

用于距离图像 2D 扫描线的极速边缘检测器

王 建¹,姚振强¹,尹明德²,朱瑶洁³,李康妹¹

(1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室,上海 200240; 2. 南京航空航天大学机电学院,江苏南京 210016;
3. 延锋伟世通汽车饰件系统有限公司,上海 201206)

摘 要: 本文提出一种对距离图像 2D 扫描线进行粗大噪声去除和边缘识别处理的极速检测器. 以扫描线典型轮廓分布规律分析为基础,定义了数个特征描述系数并以此建立判别准则,实现快速去噪和边缘检测. 该方法具有内在的平移和旋转不变性,并可通过自适应参数来实现尺度不变性. 文中采用基于候选点的参数自学习方法来进行阈值学习. 将扫描点参数集计算步骤进行高度集成,可对最大限度消除冗余计算. 通过实物扫描实验,对算法的计算复杂度、时间开销、检测准确度和稳定性进行了详细评估. 在普通 PC 平台上,整合模式耗时约 0.15ms 即可准确检测单条扫描线中的所有边缘点. 评估结果表明,本文提出的检测器具有极高的运行效率、检测准确性、鲁棒性和可扩展性,可满足极为苛刻的工业应用要求.

关键词: 快速边缘检测; 实时数据处理; 激光测距雷达; 去噪滤波; 3D 距离图像处理; 计算机视觉

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2010)07-1711-05

A Rapid Edge Detector for 2D Scan Line in Range Image

WANG Jian¹, YAO Zhen-qiang¹, YIN Ming-de², ZHU Yao-jie³, LI Kang-mei¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;
3. Yanfeng Visteon Automotive Trim Systems Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: In this paper, we propose a novel rapid detector which is used to denoise and recognize edges for 2D scan line in range image. Based on silhouette analysis in a scan line, a few coefficients are defined to characterize large noise and edge points, and several determinative criteria are stipulated for rapid denoising and edge detection. Because all the coefficients used are distances or their ratio, the proposed method is inherently invariant to translation and rotation. The threshold set is trained by selecting some feature point candidates. By merging parameter attributes calculation, redundant computation is decreased to the lowest in an integral mode algorithm. Based on real data experiments, computational complexity, time expenditure, accuracy and stability of the method are evaluated in detail. The proposed detector under integral mode can process a scan line within 0.15 ms on an ordinary PC. The results indicate that the proposed method has excellent performance on efficiency, accuracy, robustness and scalability, and is qualified for real-time processing in stringent industrial occasions.

Key words: rapid edge detection; real-time data processing; laser range finder; denoising large noise; 3D range image; computer vision

1 背景与现状

在 3D 轮廓图像中,边缘通常表现为表面的不连续,且具有较大梯度. 因匹配模板受到方向和尺度的限制,传统的经典算子边缘检测方法大多不具有旋转和尺度变换不变性. 近年来,结合形态学^[1]、空间聚类^[2]、小波变换^[3]等方法开发出的复杂算子,可提供对噪声、有限旋转的适应能力.

Zhang^[4]对 3D 边缘检测的研究进展进行了综述,并

提出了一些将 2D 检测算子扩展到 3D 空间的方法. Zhan 和 Mehrotra^[5]提出最优 3D 零交叉边缘检测器,组合 3 种规则对惩罚函数进行优化:信噪比、局部化和零交叉的伪响应. Cung 等^[6]提出了多尺度边缘检测和分类方法. Jiang 和 Bunke^[7]基于单扫描线逼近技术,提出了一个用于距离图像的边缘检测算法,并提供了边缘强度度量.

近年来关于边缘检测的研究,已使经典边缘算子得到了大幅改进,但大多需要极大的计算开销. 在许多工业应用场合,视觉系统必须在有限时间内处理庞大的传

感数据,算法必须在极短的时间内输出结果.本文提出了一种用识别规则对2D扫描线进行快速降噪和边缘检测的新方法.该方法具有内在的旋转不变性、极小的计算开销和高可靠性.

2 分析与定义

2.1 典型形状的轮廓分析

尽管物体表面可能非常复杂,但激光测距传感器获得的单条扫描线却总由一些简单轮廓构成.图1为典型轮廓的分布示意图,实心点为轮廓扫描点,空心圆圈标记出轮廓特征点.

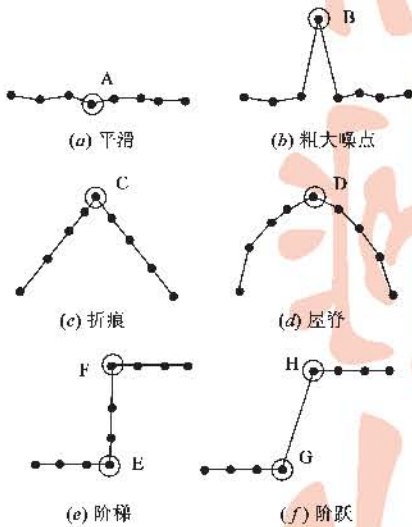


图1 典型扫描线轮廓

2.2 系数定义

本文通过定义一些新系数来对边缘特性进行数学描述,图2示意了一些基本参数.

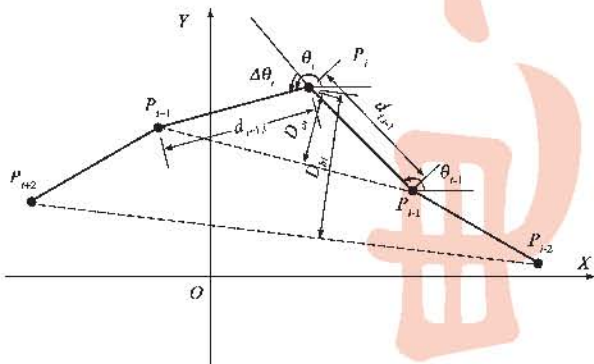


图2 基本系数定义

2.2.1 转角($\Delta\theta_i$)

在点 P_i 处,将 $\overline{P_i P_{i+1}}$ 与 +X 轴间的夹角定义为 θ_i . 转角($\Delta\theta_i$)表征了扫描线在 P_i 处的转向程度.

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1} \quad (1)$$

2.2.2 点-点距及相关的系数

在锐利的边缘处,比邻的数个点间距变化剧烈.组

合以下2个系数可刻画这一特征.

(1) 点-点距差(ΔDPP)

无符号的 ΔDPP 可作为连续3点间距变化的度量. 其中, $d_{i,i+1}$ 和 $d_{i-1,i}$ 是 P_{i-1} , P_i 和 P_{i+1} 相邻两点间的无符号距离.

$$\Delta DPP_i = |d_{i+1,i} - d_{i,i-1}| \quad (2)$$

(2) 点-点距比(RPP)

连续3点间距离变化的相对程度用点-点距比(RPP)来反映,令其始终大于1.

$$RPP_i = \max\left\{\frac{d_{i,i+1}}{d_{i-1,i}}, \frac{d_{i-1,i}}{d_{i,i+1}}\right\} \quad (3)$$

2.2.3 点-弦距及相关的系数

在屋顶型边缘处,扫描点表现为局部峰或谷,它左右两侧的邻点均沿同一侧与其分离,且没有波动或迂回.本文组合以下2个系数对其进行数学表达.

(1) 点-弦距差(ΔDPC)

D_{ai} 和 D_{bi} 定义如图2所示.沿着折线 $P_{i-1} \rightarrow P_i \rightarrow P_{i+1}$ 走向观察,若弦 $\overline{P_{i-1} P_{i+1}}$ 位于折线左侧,则定义 D_{ai} 符号为正,反之为负.对 D_{bi} 使用相同的符号定义规则.式(4)定义了一个无符号的点-弦距差(ΔDPC),来表征 P_i 与其邻点分离的绝对程度.

$$\Delta DPC_i = ||D_{bi}| - |D_{ai}|| \quad (4)$$

(2) 点-弦距比(RPC)

无符号的点-弦距比(RPC)可表征 P_i 与其邻点分离的相对程度.

$$RPC_i = \left| \frac{D_{bi}}{D_{ai}} \right| \quad (5)$$

3 原理与方法

在上述分析和系数定义的基础上,可根据给定的视觉任务制定出判别规则.边缘检测任务通常包含两个基本步骤:粗大噪点去除和边缘检测.

3.1 粗大噪点去除

粗大噪声通常由室外环境中的雨、雪、大颗粒尘土等引起.偶尔,待测目标上的暗点或镜面点也会带来粗大噪声.粗大噪点在光滑的扫描线中引入了一个尖脉冲(如图1的B点),具有极大的转角 $\Delta\theta_i$ 和很大的点-弦距 D_{ai} .粗大噪点去噪算法如图3所示, Φ_{noise} 和 D_{noise} 分别是针对粗大噪点的判别转角和点-弦距判别阈值.

3.2 边缘检测

每个边缘点均有较大的转角值($\Delta\theta_i$),但小于粗大噪点. Jiang 等^[7]将边缘划分为三类:跳变、折痕和平滑.根据前述轮廓分析,本文将边缘分为简单的两类:阶跃型和屋顶型.

(1) 阶跃边缘点具有较大的“点-点距比”,如图1的

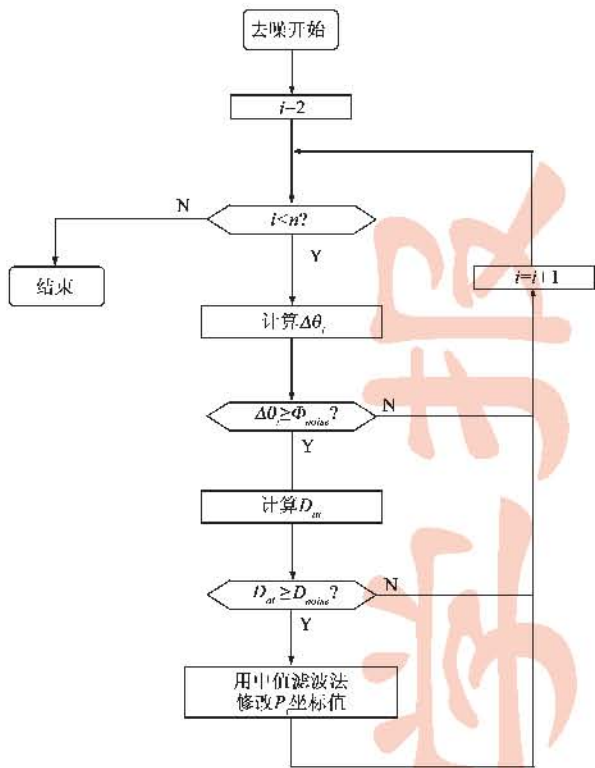


图3 粗大噪声去噪算法流程

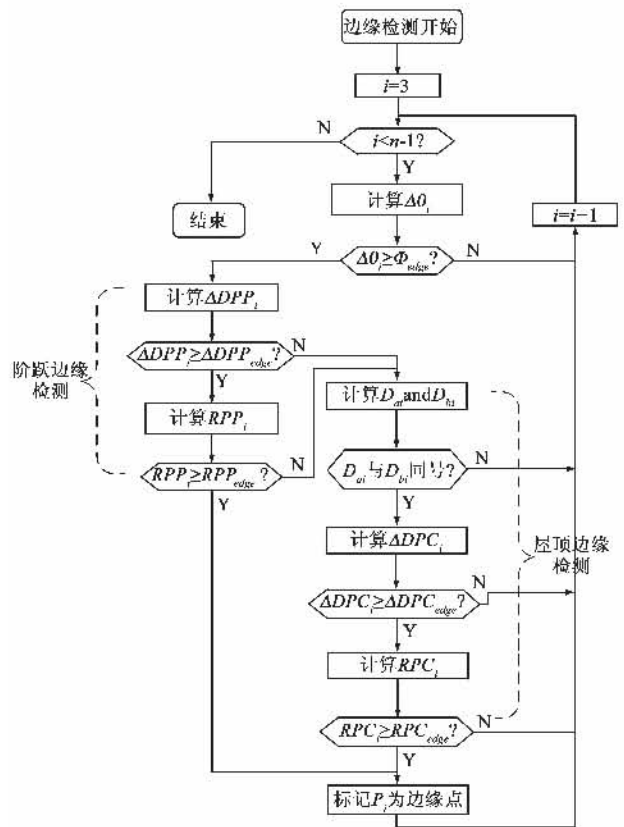


图4 边缘检测整合算法流程

点 E、F、G、H。

(2) 屋顶边缘则具有两个“点-弦距”同号,且“点-弦距比”较大的特点,如图 1 的点 C、D。

综合上述规则,制定边缘检测算法流程如图 4。图中 Φ_{edge} 、 DPP_{edge} 、 RPP_{edge} 、 ΔDPC_{edge} 和 ΔRPC_{edge} 分别是对应系数的判别阈值,且要求 $\Phi_{edge} < \Phi_{noise}$ 。为了获得最高的计算效率,可将去噪和边缘检测两个算法进行整合。

3.3 基于候选点的参数学习法

上述方法涉及 6 个判别参数,对一个给定视觉任务而言,这些参数由多个条件所决定:如传感器分辨率、测量准确度、检测精度要求、目标的朝向和轮廓形状等。本文提出基于候选点的参数自学习法进行系数取值。基本步骤如下:

- (1) 在 3D 扫描图像中根据目标位置和形状选取若干条具有显著特征的扫描线;
- (2) 针对每条扫描线,选取各预期边缘点,并赋予其边缘类型属性:粗大噪点、阶跃边缘或屋顶边缘;
- (3) 计算所有候选粗大噪点对应的最小 Φ_{noise} 和 D_{noise} 值;
- (4) 计算所有候选阶跃边缘点对应的最小 Φ_{edge} 、 ΔDPP_{edge} 和 RPP_{edge} 值;
- (5) 计算所有候选屋顶边缘点对应的最小 Φ_{edge} 、 ΔDPC_{edge} 和 RPC_{edge} 值;
- (6) 设定一定容差,综合得出最终参数集。

4 实验与评估

4.1 实物扫描实验

采用外伸梁将激光雷达云台悬挂于室内,雷达前窗铅直俯视地面。扫描对象为 1 个课桌和 1 把椅子。在单扫描线轮廓中,桌和椅可产生 8 个阶跃边缘点,而椅背则产生 1 个屋顶边缘点。在课桌上放置 2 面小镜子,以产生 2 个粗大噪点。

图 5 为 1 条 2D 原始扫描线。图中区域 B 包含待测桌椅,区域 A 和 C 是墙壁和地面的交汇拐角。图 5 区域 B 经过去噪和边缘检测后的结果如图 6 所示。2 个粗大

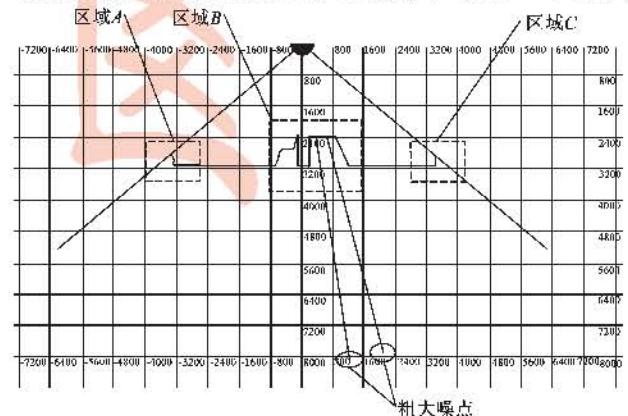


图5 原始2D扫描线

噪点经中值滤波后,用绿色方框标记.9个边缘点均被准确检测出,红色方框标识阶跃边缘,蓝色方框标识屋顶边缘.处理后的3D图像全局渲染结果如图7所示,边缘点以深棕色标记.

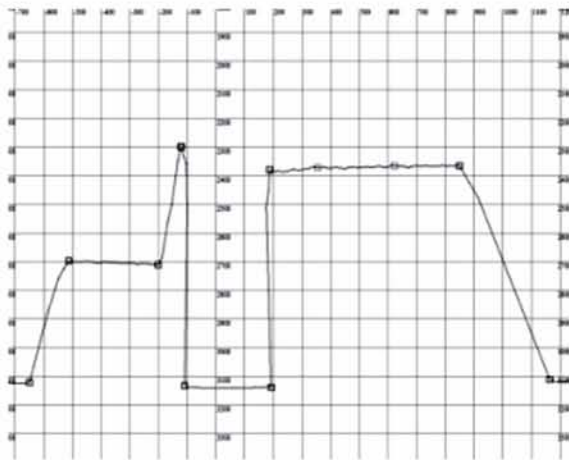


图6 处理后的2D扫描线



图7 处理后的3D表面轮廓

4.2 性能评估分析

4.2.1 计算复杂度

本文检测算法主要分为3个阶段:属性计算,粗大噪点去除和边缘检测.

(1)属性计算:计算每点各个系数值.包含 $d_{i-1,i}$ 、 $\Delta\theta_i$ 与 $D_{\alpha}(D_{\beta})$ 计算3个子步骤.计算复杂度为 $3O(n)$.

(2)噪点去除:仅根据给定判别阈值对 $\Delta\theta_i$ 和 D_{α} 做判别.若目标点被判为粗大噪点,则用中值滤波对其进行平滑处理.因粗大噪点数量较少,故计算复杂度为 $O(n)$.

(3)边缘检测:先比较 $\Delta\theta_i$ 与 Φ_{edge} ,若超限再按需计算其它4个系数.在最佳情况下(无边缘点)计算复杂度为 $O(n)$,而最差情况(所有点均为边缘点)为 $O(3n)$.

将上述3个阶段在算法中直接串联,即为普通模式算法.若将3个阶段进行深度集成,则可得到整合模式算法.

4.2.2 时间开销

试验中的单条扫描线含有401个点,含2个粗大噪点和11个边缘点.试验平台配置为:Pentium IV 2.66 GHz CPU和1 GB DDRII 667 MHz内存.表1列出本文2种算法模式的计算性能实验结果.

表1 算法的计算性能

参数	符号	普通模式	整合模式
最佳复杂度	CC_b	$5O(n)$	$O(2n) + O(n)$
最差复杂度	CC_w	$4O(n) + O(3n)$	$O(2n) + O(3n)$
去噪(ms)	$T_{denoise}$	4.1770	0
检测(ms)	T_{detect}	12.0299	0.147128
合计(ms)	T_{total}	16.2069	0.147128
时钟周期	CP_{total}	45183895	447403
CPU 占用率	COR	13.04%	17.05%
净耗时(ms)	T_{net}	2.113370	0.025085
净时钟周期	CP_n	5891980	76282

注:所有数据均为20次结果的算术平均值.

4.2.3 稳定性

系统误差会在扫描线上引起的小幅值波纹仅会产生较小的转角($\Delta\theta_i$).当判别参数选取合适时,这些小波纹中的奇异点很容易与粗大噪点和边缘点相区分.由图7可以看出系统噪声没有对算法稳定性造成不利影响.

由于本文涉及的判别系数均采用扫描点、线间的距离及其比值,所以此方法具有内在的平移和旋转不变性.若根据检测目标尺度自适应的调整判别参数,则可以实现识别的尺度不变性.

4.2.4 误差分析与标定

对一些特殊的奇异点,采用常规的“假设-检验法”进行参数试取难以奏效.例如,落在光滑过渡拐角的2个邻点,常被同时判为边缘点.对于这种情况,选取最具边缘特征的点进行一两次参数学习,即可收敛出满意的系数集识别所有边缘点.表2列出本文实例的参数集.

将3D图像裁剪成图7所示的 200×200 像素区域,经人工确认的理想边缘点1145个,粗大噪点11个.用表2所列参数集识别边缘点1140个(其中误检2个,识别率99.39%),粗大噪点11个(识别率100%).误检和漏检的主要原因是,在与雷达相距较远的区域偶尔存在局部小尺度边缘,引起识别参数集难以适应.在考虑局部面域特征条件下,可通过局部自适应参数学习加以改进.

本文实验所用的2D激光雷达测距准确度为 $\pm 35\text{mm}$.通过对多个标

参数	量纲	数值
Φ_{noise}	degree	179.77
D_{noise}	mm	5192.68
Φ_{edge}	degree	45.12
ΔDPP_{edge}	mm	11.53
RPP_{edge}		2.24
ΔDPC_{edge}	mm	5.00
RPC_{edge}		1.15

准物体不同距离的行扫描识别,辅以多个电子罗盘进行实验平台姿态校正与标定,形成变距离多尺度的测距补偿值表.校正后的检测器,对距离2500mm的边缘定

位准确度约为 $\pm 12\text{mm}$ 。

4.3 同类技术对比

因缺乏其他类似边缘检测算法的实现细节,且许多文献未提供实验图像的点数、边缘数、计算时间等数据。本文仅根据文献中的有限实验数据进行对比,如表 3 结果表明本文方法的计算效率得到了大幅改进。

表 3 算法的计算性能

项目	本文	Sappa ^[8]	Jiang ^[9]
总点数	20000	400419	65536
边缘点数	1140	144005	N/A
总耗时(s)	0.1386	658.22	2.60
每边缘点耗时(ms)	0.1216	4.5708	N/A
CPU@Memory	2.66 GHz @1 GB	400 MHz @256 MB	40 MHz @32 MB

5 结论与展望

本文从扫描线中粗大噪点和边缘点的分布规律分析出发,定义数个新系数对扫描线进行特征描述,并以此建立对应的判别准则,构建对 2D 距离扫描线进行去噪和边缘识别的极速检测器。所涉及的系数与判别规则采用点-点、点-线的距离及其比值,故本方法对于平移、旋转等几何变换均具有内在不变性,可适用于任何传感器安装视角的视觉检测任务,并可通过自适应参数来实现尺度不变性。文中给出基于候选点的参数自学习法来确定相关识别参数。通过实物扫描实验与综合评估表明,该检测器具有极高的运行效率、检测准确性、鲁棒性和可扩展性,可适用于对运行效率要求极为苛刻的工业应用场合。

后续的研究工作将主要针对以下问题:

(1)提高本检测器的边缘定位精确性计划引入虚拟点来进一步逼近真实边缘。

(2)检测器向 3D 空间的扩展准备采用定义多维系数和判别准则的方法,将多条扫描线之间的信息融入检测之中。

(3)引入并行计算进一步提升处理性能不仅要设计多条扫描线并发处理方法,还要对单条扫描线进行分割以并行计算。

参考文献:

- [1] 赵继印,徐艳蕾,焦玉斌.基于顺序形态学的图像边缘检测快速算法的研究[J].电子学报,2008,36(11):2195-2199.
ZHAO Ji-yin, XU Yan-lei, JIAO Yu-bin. The fast arithmetic study of image edge detection based on the order morphology [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(11): 2195 - 2199. (in Chinese)

- [2] Dongquan Liu, Gleb V Nosovskiy, Olga Sourina. Effective clustering and boundary detection algorithm based on Delaunay triangulation [J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(9): 1261 - 1273.
- [3] 刘佳敏,周荫清.一种基于小波变换的雷达图像边缘提取方法[J].电子学报,2003,31(12):1780-1783.
LIU Jia-min, ZHOU Yin-qing. A SAR Image Edge Extraction Method Based on the Wavelet Transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1780 - 1783. (in Chinese)
- [4] Y J Zhang. Quantitative study of 3D gradient operators [J]. Image and Vision Computing, 1993, 11(10): 611 - 622.
- [5] Shiming Zhan, Rajiv Mehrotra. A zero-crossing-based optimal three-dimensional edge detector [J]. CVGIP Image understanding, 1994, 59(2): 242 - 253.
- [6] H M Chung, P Cohen, P Boulanger. Multiscale edge detection and classification in range images [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Cincinnati, OH, USA: IEEE, vol 3, 1990. 2038 - 2044.
- [7] Xiaoyi Jiang, Horst Bunke. Edge detection in range images based on scan line approximation [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 73(2): 183 - 199.
- [8] Angel D Sappa, Michel Devy. Fast range image segmentation by an edge detection strategy [A]. Proceedings of the Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling [C]. Quebec City, Que, Canada, 2001. 292 - 299.
- [9] Xiaoyi Jiang, Horst Bunke. Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping [J]. Machine Vision and Applications, 1994, 7(2): 115 - 122.

作者简介:



王 建 男,1980年3月出生于江苏南京。IEEE 学生会员、中国机械工程学会学生会员。分别于 2001、2005 年在南京航空航天大学获得工学学士、工学硕士学位。2005 年进入上海交通大学机械与动力工程学院攻读博士学位,从事计算机视觉、装备自动化方面研究。
E-mail: wjconan@126.com



姚振强 男,1964年9月出生于山西运城。教授、博士生导师。1986年、1989年和1993年在上海交通大学获工学学士、工学硕士和工学博士学位。现为上海交通大学制造技术与装备自动化研究所所长,主要从事数控技术、先进制造技术、装备自动化等方面的研究。