

基于改进 Otsu 的室外道路实时检测与跟踪算法

陆培源, 王建中, 罗涛

北京理工大学; 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

摘要 室外道路检测与跟踪是移动机器人完成室外环境探索和自主导航的基础和前提。针对室外机器人工作环境复杂、光照多变等特点, 提出了一种适用于室外道路实时检测与跟踪的算法。首先将 CCD 摄像头获得的画面通过预处理, 提取视频画面的感兴趣区域 (ROI) 并转化为 HSV 颜色空间下的图像, 然后通过改进的自适应阈值分割法 (Otsu) 获得道路图像的边缘信息, 采用抗干扰能力较强的霍夫 (Hough) 变换得出画面中的可通行区域, 最后采用加权马氏距离判别法跟踪可通行区域。实验表明, 该算法在室外环境下具有较好的道路识别跟踪能力和实时性。

关键词 室外机器人; 道路检测; 道路跟踪; 改进 Otsu 法; 霍夫变换; 加权马氏判别

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.08.009

Real-time Detection and Tracking of Road Information for Outdoor Vision-based Robot Based on Improved Otsu

LU Peiyuan, WANG Jianzhong, LUO Tao

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology; Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The detection and tracking of road information are the basis and prerequisite of environmental exploration and autonomous navigation by mobile robot. In view of the complexity of the outdoor working environment of the robot and the variety of the outdoor illumination conditions, a suitable and novel way of real-time detection and tracking for outdoor robot is presented. First, the video images obtained from CCD camera are preprocessed. Then the Region of Interest (ROI) is extracted and transformed into the HSV color space. The edge information of the road image is obtained from the ROI by using the improved Otsu algorithm. With the anti-jamming ability of the Hough transform, the region where robot can pass through is shown. Finally the weighted Mahalanobis distance discrimination method is used to track the passing area. Experiment results show that this algorithm enjoys a good performance in the detection and tracking of road information in outdoor environment in real-time.

Keywords outdoor robot; road detection; road tracking; improved Otsu; Hough transform; weighted Mahalanobis distance discrimination

0 引言

基于视觉的室外自然场景理解是工作在复杂自然环境中的移动机器人实现自主环境适应所应具备的基本条件。室外机器人工作环境不同于室内或者室外结构化道路环境, 一般多为非结构化道路, 没有车道线和清晰的道路边界, 道路形状多种多样, 路面等级较低, 道路周边环境复杂, 再加上落叶、阴影和水迹的影响, 使得道路区域和非道路区域的划分有很大难度, 因此研究室外环境道路的检测与跟踪成为近年

来研究的热点与难点^[1]。

随着计算机视觉技术和认知学的快速发展, 对场景图像中单一形式物体的识别逐渐过渡到对同类物体中多形式物体的识别, 以及场景的全局理解和场景物体间关联信息的建模。在检测跟踪准确性方面, Shotton^[2]提出了 texton-layerout 高级特征并结合 Boosting 方法, 有效解决了室外环境中辨识模糊性问题, 使场景及场景中物体的辨识具有较高的精度, 但算法效率不高且只是孤立地考虑每帧图像的信息。Huhns^[3]通

收稿日期: 2010-09-10; 修回日期: 2011-02-22

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室自主研究课题 (ZDKT08-05)

作者简介: 陆培源, 博士研究生, 研究方向为模式识别与智能系统, 电子信箱: skylend@bit.edu.cn; 王建中 (通信作者), 教授, 研究方向为军用机器人技术、多机器人协同技术, 电子信箱: cwjzwang@bit.edu.cn

过训练获得不同场景类别颜色分量阈值,进而采用基于规则的方法对不同地貌进行分类辨识,实现了较为精确的分类与识别。在算法实时性方面,王璐等^[4]利用视觉局部显著区域对自然场景进行辨识和理解,通过提取场景认知过程中感兴趣区域减少系统处理时间。Fauqueur^[5]充分利用视频帧间关联信息,采用局部 SIFT 特征进行帧间区域跟踪和标记传播,降低了场景辨识的计算量。然而,目前大部分算法无法兼顾道路识别跟踪的准确性和实时性。

本文提出了一种适用于室外道路实时检测与跟踪的算法,首先提取出视频画面的感兴趣区域(ROI)并转化为 HSV 颜色空间下的图像,然后通过改进的自适应阈值分割法获得道路图像的边缘信息,采用抗干扰能力强的 Hough 变换得出画面中的可通行区域,最后采用加权马氏距离判别法跟踪可通行区域。该算法能在保证实时性的情况下实现较为准确的识别与跟踪,具体的算法流程如图 1 所示。

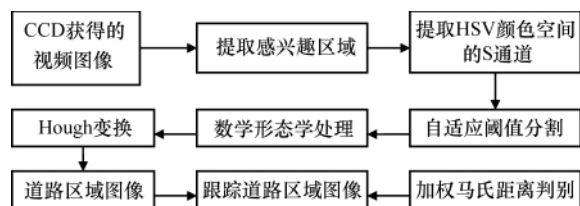


图 1 算法设计流程

Fig. 1 Flowchart of the algorithm

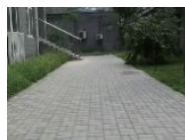
1 视频图像预处理

通过 CCD 摄像机的安装角度及大量实验可知,视频画面主要构图的上部分为天空和树木,或为草和杂物等非道路区域,道路区域大多集中在画面的下部分,为了减小图像处理的时间,简化处理过程,本文将 CCD 获得的 240×320 视频画面(图 2(a))缩小为 120×160(图 2(b)),并且只处理图 2(b)中



(a) 原始视频图像

(a) Original video image



(b) 缩小后图像

(b) Reduced image



(c) 图像处理部分

(c) Image processing section

图 2 感兴趣区域的提取

Fig. 2 Extraction of the region of interest

的下半部分,如图 2(c)所示。

本文在颜色的表示方法上,选择了符合人视觉感知的 HSV 模型。HSV 模型中的 S(饱和度)颜色通道表达颜色的浓度,可以从很大程度上弱化由光照、阴影所产生的对视频画面的影响。

在 RGB 空间中某一点的 R,G,B 值(均在[0,255]区间内)均可转换到 HSV 空间,得到相应的 H,S,V 值,并从转换为 HSV 模型的视频画面中提取出 S 通道图像。

$$H = \begin{cases} \arccos \left[\frac{(R-G)+(R-B)}{\sqrt{2(R-G)^2+(R-B)^2}} \right] & B \leq G \\ 2\pi - \arccos \left[\frac{(R-G)+(R-B)}{\sqrt{2(R-G)^2+(R-B)^2}} \right] & B > G \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R+G+B)} \quad (2)$$

$$V = \frac{\max(R, G, B)}{255} \quad (3)$$

2 视频图像的边缘检测

对于视频图像的边缘检测,目前主要有基于 Sobel 算子、Prewitt 算子等固定阈值算法,也有自适应阈值分割法,如 Otsu 法。Otsu 法是 1979 年 N. Otsu 提出的动态阈值方法,其基本思想是利用类间方差作为判别依据,选取使类间方差最大的灰度值作为最佳分割阈值^[6]。基本原理如下。假设一副图像的灰度级为 L,灰度值 i 的像素为 n_i,则总像素数 $N = \sum_{i=0}^{L-1} n_i$,各像素值概率 $P_i = n_i / N$ 。假设图像的分割阈值为 t,t 将图像中像素级分为两大类 C₀ 和 C₁,即 C₀={0, 1, 2, ..., t}, C₁={t+1, t+2, ..., L-1},则 C₀ 出现的概率为 $\omega_0(t) = \sum_{0 \leq i \leq t} p(i) = \omega(t)$,均值为 $\mu_0(t) = \sum_{0 \leq i \leq t} (ip(i)/\omega_0(t)) = \mu(t)/\omega(t)$; C₁ 出现的概率为 $\omega_1(t) = \sum_{t+1 \leq i \leq L-1} p(i) = 1 - \omega(t)$,均值为 $\mu_1(t) = \sum_{t+1 \leq i \leq L-1} (ip(i)/\omega_1(t)) = [\mu - \mu(t)] / [1 - \omega(t)]$,整体均值为 $\mu = \omega_0(t)\mu_0(t) + \omega_1(t)\mu_1(t)$ 。Otsu 方法求出图像最佳阈值的公式为

$$Th = \operatorname{argmax}_{t \in C_t} [\omega_0(t)(\mu_0(t) - \mu)^2 + \omega_1(t)(\mu_1(t) - \mu)^2] \quad (4)$$

Otsu 方法选取阈值计算简单,能在短时间内分离出前景区域和背景区域,但当背景区域和前景区域的灰度值差别不大时会产生错误的分割,即当图像的灰度直方图为明显的单峰时,Otsu 算法具有较好的分割效果,当图像的灰度直方图为双峰或模糊多峰时,该算法会因图像中某部分的方差与图像总体的方差很接近而错误地将该部分分割到前景或者背景区域中。

只有既保证类间距离最大,又做到每个类的内聚性好,才能获得较好的分割效果。基于这个要求,本文在 Otsu 的基础上提出一个新的阈值选取方法:

$$Th = \arg \max_{0 \leq t \leq L-1} \left[\frac{(\overline{\sigma_0^2}(t) - \sigma^2)^2 (\overline{\sigma_1^2}(t) - \sigma^2)^2 d^2(t)}{\alpha \overline{\sigma_0^2}(t) + \beta \overline{\sigma_1^2}(t)} \right] \quad (5)$$

式中, $\overline{\sigma_0^2}(t) = \frac{1}{\omega_0(t)} \sum_{0 \leq i \leq t} (i - \mu_0(t))^2 p(i)$, $\overline{\sigma_1^2}(t) = \frac{1}{\omega_1(t)} \sum_{t+1 \leq i \leq L-1} (i - \mu_1(t))^2 p(i)$, $\sigma^2 = \sum_{0 \leq i \leq L-1} (i - \mu)^2 p(i)$, $d^2(t) = (\mu_0(t) - \mu_1(t))^2$, α 为 C_0 区域在图像中的比例, β 为 C_1 区域在图像中的比例。

改进的算法用平均方差 $\overline{\sigma_0^2}(t)$, $\overline{\sigma_1^2}(t)$ 代替式(4)中的均值, 分子加入了距离度量 $d^2(t)$, 用以度量两类间的距离, $d^2(t)$ 越大, 说明两类的距离越大, 分割效果越明显; 同时分母中加入了 α, β 权值, 相对于曲昆鹏等^[7]的方法, 改进的算法更合理地衡量了各类的平均方差所占的比例。

自适应阈值分割法分割后的视频图像, 虽然获得了道路区域二值图像, 但由于分割过程中无法避免出现噪点和局部分割错误, 道路边缘线不一定连续, 且有一定量的随机噪声, 不便于后续的道路区域检测, 如图 3(a) 所示。为了确保整个道路区域在一个封闭区域内, 本文采用数学形态学处理方法, 将图像形态闭操作和膨胀后获得的图像进行逻辑与运算, 最后获得封闭道路区域的边缘图像, 如图 3(b) 所示。

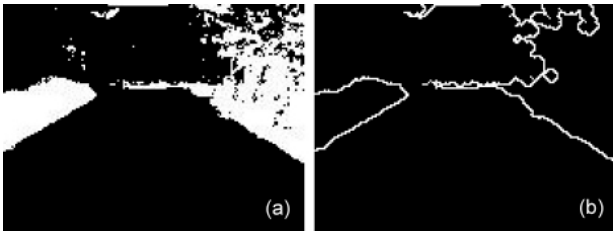


图 3 形态学处理前 (a)、后 (b) 图像
Fig. 3 Images before (a) and after (b) morphology processing

3 可通行区域的提取

通过以上处理, 获得了视频画面清晰的边缘图像, 将边缘图像划分为左右两个区域, 并将左区域的右上部分和右区域的左上部分去掉, 如图 4(b) 所示, 目的是尽量将边缘图像的非重点图像信息去掉, 防止产生错误的分类。经过上述处

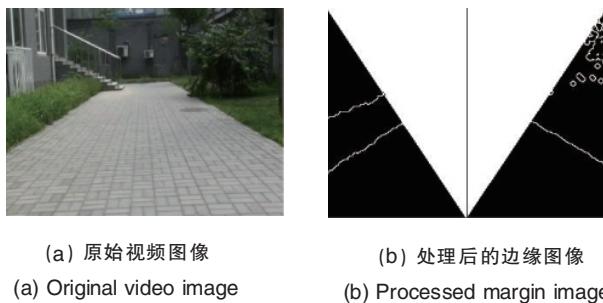


图 4 Hough 提取道路边界线
Fig. 4 Extraction of the Hough lines

理, 已经最大限度地去掉了干扰点。常见的线提取方法有最小二乘法拟合和 Hough 变换^[8]方法。前者较后者计算量小但抗干扰能力差。为进一步提高线提取的鲁棒性, 采用了抗干扰能力更强的 Hough 变换从左右两个区域的边缘图像中提取出道路边界信息。

4 可通行区域的跟踪

在确定了道路边界的准确位置后, 进入稳定跟踪阶段。这时算法转入跟踪识别模块, 跟踪识别算法只需在感兴趣区域对道路边界进行识别。就传统的马氏距离判别算法^[9]而言, 若总体 C 可分为 t 个类 C_1, C_2, \dots, C_t , 马氏距离判别的思想就是对于一个待判样本 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ 进行分类, 假设类 C_i 的均值和协方差阵为 μ_i 和 Σ_i , 考虑距离的平方:

$$d_i^2 = d^2(X, C_i) = (X - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (X - \mu_i) \geq 0 \quad (6)$$

若 $d_i^2 = \min\{d_p^2, 1 \leq p \leq t\}$, 则 $X \in C_i (i=1, 2, \dots, t)$ 。

由于马氏距离法对 m 个指标没有区分对待, 当指标个数较多, 且指标的重要性存在差异时, 某些情况下可能会出现较多的误判。本文对 X 的各个分量进行加权: $Y = BX$, 其中 B 为权矩阵, 可通过主成分分析的方法确定 B 。假设总体 C 的均值向量为 μ , 协方差阵 Σ , 则有 $\Sigma = R (R$ 为 C 的相关系数阵), 通过 R 可求得 C 的非零特征根 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m > 0$, 及其对应的单位化特征向量 U_1, U_2, \dots, U_m 。记 $A = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$, $U = (U_1, U_2, \dots, U_m)$, 则有 $F = U^T X$, $\Lambda = U^T \Sigma U$ 。记 $F = (F_1, F_2, \dots, F_m)$, 定义 $\eta_i = \lambda_i / \text{tr}(\Sigma) = \lambda_i / \text{tr}(A)$ 为 F_i 对 X 各分量方差总和的贡献率 ($i=1, 2, \dots, m$)。记 $H = \text{diag}(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m)$, 而 $\tilde{\mu}_i = U^T \mu_i$ 和 $\tilde{\Sigma}_i = U^T \Sigma_i U$ 分别为经变换后 C_i 的均值与协方差阵。由于 F_i 和 F_j 之间相互独立 ($i \neq j$), 可将 F_i 的方差贡献率看成 F_i 的权值, 则 F 到 C_i 的加权马氏距离的平方为

$$\begin{aligned} \tilde{d}_i^2 &= d^2(F, C_i) = (F - \tilde{\mu}_i)^T H \tilde{\Sigma}_i^{-1} H (F - \tilde{\mu}_i) \\ &= [U^T (X - \mu_i)]^T H U^T \Sigma_i^{-1} U H [U^T (X - \mu_i)] \\ &= (X - \mu_i)^T U H U^T \Sigma_i^{-1} U H U^T (X - \mu_i) \end{aligned} \quad (7)$$

对比式(6)可知, $B = U H U^T = \frac{1}{\text{tr}(A)} U A U^T = \frac{1}{\text{tr}(A)} \Sigma = \frac{1}{\text{tr}(A)} R$

于是给出加权马氏距离判别法的判别规则为

$$\tilde{d}_i^2 = \frac{1}{\text{tr}^2(A)} (X - \mu_i)^T R \Sigma_i^{-1} R (X - \mu_i) \quad (8)$$

若 $\tilde{d}_i^2 = \min\{\tilde{d}_p^2, 1 \leq p \leq t\}$, 则 $X \in C_i (i=1, 2, \dots, t)$ 。

跟踪算法是利用前一识别过程中得到的道路边界参数, 预测下一帧检测得到的边界线是否为道路边界。算法流程如下。

(1) 根据上一帧的视频图像确定感兴趣区域内的道路边界线。

(2) 将下一帧视频图像检测到的道路边界线与上一帧获得的道路边界线做匹配, 如果两帧检测出的边界线的加权马氏距离在一定的阈值范围以内, 即判定该检测出的边界线为

有效的道路边界线,如果加权马氏距离在阈值范围以外,则判定该检测出的边界线为无效的道路边界线,同时继续检测下一帧图像。

(3) 将有效的道路边界线标出,显示跟踪效果。

5 实验和结果分析

为了验证所设计算法的有效性和实时性,利用单摄像机在室外录制各种路况的视频图像,用以模拟机器人在室外的行驶状况。算法基于 VC++ 6.0 平台和 Matlab 下的 Simulink 环境编写,处理器为 1.83GHz 双核 CPU,1.5GB 内存。所选取的视频图像的分辨率为 240×320,Hough 变换的峰值个数设为 2,即找出交集最频繁的两条直线。加权马氏距离的阈值设

为 75,权值为 200。有效边界线检测最小帧数设为 4,无效边界线检测最大帧数设为 2。原始图像及处理后的视频图像如图 5 所示。图中,第 1 行为原始视频图像截图;第 2 行为用传统 Otsu 方法检测原始视频图像,黑色区域为检测出的可通行道路区域,对于原始视频图像中出现的阴影和反光,传统 Otsu 方法无法完整地检测出可通行道路区域;第 3 行为用改进后的 Otsu 方法检测原始视频图像,可知改进后的算法能检测出原始视频图像中的阴影和反光区域,较完整地检测出可通行道路区域,且实时处理能力达 16 帧/s。图 6 为视频图像在不同帧数时的跟踪效果,图中左右两条直线为检测到的道路区域,中间箭头为道路区域的跟踪方向。可以看出,本文的跟踪算法检测出的可通行道路区域与真实道路情况相符。

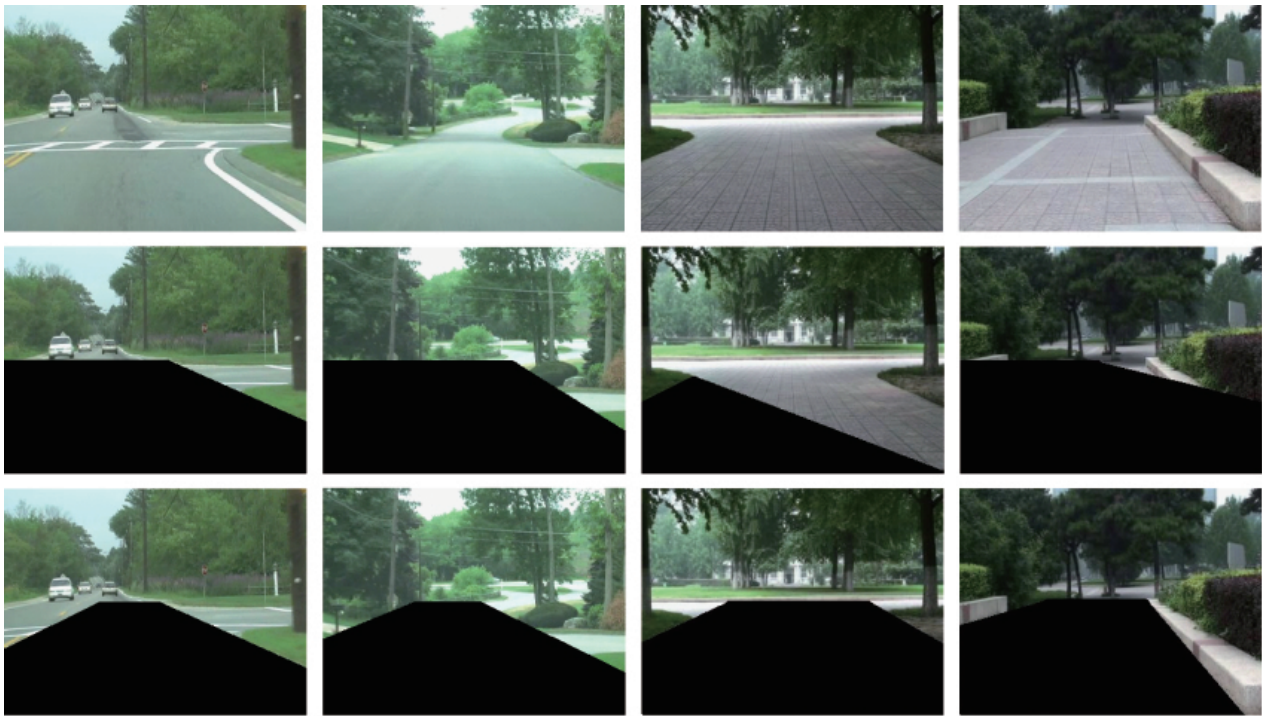


图 5 检测试验结果对比

Fig. 5 Comparison of the detection results



(a) 第 20 帧
(a) The 20th frame

(b) 第 70 帧
(b) The 70th frame

(c) 第 120 帧
(c) The 120th frame

(d) 第 170 帧
(d) The 170th frame

图 6 跟踪试验结果

Fig. 6 Results of the tracking tests

6 结论

本文提出了一种适用于室外较复杂环境中道路实时检测与跟踪的算法。通过提取画面的感兴趣区域,采用改进的Otsu算法和Hough变换检测道路区域,并使用加权马氏距离判别法跟踪道路区域。实验结果表明,算法能够较好地检测出道路区域以及实现较为准确的跟踪,并能达到每秒处理16帧图像的速度,基本实现了实时检测,实时跟踪。

参考文献 (References)

- [1] 刘子辉. 军用无人驾驶车辆非结构化道路识别方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.
Liu Zihui. Study on recognition algorithms for UGVs on unstructured roads[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [2] Shotton J, Winn J, Rother C, et al. Texton Boost for image understanding: Multi-class object recognition and segmentation by jointly modeling texture, layout, and context [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(1): 2-23.
- [3] Huhns M N, Mendoza B, Ruvinsky A, et al. The JIDOKA system for multiple-sensor terrain classification [R]. USA CSE Technical Report TR-2006-13, 2006.
- [4] 王璐, 陆筱霞, 蔡自兴. 基于局部显著区域的自然场景识别[J]. 中国图

象图形学报, 2008, 13(8): 1594-1600.

Wang Lu, Lu Xiaoxia, Cai Zixing. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(8): 1594-1600.

- [5] Fauqueur J, Brostow G, Cipolla R. Assisted video object labeling by joint tracking of regions and keypoints [C]. 2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision, Rio de Janeiro, Brazil, Oct 14-21, 2007.
- [6] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram [J]. *Computer Vision, Graphic, and Image Processing*, 1985, 29(3): 273-285.
- [7] 曲昆鹏, 郑丽颖. 基于目标、背景比例的灰度图像自动阈值选取法[J]. *应用科技*, 2010(2): 52-54, 60.
Qu Kunpeng, Zheng Liying. *Applied Science and Technology*, 2010(2): 52-54, 60.
- [8] Tarsha-Kurdi F, Landes T, Grussenmeyer P. Hough-transform and extended RANSAC algorithms for automatic detection of 3D building roof planes from Lidar data [C]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS. Espoo, Finland, Sept 12-14, 2007.
- [9] 袁志发, 周静宇. 多元统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Yuan Zhifa, Zhou Jingyu. *Multivariate statistical analysis* [M]. Beijing: Science Press, 2002.

(责任编辑 代丽)

2011农业工程新技术国际学术会议

时间: 2011年5月27—29日
地点: 山东·淄博

主办: 中国农业工程学会

通信地址: 山东淄博市张周路12号山东理工大学农业工程与食品科学学院 (255049)
传 真: 0533-2786896, 电子信箱: aent2011@gmail.com
网 址: <http://icae2011.sdut.edu.cn>

第十五届中国国际非开挖技术研讨会暨展览会

时间: 2011年4月16—17日 地点: 武汉

主办: 中国地质学会

会议议题:

定(导)向钻进、微型盾构(顶管)、夯管及气动矛、管道修复与更换技术、相关设备仪器及管线检测技术等。

网址: www.csstt.org