

文章编号 1004-924X(2010)07-1654-07

改进型图像中的直线快速检测

赵小川^{1,2}, 罗庆生², 陈少波²

(1. 中国兵器工业计算机应用技术研究所, 北京 100089; 2. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

摘要: 为提高数字图像中的直线的检测速度, 从时频域变换和空间域变换两个角度出发, 提出了一种改进型数字图像中直线快速检测方法。首先, 采用小波提升提取图像中的低频轮廓信息, 抑制高频噪声。然后, 对像素降低后的图像进行二值化处理; 基于“两点确定一条直线”以及 Hough 变换过程中“图像空间中一条直线上的多个点对应参数空间中一个点”的原理, 按照从局部到整体的检测顺序, 将二值化后图像空间中的非零点映射到参数空间中具有较大存在概率的累加单元, 而不是所有可能的累加单元。最后, 对累加单元进行统计, 以确定图像中直线的参数。利用该方法对一幅像素为 128×128 的数字图像进行直线检测, 耗时为 213 ms。该方法有效地提高了数字图像中直线检测的实时性。

关键词: 特征检测; 直线检测; 图像处理; Hough 变换; 小波提升

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1654

Improved fast line detection method in images

ZHAO Xiao-Chuan^{1,2}, LUO Qing-sheng², CHEN Shao-bo²

(1. *Computer Application Technology Institute of China North Industries Group Corporation, Beijing 100089, China;*

2. *School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: In order to improve the detection speed for lines in digital images, an improved detection method was proposed by combining the time-frequency domain transform and the spatial domain transform. Firstly, the wavelet lifting was used to extract the low frequency profile information and to restrain high frequency noises. Then, the gradient of a image was computed to obtain a binary image. On the basis of the principles that a line can be determined by two points and a line in the image is mapped to a point in the Hough Transform, the non-zero pixels were mapped into the accumulator cells with great probability instead of all accumulator cells following the detection sequence from the local to the global. Finally, the accumulator cells were counted to determine the parameters of lines in the image. It costs 213 ms to detect lines in the image with pixels of 128×128 by using the method proposed in this paper, which increases the detection speed for lines in images effectively.

Key words: feature detection; line detection; image processing; Hough transform; wavelet lifting

收稿日期: 2009-07-24; 修订日期: 2009-11-03.

基金项目: 部委级重点基金资助项目 (No. 6140528)

1 引言

随着数字信号处理技术和计算机技术的发展,机器视觉正得到广泛而深入的研究。如何正确、快速地识别目标的特征信息,已成为机器视觉领域的研究热点^[1-2]。直线是图像中物体的基本特征之一,一些人造目标如房屋、道路、桥梁具有明显的直线特征,而一般物体平面图像的轮廓也可以表示为直线及弧线的组合,进而对物体轮廓的检测可以转化为对这些基本元素的识别和提取。因此,研究图像中直线的检测算法对图像理解和模式识别具有重要意义^[3-5]。

Hough 变换具有抗噪声干扰能力强、对边缘间断不敏感等特性而被广泛应用于基于机器视觉的目标特征检测当中。文献[6]用 Hough 变换来检测交通标志图像的直线特征;SHI W Z 等人运用 Hough 变换对遥感图像中的特征直线进行识别^[7];文献[8]提出了一种利用先验知识和 Hough 变换相结合的车牌字符分割算法。但是,Hough 变换运算量大、占用内存多,基于 Hough 变换的直线检测算法不能直接应用于对实时性要求较高的场合,因此已成为限制其发展的瓶颈。

为此,相关学者提出了多种改进算法。GALAMBOS C 等人利用梯度信息以降低 Hough 变换的计算量,但由于量化误差的存在导致直线方向确定不准确^[9];文献[10]提出了一种改进的 Hough 变换,可实现峰值点的自动搜索填充,但该算法对图像的预处理要求较高,否则会产生大量的无效累积效应;KYRKI V 等人提出了一种局部检测和全局检测相结合的改进的直线检测算法,可以有效地提高变换速度、降低内存占用量,但该算法的抗干扰能力较差^[11]。

针对上述问题,本文从时频域变换和空间域变换两个角度出发,提出了一种改进的直线快速检测算法。

2 Hough 变换的基本原理及其不足

Hough 变换是对二值图像进行直线检测的有效方法,其实质是对图像进行坐标变换,将图像

空间的点映射到参数空间,使变换后的结果便于检测和识别。如图 1 所示,图像空间的一条直线 l 可由式(1)所示的参数方程表示:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (0 \leq \theta \leq \pi), \quad (1)$$

其中: ρ 为坐标原点 O 到直线 l 的距离, θ 为坐标原点到直线 l 的垂线与 x 轴正方向的夹角。根据式(1)可将图像空间中的任意一点 (x, y) 转换到以 ρ, θ 为坐标轴的参数空间。Hough 变换具有如下性质:

- (1)在图像空间中直角坐标系下的一个点映射为在参数空间极坐标系下的一条曲线;
- (2)在图像空间中直角坐标系下的一条直线映射为在参数空间极坐标系下的一族有公共交点的曲线;
- (3)在参数空间中极坐标系下的一个点对应图像空间直角坐标系下的一条直线。

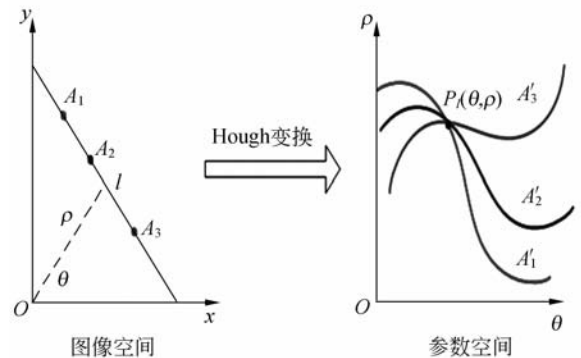


图 1 Hough 变换原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Hough transform

利用 Hough 变换的上述性质可对二值图像中的直线进行检测,过程如下:设一幅二值图像的像素为 $M \times N$ ($N \geq M$), $\rho \in [-\sqrt{2}N, \sqrt{2}N]$, $\theta \in [0, \pi]$,将参数空间量化成 $m \times n$ (m 为 θ 的等分数, n 为 ρ 的等分数)个累加单元,并将每个累加单元的初始值设为 0。对于图像空间的每一个非零点 (x, y) 在参数 θ 的每个区间内根据式(1)计算 ρ 的值,并将对应参数空间的累加单元加 1。最后统计参数空间中所有累加单元的值,大于阈值的累加单元所对应的 ρ 和 θ 的值便是图像空间内直线的参数。

运用 Hough 变换来检测直线具有较强的鲁棒性,可以有效地排除噪声的干扰和解决图像经

过二值化后线条出现间断的问题,但其运算量过大,占用内存多的缺点也显而易见。对上述像素为 $M \times N (N \geq M)$ 的二值图像运用 Hough 变换来检测直线,其运算复杂度为 $O(M \times N \times m)$,所占用的存储空间为 $2\sqrt{2} \times N \times m + I (I$ 为图像所占的存储空间)。

3 改进的直线快速检测算法的原理

针对 Hough 变换存在的运算量大、内存占用多的缺点,本文从时频域变换和空间域变换两个角度出发,提出了一种改进的直线快速检测算法。如图 2 所示,该算法主要包括小波提升、二值化处理和改进的 Hough 变换 3 个步骤。小波提升主要是用于提取图像低频轮廓信息、抑制高频噪声;然后,对像素降低后的图像采用微分算子进行二值化处理;再次,基于“两点确定一条直线”以及 Hough 变换过程中“图像空间中同一直线上的多个点对应参数空间中一个点”的原理,对 Hough 变换进行了改进:将二值化后图像空间中的非零点映射到参数空间中具有较大存在概率的单元而不是所有可能的单元。

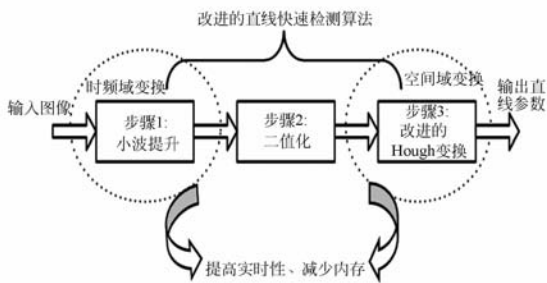


图 2 改进的直线检测算法步骤示意图

Fig. 2 Procedure of improved line detection algorithm

3.1 小波提升

小波变换是一种时频分析方法,具有多分辨率分析功能,被誉为“数字放大镜”。小波提升是一种更为快速有效的小波变换实现方法,被称为第二代小波变换。小波提升不依赖于傅里叶变换,继承了第一代小波的多分辨率的特征,小波变换后的系数是整数,无需额外的内存,可用本位操作进行运算,能够实现任意图像尺寸的小波变换。Daubechies 和 Sweldens 等已经证明,借助于因子

化小波变换,所有小波变换都能够用小波提升模式来实现^[12]。

本文在构建低分辨率图像的过程中采用了小波提升。考虑信号 $s^j = \{s_{j,l} | 0 \leq l < 2^j\}$,它经过一级小波变换后得到的低频信号为 s^{j-1} 和 高频信号 d^{j-1} 。小波提升主要由分裂(Split)、预测(Predict)和更新(Update)组成。下面讨论每一个实现步骤:

① 分裂:将输入信号 s^j 分为奇、偶两个子集。位于偶下标位置的元素构成的集合记为 $even_{j-1} = \{s_{j,2l} | 0 \leq l \leq 2^{j-1} - 1\}$;位于奇下标位置的元素构成的集合记为 $odd_{j-1} = \{s_{j,2l+1} | 0 \leq l \leq 2^{j-1} - 1\}$ 。

② 预测:在基于原始数据相关性的基础上,用偶数序列的预测值去预测(或者内插)奇数序列。

③ 更新:更新的目的是要找一个更好的子集 s^{j-1} ,使其保持原图的某一标量特性 $Q(x)$ (例如均值不变)即

$$Q(s^{j-1}) = Q(s^j), \quad (2)$$

对于小波提升,存在分裂算子 $Split$ 、预测算子 P 和更新算子 U ,使得:

$$(even_{j-1}, odd_{j-1}) = Split(s^j), \quad (3)$$

$$d^{j-1} = odd_{j-1} - P(even_{j-1}), \quad (4)$$

$$s^{j-1} = even_{j-1} + U(d^{j-1}), \quad (5)$$

一幅像素为 $M \times N$ 的图像,经过一次小波提升后,取其低频分量构建低分辨率图像,其像素为 $\frac{M}{2} \times \frac{N}{2}$ 。而在原始图像中任意一条用(1)式表示的直线,其在所构建的低分辨率图像当中 θ 保持不变, ρ 缩短为原来的一半。此外,由于噪声大多分布在图像的高频部分,因此基于小波提升所构建的低分辨率图像有效地抑制了高频噪声。

3.2 改进的 Hough 变换

Hough 变换是一种全局坐标转换^[13-14]。但是,如果能在局部初步确定一些可能存在的直线后再推广到全局进行有针对性的检测,便可以减少检测的盲目性,有效地提高算法的效能。本文以此为出发点,根据“两点确定一条直线”以及 Hough 变换过程中“图像空间中同一直线上的多个点对应参数空间中一个点”的原理,对 Hough 变换进行了改进,具体实现步骤如下:

(1)在二值图像中顺序搜索,将搜索到的图像中的第一个非零点作为基准点 $A(x_a, y_a)$,并顺序选择以 $A(x_a, y_a)$ 为起始点的一个子区域 $R(r \times r$ 个像素);

(2)在该子区域中顺序搜索其他的非零点 $B_i(x_i, y_i)$,根据式(6)计算每个非零点 $B_i(x_i, y_i)$ 与 $A(x_a, y_a)$ 所属直线的参数对 (ρ_i, θ_i) ;

$$\begin{cases} \theta_i = \arctan\left(\frac{y_a - y_i}{x_a - x_i}\right) \\ \rho_i = x_i \cos \theta_i + y_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (6)$$

(3)设 ρ 的偏差范围为 $\delta\rho$, θ 的偏差范围为 $\delta\theta$,统计每个参数区间 $(\rho_i + \delta\rho, \theta_i + \delta\theta)$ 中参数对的个数 n_i ,找出对应参数个数最大值 n_{\max} 的参数区间,并以参数 (ρ_i, θ_i) 作为通过 $A(x_a, y_a)$ 点的直线的参数;

(4)设定阈值 L_1 ,判断 n_{\max} 与阈值 L_1 的关系,当 $n_{\max} \geq L_1$ 时,将参数空间跳转至步骤(5),当 $n_{\max} < L_1$ 时,则将 $A(x_a, y_a)$ 点清零,跳转至步骤(1);

(5)将搜索范围扩展至除子区域 $R(r \times r$ 个像素)以外的部分,对检测到的每个非零点 $C(x_c, y_c)$,取 $\theta_c = \theta_i$,根据(6)式计算 ρ_c ,若满足

$$|\rho_i - \rho_c| \leq \delta\rho, \quad (7)$$

则认为 $C(x_c, y_c)$ 属于该直线,并在参数空间对该直线的累加器加1,然后将 $C(x_c, y_c)$ 设为0;

(6)全图搜索完毕后,将 $A(x_a, y_a)$ 点清零,跳转至步骤(1),重新搜索,直到图像中不再有非零点时结束;

(7)统计参数空间中各累加器中的数值并与阈值 L_2 相比较,若大于阈值则认为直线存在;反之则认为直线不存在。

4 算法复杂度分析

4.1 空间复杂度分析

空间复杂度是指算法在计算机内执行时所需存储空间的度量^[15-16]。对于本文所提出的直线快速检测算法,由于小波提升无需额外的存储空间,算法所占用的存储空间主要分为以下几个部分:第一部分为用于存储图像的内存空间 I ;第二部分存储空间是用于存储检测出的直线的相关参数(包括 $\rho_i, \theta_i, n_{\max}$),设图像中有 l_n 条直线,则存

储这些直线的相关参数所需的存储空间为 $3l_n$;第三部分为在子区域 $R(r \times r$ 个像素)中确定直线时所用的存储空间,设子区域 R 中最多的非零点个数为 N_r ,基准点 A 与其余每个非零点确定一条直线,则这些直线所需的存储空间为 $3(N_r - 1)$ 。因而,本文所提出的改进的直线快速检测算法所占用的总的存储空间为:

$$D = I + 3l_n + 3(N_r - 1). \quad (8)$$

4.2 运算复杂度分析

本文所提出的直线快速检测算法的运算量包括以下几个部分:第一部分为对一幅 $M \times N$ 图像进行小波提升的运算量,该运算量为 $2M \times N$;第二部分为对进行小波提升后的低分辨率的图像进行边缘检测的运算量 C_e ;第三部分为进行改进的 Hough 变换的运算量,根据改进的 Hough 变换的检测过程可知,其运算量为 $N_f(N_f - 1) + l_n N_f$,其中, N_f 为二值图像中非零点的个数, l_n 为图像中直线的条数。因此,本文所提出的改进的直线快速检测算法的运算量为:

$$C = 2M \times N + C_e + N_f(N_f - 1) + l_n N_f. \quad (9)$$

5 实验结果与分析

本算法的性能测试实验是在主频为 1.5 GHz 的 Pentium 处理器的 Matlab 环境下进行的。用于测试图像(如图3所示)的像素为 256×256 ,其中存在着大量的噪声。

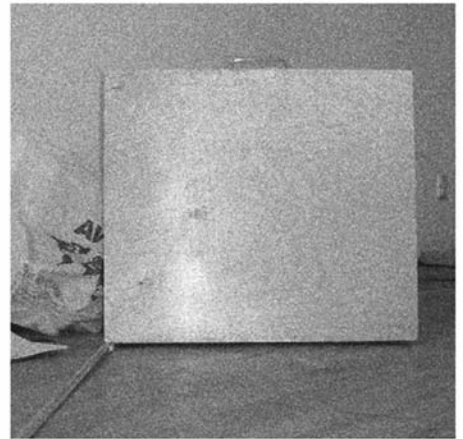


图3 输入的测试图像

Fig. 3 Input image

图 4 为直接对输入图像采用 Prewitt 微分算子进行二值化处理后的结果。从图中可以看出二值化后的图像中依然存在着大量噪声且物体的边缘出现了间断现象。图 5 是对输入图像进行一次小波提升后再采用 Prewitt 微分算子进行二值化处理后的结果,与图 4 对比可知,图像的大小变为原来的 $\frac{1}{4}$,高频噪声得到了抑制,物体的边缘变得清晰但仍存在间断现象。

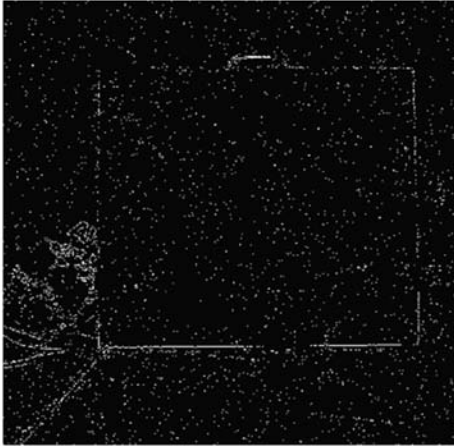


图 4 二值化图像
Fig. 4 Binary image

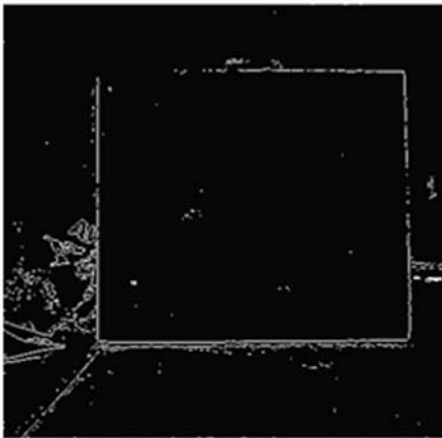


图 5 经小波提升后的二值化图像
Fig. 5 Binary image after wavelet lifting

图 6 为对图 3 所示的输入图像二值化后直接运用 Hough 变换映射到参数空间的结果,图 7 为运用本文所提出的直线检测算法映射到参数空间的结果。对比图 6、图 7 可知,本文所提出的直线检测算法的运算量和内存占用量比基于 Hough 变换的直线检测算法明显减少。对图 7 中的累加

单元进行统计,读取大于阈值的累加器所对应的直线参数值(ρ, θ),则($2\rho, \theta$)便为输入图像中所对应直线的参数值。将通过可见准确地检测出了本算法检测到的直线映射回输入图像中,结果如图 8 所示,图像中的全部直线被。

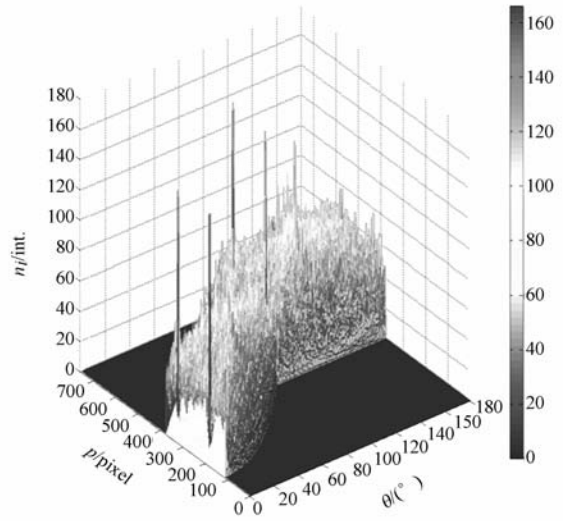


图 6 运用 Hough 变换将二值图像映射到参数空间的结果
Fig. 6 Mapping binary image into parameterized space using the Hough transform

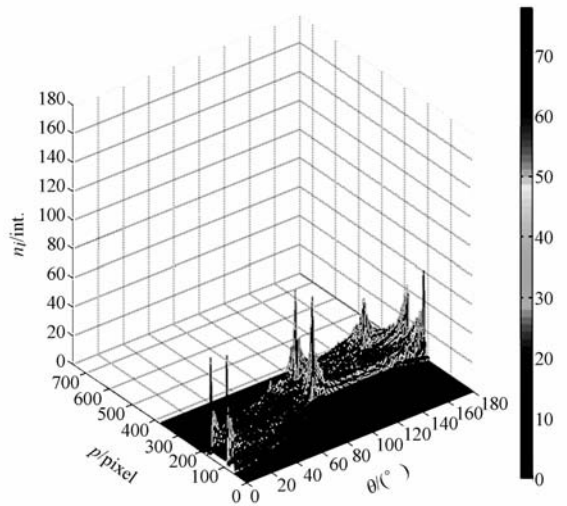


图 7 运用本文所提出的直线检测算法的映射结果
Fig. 7 Mapping binary image into parameterized space using the line detection algorithm proposed in this paper

用不同大小的图像进行了多组对比实验(实验中 Hough 变换的角度分度级为 1°),实验结果如表 1 所示。通过对比实验结果可知,本文所

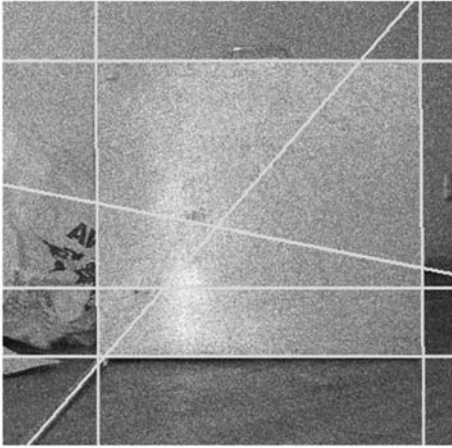


图8 运用本文所提出的算法检测直线的结果

Fig.8 Detection result using the algorithm proposed in this paper

表1 对比实验结果

Tab.1 Experimental results

待检测图像的大小 /pixel	基于 Hough 变换 检测直线算法	本文所提出的 直线检测算法
	耗时/ms	耗时/ms
32×32	166	42
64×64	357	83
128×128	917	213
256×256	1833	423
512×512	5 260	991

参考文献:

- [1] SIAGIA C, ITTI L. Rapid biologically-inspired scene classification using features shared with visual attention[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(2): 300-312.
- [2] GUILHEMRE N, DESONZ A, AVINASH C K. Vision for mobile robot navigation: a survey[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(2): 237-267.
- [3] 王华章, 何小海, 宰文姣. 基于局部和全局特征融合的图像检索[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 1098-1044.
- WANG H ZH, HE X H, ZAI W J. Image retrieval based on combining local and global features[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 1098-1104. (in Chinese)
- [4] HUANG K Y, YOU J D, CHEN K J. Hough transform neural network for seismic pattern detec-

提出的直线检测算法的实时性要优于基于 Hough 变换的直线检测算法,而且随着待检测图像像素值的升高,这种优势越发明显。

6 结 论

针对运用 Hough 变换检测图像中的直线过程中存在运算量大、内存空间占用多的问题,本文提出了一种改进型直线快速检测方法,将小波提升和改进的 Hough 变换相结合,有效地抑制了高频噪声,提高了数字图像中直线的检测速率。利用该方法对一幅像素为 128×128 的图像进行检测,耗时为 213 ms。表明该方法有效地提高了对数字图像中直线检测的实时性,可应用于遥感图像分析、目标特征识别和机器人导航等领域。

tion[C]. *Proceedings of 2006 IEEE International Joint Conference on Neural Network*, 2006: 2453-2458.

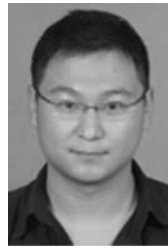
- [5] 张建伟, 张启衡. 基于快遍历的直线边缘特征提取[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 662-668.
- ZHANG J, ZHANG Q H. Line-edge feature extraction based on ergodic block[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 662-668. (in Chinese)
- [6] 陈洪波, 王强, 徐晓蓉, 等. 用改进的 Hough 变换检测交通标志图像的直线特征[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 1111-1118.
- CHEN H B, WANG Q, XU X R, et al. Line detection in traffic sign image based on improved Hough Transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1111-1118. (in Chinese)
- [7] SHI W Z, SHAKER A. The line-based transformation model (LBTM) for image-to-image registration of high-resolution satellite image data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3001-3012.
- [8] NUNN C, KUMMERT A, MULLER-SCHNEIDE-

- NS S. A two stage detection module for traffic signs [C]. *Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2008; 271-275.
- [9] GALAMBOS C, KITTLER J, MATAS J. Gradient based progressive probabilistic Hough transform [J]. *Image Signal Processing*, 2001, 148(3): 158-165.
- [10] 丁幼春, 陈红. 基于 HT 的多条直线的检测特点及其算法改进[J]. *华中农业大学学报*, 2008, 27(6): 802-806.
DING Y CH, CHEN H. The characteristic and improved arithmetic in the multi-line detection based on Hough transformation [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2008, 27(6): 802-806. (in Chinese)
- [11] KYRKI V, KALVIAINEN H. Combination of local and global line extraction [J]. *Real-time Imaging*, 2000, 6(2): 79-91.
- [12] DAUBECHIES I, SWEIDENS W. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. *Journal of Fourier Analysis and Applications*, 1998, 4(3): 247-269.
- [13] DAHYOT R. Statistical Hough transform [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(8): 1502-1509.
- [14] VONGIOI R G, JAKUBOWICZ J, MOREL J M. On straight line segment detection [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2008, 32(3): 313-347.
- [15] 王建勇, 周晓光, 廖启征. 一种改进的直线检测算法 [J]. *计算机工程*, 2006, 32(16): 172-173.
WANG J Y, ZHOU X G, LIAO Q ZH. An improved algorithm for line detection [J]. *Computer Engineering*, 2006, 32(16): 172-173. (in Chinese)
- [16] CHOI Y H, LEE T K, OH S Y. A line feature based SLAM with low grade range sensors using geometric constraints and active exploration for mobile robot [J]. *Autonomous Robot*, 2008, 24(1): 13-27.

作者简介:



赵小川(1983—),男,山东青岛人,博士,工程师,主要从事机器人视觉方面的研究。E-mail: zhaoxch1983@sina.com



陈少波(1985—),男,山东烟台人,硕士,主要从事传感器技术的研究。E-mail: hfshy2004@yahoo.cn



罗庆生(1956—),男,湖北武汉人,教授,博士,主要从事特种机器人技术、光机电一体化技术方面的研究。E-mail: luoqsh@bit.edu.cn