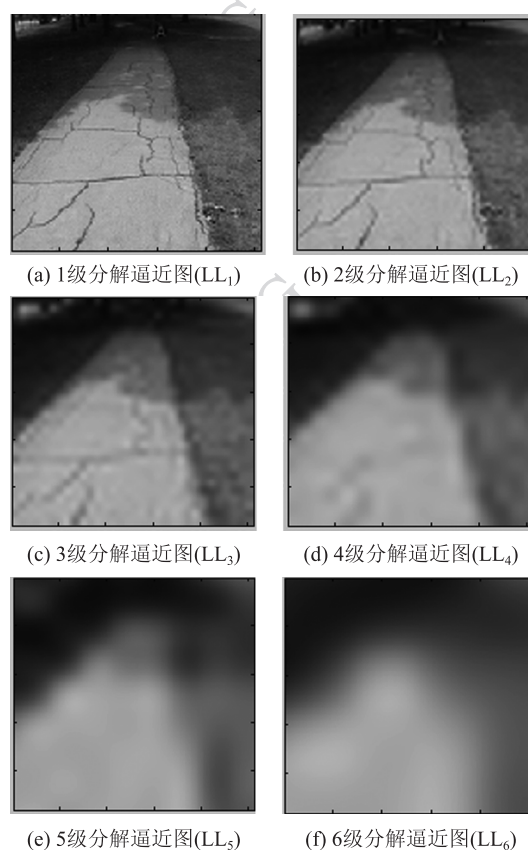


图3 6个尺度上道路图像低频逼近实验

Fig. 3 Low-frequency approximation experiment at six scales for road image

实验结果表明:1) 高分辨率级别上裂纹、阴影响应强度较大,但低于 4 级的分辨率上边界响应不准确;2) 主要特征在低分辨率图像上得到了保留;3) 低分辨率图像上检测到的道路边界与最高分辨率下检测到的边界几乎一致。最终结论为:经四级分解后道路边界的基本轮廓尚清晰,适合于进一步检测。此时道路裂纹和阴影得到很大程度的平滑与抑制,比 LL₃ 效果显然要好很多,这可降低道路检测算法的计算量和复杂度,提高检测结果的鲁棒性。

本文将 4 级分解作为机器人道路检测的最佳尺度空间。实验结果也反映出:经五级分解后的道路边界已出现较大失真,只能模糊检出;经 6 级分解后的道路图像逼近结果显示,几乎不可能再从 LL_6 中恢复出原始图像的关键信息,因此不作为继续实验的备选方案。

3 道路图像分割的遗传算法

3.1 算法流程

近 10 年左右,遗传算法已在边缘检测^[11]、图像匹配^[12]、图像增强^[13]、3-D 重构^[14]、视频分割^[15]等方面得到一定的研究,但在机器人视觉方面的报道尚不多见。将遗传算法应用于机器人的典型文献如文献^[16-18]等。

遗传算法的原型函数为

$$GA(Fit_{fun}, Fit_{threshold}, n, c, m)$$

式中, Fit_{fun} 为适应度函数, $Fit_{threshold}$ 指算法终止时适应度的阈值, n 是种群大小, c 为每一代中通过交叉取代种群个体的比例,简称交叉率, m 指变异率。

采用遗传算法进行道路图像分割的算法流程如图 4 所示。

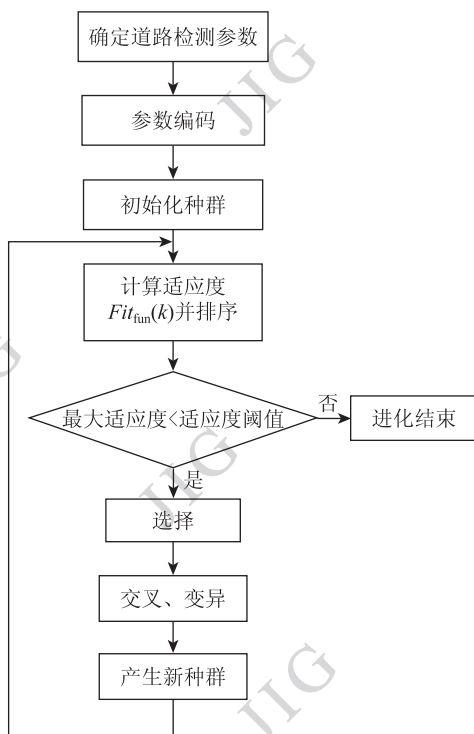


图 4 道路图像分割遗传算法流程

Fig. 4 Genetic algorithm flow for road image segmentation

3.2 适应度函数构造

针对道路图像分割的应用特点,构造适应度函数,方法如下:对移动机器人视觉导航系统来讲,能够获取自适应最佳阈值以达到对道路图像的鲁棒分割是问题的关键,最佳阈值应该使得每一类都具有最小类内方差,同时类间方差最大,这实际上是一个两目标优化问题,为简化计算,将二者合成为一个目标,通过在在适应度函数中将灰度值类内方差取负实现。

针对机器人采集到的灰度视频图像序列,为减少计算量,设单幅图像的灰度级由原来的 256 级量化为 $S(S < 256)$ 个,第 $i(0 \leq i \leq S)$ 个灰度级的灰度值为 i ,且该灰度级内共有 n_i 个像素。整幅图像共有 N 个像素,则灰度值为 i 的像素占总像素数的比例为

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (1)$$

则有

$$\sum_{i=0}^S p_i = 1 \quad (2)$$

设以阈值 k 将图像灰度级分为两类: $X_1 = \{0, 1, \dots, k\}$ 和 $X_2 = \{k+1, k+2, \dots, S\}$, 则两类出现的概率分别为

$$\rho_0 = \sum_{i=0}^k p_i \quad (3)$$

$$\rho_1 = \sum_{i=k+1}^S p_i$$

且 $\rho_0 + \rho_1 = 1$ 。两类的灰度均值分别为

$$\mu_0 = \frac{\sum_{i=0}^k i \times n_i}{\sum_{i=0}^k n_i} = \frac{\sum_{i=0}^k i \times p_i}{\rho_0} \quad (4)$$

$$\mu_1 = \frac{\sum_{i=k+1}^S i \times n_i}{\sum_{i=k+1}^S n_i} = \frac{\sum_{i=k+1}^S i \times p_i}{\rho_1}$$

整幅图像的总灰度均值为

$$\mu = \sum_{i=0}^S i \times p_i \quad (5)$$

且对任何 $k \in [0, S]$, 都有

$$\rho_0 \mu_0 + \rho_1 \mu_1 = \mu \quad (6)$$

类间方差为

$$\sigma(k) = \rho_0(\mu_0 - \mu)^2 + \rho_1(\mu_1 - \mu)^2 = \rho_0 \rho_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (7)$$

两类的类内方差分别为

$$\delta_0 = \sum_{i=0}^k (i - \mu_0)^2 \frac{p_i}{\rho_0} \quad (8)$$

$$\delta_1 = \sum_{i=k+1}^S (i - \mu_1)^2 \frac{p_i}{\rho_1}$$

于是,类内方差为

$$\delta = \rho_0 \delta_0 + \rho_1 \delta_1 \quad (9)$$

将适应度函数构造为

$$Fit_{fun}(k) = \sigma(k) - \delta \quad (10)$$

对所有 $k \in [0, S]$, 计算 $Fit_{fun}(k)$, 才能找到使 $Fit_{fun}(k^*) = \max(Fit_{fun}(k))$ 的最佳分割阈值 k^* , 计算量非常巨大。因此, 用自适应遗传算法来改进此计算过程, 达到快速求解最佳自适应分割阈值的目的。

3.3 遗传操作

通过迭代运算实现由当前种群产生新一代种群, 选择、交叉和变异是迭代运算中包含的 3 种遗传操作。针对道路灰度图像分割的实际应用, 用灰度值的 8 位二进制作为一个染色体, 并进行如下 3 类遗传操作:

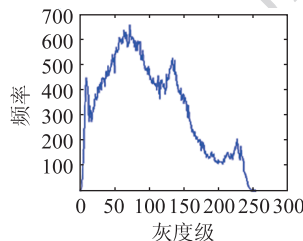
1) 选择。用概率法选择适应度函数值较大的 $(1-c)n$ 个个体作为父代加入新种群 C_k 。适应度函数小于阈值的个体被淘汰。计算从当前种群 C 中选择个体 x_i 的概率

$$P(x_i) = \frac{Fit_{fun}(x_i)}{\sum_{j=1}^n Fit_{fun}(x_j)} \quad (11)$$

这反映了个体被选中的概率与其适应度成正比, 与当前种群中其他竞争个体的适应度成反比。



(a) 原始道路图像



(b) 道路图像灰度直方图



(c) 灰度阈值取100时的分割结果



(d) 灰度阈值取150时的分割结果

图5 基于灰度直方图的道路图像分割结果

Fig. 5 Road image segmentation results using histogram

从实验结果看, 无法找到一种能将单幅图像道路区域准确分割出来的恰当阈值, 序列图像的情况下则更难准确分割。

采用小波分析预处理后再采用遗传算法自适应确定灰度阈值的道路图像分割结果如图6所示。

实验结果表明, 本文算法对阴影等干扰因素具有良好的鲁棒性。

2) 交叉。根据选择操作中给出的 $P(x_i)$, 从当前种群中按概率选择 $cn/2$ 对个体, 对每对个体应用交叉算子产生两个后代。这里采用单点 (single-point) 交叉算子^[19]。把产生的所有后代加入新种群。交叉算子是产生新个体的主要算子, 决定了遗传算法的全局搜索能力, 设置交叉率为 60%。

3) 变异。以某一概率从 C_k 中选择 $m\%$ 的个体, 并对选出的个体的某一位进行取反操作。设置变异率为 5%。

3.4 种群初始化方法的改进

为加快遗传算法的计算速度, 对种群初始化方法进行了改进。遗传算法在初始化种群时一般都是随机初始化每一个染色体, 这个过程实际上决定了了解的初始值, 如果选得过偏会造成进化速度慢、计算时间长。本文提出一种对此过程进行改进的方法, 即先由实验离线计算机器人道路图像的灰度直方图, 根据直方图估计出的分割阈值约为 180。该值实际上是一种先验知识, 取该值左右 20 邻域内的值对种群中的染色体进行随机初始化。这样可缩小初始化值的范围, 提高搜索速度。

4 道路检测实验

4.1 与传统算法检测效果的对比

从小型陆地自主车采集到的校园道路视频中提取出某一帧, 采用经典的灰度直方图法进行道路图像分割, 实验结果如图5所示。



图6 遗传算法道路图像分割实验结果

Fig. 6 Road image segmentation result using GA

4.2 基于标准图像库的实验

为了说明本文算法的通用性,采用卡耐基梅隆大学(CMU)提供的室外移动机器人道路视频对本

文算法进行验证。该视频中具有代表性的帧经小波重构后如图7所示。采用本文算法处理后的结果如图8。

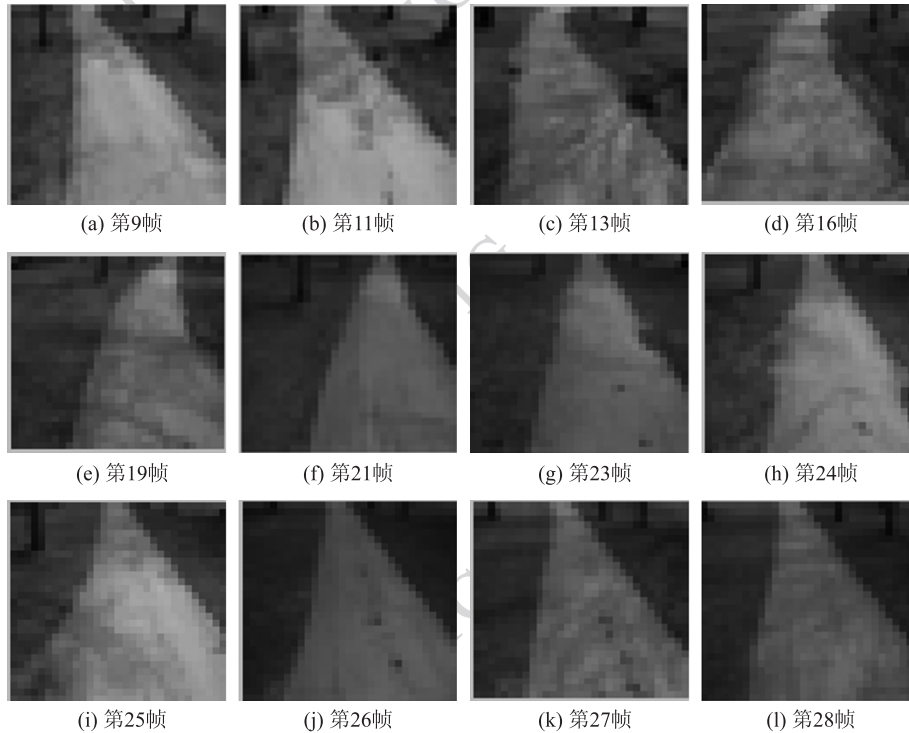


图7 CMU 道路图像序列

Fig. 7 Road image sequence from CMU

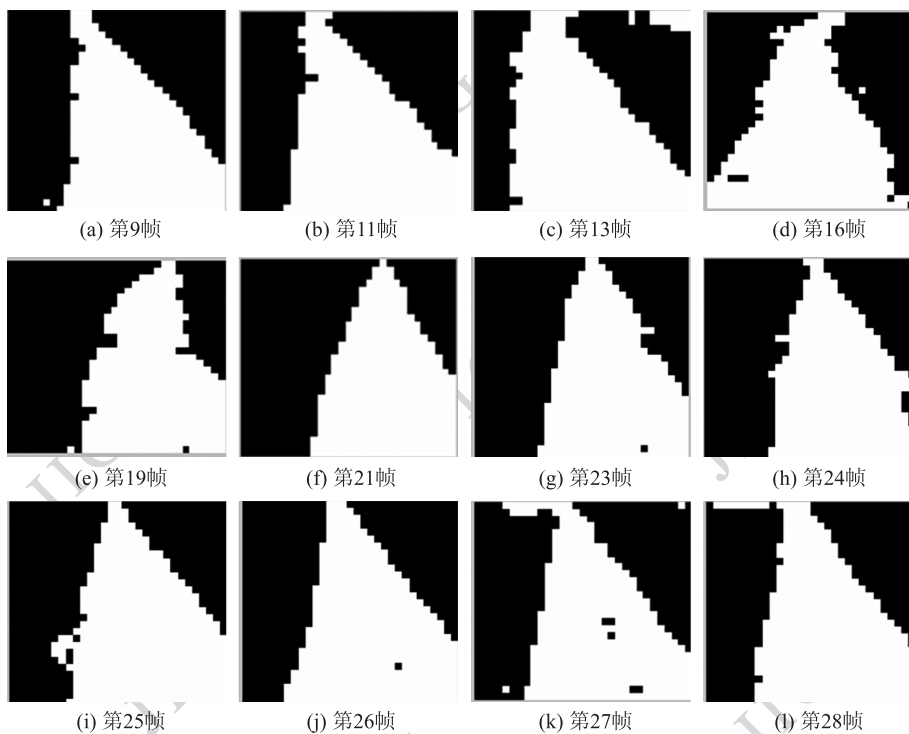
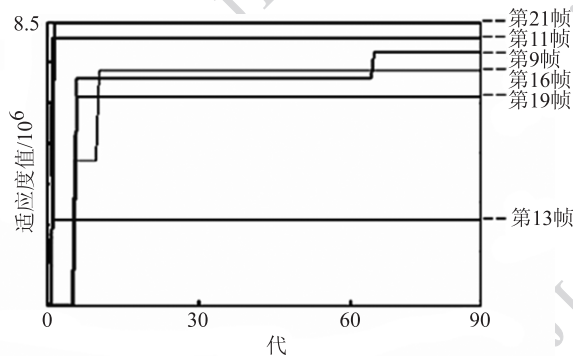


图8 CMU 道路图像序列分割结果

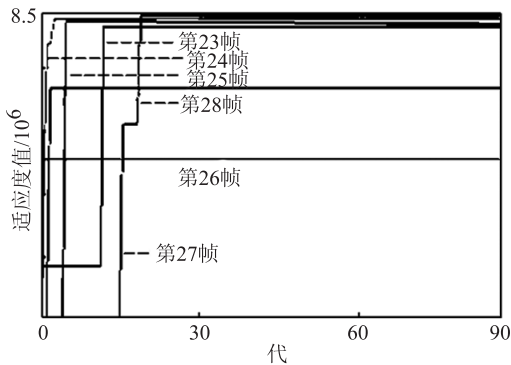
Fig. 8 Segmentation results of CUM road image sequence

从实验结果可以得出:本文算法对阴影干扰较严重(如第13、16、19帧)、有裂纹(每帧都有)、光照度随机变化(如第9帧较亮,第26、28帧较暗)的非结构化道路有较强的鲁棒性,能够准确快速分割出道路区域。另外,对道路中的坑洞也可检出,如第26帧、第27帧。如果这些坑洞属于伪障碍物,则可通过消除孤立噪声点的方法进行后处理后去除,得到干净的道路区域。如果坑洞确实构成机器人行进过程中的障碍,则提取坑洞图像的质心坐标传递给机器人,使其采取避障策略。关于真伪障碍物的鉴别属于道路检测中另一个研究方向,本文关注的是道路区域及边界的提取,关于障碍物检测只给出初步的处理思路,不做具体解释。

相应的适应度值进化曲线如图9所示。实验结果表明,几乎所有帧平均在第15代左右就进化到相对稳定的适应度值,有些帧的进化过程更快,只有个别帧进化较慢,但总体来看,适应度函数收敛速度较快。



(a) 第9、11、13、16、19、21帧



(b) 第23、24、25、26、27、28帧

图9 道路图像序列适应度值进化曲线

Fig. 9 Road image sequence evolutionary fitness value curve

选择图像序列中典型的1帧说明遗传算法中每一代分割阈值进化情况,如图10所示。

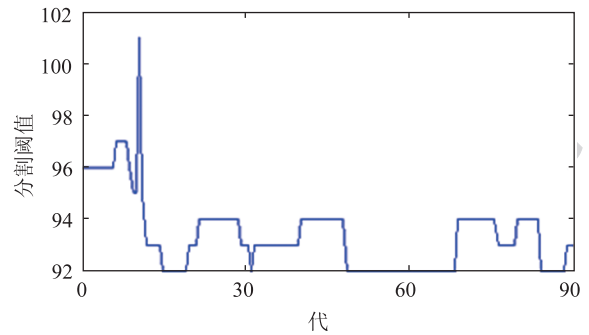


图10 第23帧每一代阈值进化结果

Fig. 10 Threshold evolution results of each generation of frame No. 23

图10表明,在每一帧中,遗传算法通过遗传操作计算使阈值不断进化,最终达到最优。还可看出,图像序列中每一帧的最佳分割阈值是自适应变化的,这就是自适应检测的本质。经过这种计算,图像序列中每一帧都采用最优阈值作分割,从而达到时空全局最优。

4.3 算法复杂度及系统实时性分析

仅对本系统涉及的遗传算法时间复杂度进行分析。假定存在函数 $f(n)$,当 $n=k$ 时, $f(k)$ 表示算法在输入规模为 k 时的运行时间,则 $T(n)$ 为算法的时间复杂度,记作

$$T(n) = O(f(n)) \quad (12)$$

程序每次执行的时间不仅取决于输入规模 n ,还取决于输入的特性和具体硬件环境在某次执行时的状态。假定其他条件固定不变,则时间复杂度仅与算法的输入规模相关。这里采用图像矩阵的维数来表示 n 。本文算法采用了尺度空间4上的近似道路图像,此空间上所有高频和低频子图像合成的图像占用存储空间大小约为12 Kb(.JPEG),而低频子图像(LL₄)大小仅约为4 Kb(.JPEG)。因此可认为采用小波预处理后的图像矩阵维数大大降低,约为原来的三分之一。这对遗传算法复杂度的降低起到了至关重要的作用。采用的遗传算法本质上是二重迭代,时间复杂度不超过 n^2 。

任取某段道路视频中的20帧作算法实时性对比实验,采用Ostu自适应灰度阈值分割法和本文算法的对比结果如图11所示。

从图11可看出,本文算法阈值计算耗时明显低于传统方法,因此大幅提高了机器人环境感知的实时性。

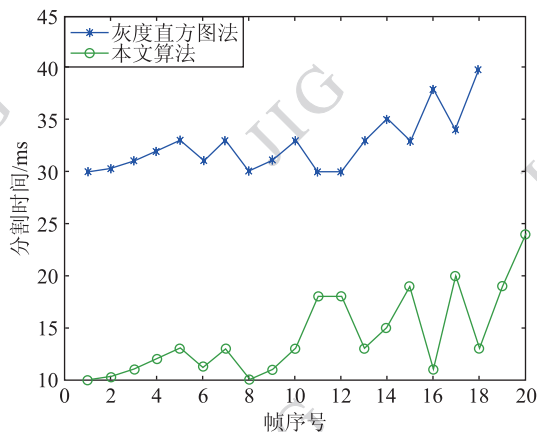


图 11 阈值计算耗时对比

Fig. 11 Time cost comparison of threshold calculation

5 结论

室外道路检测的难点在于:无论采用哪种特征提取算子或分割方法,涉及的阈值都很难根据环境变化自适应确定,因此算法的鲁棒性难以保障;由于算法鲁棒性欠缺,将直接导致实时性提高非常困难。室外移动机器人非结构化道路检测的实际需求特点为:实时性和鲁棒性要求高,精度要求并不需要太高。针对该需求,提出了自适应道路检测的概念,创造性的将小波图像分析与遗传算法相结合开发出一种非结构化道路自适应检测算法。移动机器人采用该道路检测算法可以平均 30 km/h 的速度在有阴影的校园道路上行驶,视觉系统的处理速度平均可达到 20 ms/帧。本文算法为室外自主移动机器人的道路跟踪提供了一种有效途径。

参考文献 (References)

- [1] Pedro S, Ricardo M, Luís C, et al. Neural-swarm visual saliency for path following[J]. *Applied Soft Computing*, 2012, 31(7): 1633-1637.
- [2] Pedro S, Luís C, Ricardo M, et al. Tracking natural trails with swarm-based visual saliency [J]. *Journal of Field Robotics*, 2013, 30(1): 1048-1055.
- [3] Mohan S, Peter S. Structure-based color learning on a mobile robot under changing illumination[J]. *Autonomous Robots*, 2007, 23(3): 161-165.
- [4] Mohan S, Peter S. Color learning and illumination invariance on mobile robots: a survey[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, 57(6-7): 629-633.
- [5] Raia H, Pierre S, Jan B. Learning long-range vision for autonomous off-road driving [J]. *Journal of Field Robotics*, 2009, 26(2): 1089-1095.
- [6] Michael J, Jane M. Learning terrain segmentation with classifier ensembles for autonomous robot navigation in unstructured environments[J]. *Journal of Field Robotics*, 2009, 26(2): 2-7.
- [7] Grisetti C, Stachniss W. Nonlinear constraint network optimization for efficient map learning[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2009, 10(3): 428-433.
- [8] Zhu X A. Wavelet Analysis and Its Application in Digital Image Processing[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 29-31. [朱希安. 小波分析及其在数字图像处理中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 29-31.]
- [9] Candes E, Wakin M B. An introduction to compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 30(4): 1522-1530.
- [10] Cheng Z X. Wavelet Analysis and Applications [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2006: 100-105. [程正兴. 小波分析与应用实例[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 100-105.]
- [11] Li Y, Jiao L C. Edge detection using adaptive immune genetic algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(8): 890-895. [李映, 焦李成. 基于自适应免疫遗传算法的边缘检测[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(8): 890-895.]
- [12] Zheng J, Zhu J. Image matching based on adaptive genetic algorithm[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2003, 37(6): 689-692. [郑军, 诸静. 基于自适应遗传算法的图像匹配[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2003, 37(6): 689-692.]
- [13] Zhou J L, Lv H. Image enhancement based on a new genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2001, 24(9): 959-964. [周激流, 吕航. 一种基于新型遗传算法的图像自适应增强算法的研究[J]. 计算机学报, 2001, 24(9): 959-964.]
- [14] Dipanda A, Woo S. 3-D shape reconstruction in an active stereo-vision system using genetic algorithms[J]. *Pattern Recognition*, 2003, 50(5): 1029-1035.
- [15] Yi K E, Jung K. Genetic algorithms for video segmentation[J]. *Pattern Recognition*, 2005, 160(6): 1000-1010.
- [16] Pang M, Zhao J, Cai H G. Gait energy optimization of three-limbed robot based on generation algorithm [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 42(Supp): 35-38. [庞明, 赵杰, 蔡鹤皋. 基于遗传算法的三肢体功能仿生机器人步态能量优化[J]. 机械工程学报, 2006, 42(增刊): 35-38.]
- [17] Zhou W, Zhao C X. A fast SLAM 2. 0 algorithm based on genetic algorithm[J]. *Robot*, 2009, 31(1): 25-30. [周武, 赵春霞. 一种基于遗传算法的 FastSLAM2. 0 算法[J]. 机器人, 2009, 31(1): 25-30.]
- [18] Li Z H, Fu Y L. Motion planning of a bio-inspired biped wall climbing robot stepping over obstacles based on genetic algorithm [J]. *Robot*, 2012, 34(6): 751-757. [李志海, 付宜利. 基于遗传算法的仿生双足爬壁机器人越障运动规划[J]. 机器人, 2012, 34(6): 751-757.]
- [19] Tom M. Machine Learning [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.