

基于统计处理和 B 样条小波变换的 毫米波图像边缘检测

杜慧茜 梅文博 苏广川

(北京理工大学电子工程系, 北京 100081)

摘要 针对毫米波图像噪声强、分辨率低的特点,提出了一种新的边缘检测方法。该方法首先根据统计信号处理理论定义了标准化梯度强度这一物理量;然后采用3次B样条函数的一阶导数作为边缘检测算子,由小波变换后得到的图像水平、垂直方向的高频信息,并根据这些信息确定出标准化梯度强度;接着采用单门限的处理得到图像粗边缘;最后对粗边缘施行非最大抑制处理和滤波来得到检测结果。实验证明,该方法可用固定的单门限自动、快速地检测出毫米波图像中人体背景下物体的边缘,满足安检需要。

关键词 毫米波图像 B样条小波 标准梯度强度 边缘检测

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)11-1445-05

An Edge Detection Approach Based on Statistical Signal Processing and B-Spline Wavelet for Millimeter Wave Images

DU Hui-qian, MEI Wen-bo, SU Guang-chuan

(Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract This paper proposes an edge detection scheme for millimeter wave images, which has low resolution and large noise. It introduces standard gradient strength according to statistical signal processing theory. The basic idea is to employ cubic B-spline as edge detector. The wavelet transform results reflect the variations for images—along horizontal edges and vertical edges, which are used with statistical information together to get the standard gradient magnitude. For each millimeter wave image a fixed and identical threshold is adopted to detect the image edges roughly. Finally, non-maximum suppression phase and a filter are introduced to get the specific edges. The experiment results demonstrate that the scheme is effective and feasible for detecting the edge of the hidden objects on the background of the human body, which meet the real time requirement in custom.

Keywords millimeter wave image, B-spline, standard gradient magnitude, edge detection

1 引言

被动式毫米波辐射计是一种利用物体辐射的能量强度来成像的设备,其成像图像接近于可见光图像,而且对人体安全,可用于海关或机场的安全检查及飞机自动着陆等领域。由于毫米波图像的空间分

辨率不高、噪声较强,若要识别毫米波图像中的物体,则必须对图像进行边缘检测。图像边缘检测历经30多年的发展,已出现了不少方法。但根据毫米波图像的特点,不宜采用对噪声敏感的经典边缘检测方法^[1],而其他算法,如基于神经网络的方法、遗传算法、数学形态学等检测方法及Canny算法^[2]对含噪图像的检测效果虽好于经典方法,但存在一个

基金项目:国家自然科学基金项目(60472021)

收稿日期:2005-08-16; 改回日期:2005-09-18

第一作者简介:杜慧茜(1972~),女,讲师。1998年于北京理工大学电子工程系获硕士学位,现为该校通信与信息系统专业博士研究生。主要研究方向为小波分析与图像处理、模式识别。E-mail: duhuiqian@bit.edu.cn

普遍问题,即门限的确定问题。文献[3]针对毫米波图像提出了一种自适应求门限的方法;文献[4]提出用标准化梯度强度这一物理量来对可见光图像进行边缘检测,该物理量是图像沿水平、垂直方向梯度的二次型,方法的优点是处理不同图像时,可以采用相对固定的门限,其缺点是检测过程复杂、计算量大。本文在文献[4]的基础上,提出一种新的毫米波图像边缘检测算法。该方法重新给出了标准化梯度强度的定义,与文献[4]方法不同,该方法由于无需对矩阵求逆,仅对图像沿水平、垂直方向梯度进行归一化,因此减小了计算复杂度;同时采用3次B样条小波边缘检测算子,可以方便实现多尺度检测;在检测过程中,还提出用单门限处理,再进行非最大抑制的策略,这样既可以减少耗时的插值运算,也省去了双门限处理必须进行的边缘再判断过程。实验结果证明,该方法可以快速、有效进行毫米波图像的边缘检测。

2 B 样条小波边缘检测

Mallat 在文献[5, 6]中提出用 B 样条小波做极值检测,其基本方法是以 n 次 B 样条函数作为平滑函数,其一阶导函数为基本小波函数。 n 次 B 样条函数的定义为

$$\beta^n(x) = \beta^n * \beta^{n-1}(x) = \sum_{j=0}^{n+1} \frac{(-1)^j}{n!} \binom{n+1}{j} \left[x + \frac{n+1}{2} - j \right]_+^n \quad (1)$$

式中, $\binom{n+1}{j} = \frac{(n+1)!}{(n+1-j)!j!}$, $[x]_+ = \max\{0, x\}$ 定义 2 维平滑函数为

$$\theta(x, y) = \beta^n(x)\beta^n(y) \quad (2)$$

以 2 维平滑函数沿 x, y 方向的一阶导数作为以下两个基本小波函数

$$\psi^{(1)}(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x} \quad (3)$$

$$\psi^{(2)}(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} \quad (4)$$

对式(3),式(4)做尺度伸缩,则得到以下两个二进小波:

$$\psi_{2^j}^{(1)}(x, y) = \frac{\partial \theta_{2^j}(x, y)}{\partial x} = \frac{1}{2^{2j}} \psi^{(1)}\left(\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j}\right) \quad (5)$$

$$\psi_{2^j}^{(2)}(x, y) = \frac{\partial \theta_{2^j}(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{2^{2j}} \psi^{(2)}\left(\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j}\right) \quad (6)$$

对图像 $f(x, y)$ 进行尺度为 2^j 小波变换的结果为

$$W_{2^j}^{(1)}f(x, y) = f(x, y) * * \psi_{2^j}^{(1)}(x, y) \quad (7)$$

$$W_{2^j}^{(2)}f(x, y) = f(x, y) * * \psi_{2^j}^{(2)}(x, y) \quad (8)$$

由于式(7)和式(8)分别是图像经平滑后,沿 x, y 方向的梯度 f_x, f_y , 因此对含噪图像进行上述小波变换,相当于对图像先做平滑,然后求梯度。此后可进一步求出梯度强度和梯度角,其中梯度强度定义为

$$G = \sqrt{|f_x|^2 + |f_y|^2} \quad (9)$$

梯度角为

$$\varphi = \arg\left(\frac{f_y}{f_x}\right) \quad (10)$$

由于图像边缘应出现在梯度强度的极值处,其方向为与梯度角垂直的方向,所以应用小波变换可以实现边缘检测。如果改变尺度 j , 则应用快速算法就可以方便地得到检测结果。

3 本文算法

设图像 X 的大小为 $M \times N, K$ 为经对称核函数 $G(m, n) = \varphi(m)\varphi(n)$ (其中 $m = 1, \dots, Z_1; n = 1, \dots, Z_2$) 进行平滑后得到的图像, $\varphi(\cdot)$ 可选为高斯函数。图像 K 在水平垂直方向上的偏导数分别为 f_x, f_y , 若将 (f_x, f_y) 视为随机变量,文献[4]中定义 (i, j) 处的标准梯度强度为

$$S(i, j) = [f_x, f_y] \Sigma_{i, j}^{-1} [f_x, f_y]^T \quad (11)$$

其中,矩阵 $\Sigma_{i, j}$ 是随机变量 (f_x, f_y) 的协方差矩阵,也就是说,在计算 S 值时,需要计算协方差矩阵的逆,则 $S(i, j)$ 本文重新定义为

$$S(i, j) = \frac{f_x^2 + f_y^2}{\sigma^2} \quad (12)$$

其中, σ^2 为 f_x, f_y 的方差,其定义为

$$\sigma^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (K(i, j) - X(i, j))^2 = \sum_{m=1}^{Z_1} \phi^2(m) \sum_{n=1}^{Z_2} \phi'^2(n) \quad (13)$$

式(13)中, $\phi'(\cdot)$ 为 $\phi(\cdot)$ 的导函数。

而函数 S 的均值为

$$E[S] = E\left[\frac{f_x^2}{\sigma^2} + \frac{f_y^2}{\sigma^2}\right] = 2 \quad (14)$$

由式(12)可知, $S(i, j)$ 的含义是将每个像素处的梯度强度平方进行标准化。根据式(14)可知,由

于不同图像的标准化梯度强度具有相同的均值,从而就提供了对不同图像采用相同门限检测的可能。而且同一幅图像中,由于各像素的 S 是其梯度强度平方除以一相同的数,因此 S 值的大小反应了梯度强度的大小,这说明 S 可以作为判断该像素是否是边缘的依据。

由于高斯函数的一阶导数无法采用递推公式计算,因此以其作为检测算子所需的计算时间长,而 3 次 B 样条函数在边缘检测综合性能的各个方面都能很好地逼近 Gauss 函数,其紧支性质也使得它的局部时频特性优于 Gauss 函数^[5],因此本文选择 3 次 B 样条函数的一阶导数做小波函数。对图像做小波变换,相当于对图像先做平滑,再求梯度,则根据式(13)的定义,易知 σ^2 为

$$\sigma^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (K(i,j) - X(i,j))^2 \sum_{m=1}^{z_1} h^2(m) \sum_{n=1}^{z_2} g^2(n) \quad (14)$$

其中, h 为 3 次 B 样条小波的低通滤波器系数, g 为高通滤波器系数。

本文具体算法如下:

(1) 初始化数据

用于小波变换的最初输入应为图像在 V_0 空间的投影,根据式(1)可得到 $\theta_x = \theta_y = [0.0013$
0.0458 0.2212 0.5097 0.6667 0.5097
0.2212 0.0458 0.0013] 将图像各行与 θ_x 进行行卷积后,再将各列与 θ_y 进行列卷积,即可得到图像在 V_0 空间的投影;

(2) 求出图像经小波变换的结果^[7]

根据 3 次 B 样条函数的定义和二尺度关系,可得到 $j=1$ 时 3 次 B 样条小波的低通滤波器系数为 $h_{-2,-+2} = [0.0625 \ 0.25 \ 0.375 \ 0.25 \ 0.0625]$, 高通滤波器系数为 $g_{-1,-+1} = [0 \ -2 \ 2]$, 小波变换时,首先将步骤 1 所得结果的各行分别与 h 、 g 做卷积,然后再分别与 g 、 h 做列卷积,即可得到 $j=1$ 时的小波变换结果 $W_{2^j}^{(1)} f(x,y)$ 和 $W_{2^j}^{(2)} f(x,y)$;

(3) 求 σ^2

将原图与 h 分别作行、列卷积,得到经低通滤波后的图像 K 。并根据式(13)求出 σ^2 ;

(4) 由式(9)与式(10)进一步计算出 $j=1$ 时的梯度强度 G 和梯度角 φ ;

(5) 由式(12)求出各像素的标准化梯度强度;

(6) 令各像素的标准梯度强度 S 与门限 T 做比

较,如果 $S \geq T$,则暂判为边缘像素,若 $S < T$,则为非边缘像素。这时得到的结果边缘较粗,只是边缘的初步定位;

(7) 对粗边缘像素进行非最大抑制处理,即沿像素 (i,j) 的梯度方向进行梯度强度插值,以得到梯度方向上的两个最近邻梯度强度值。若像素 (i,j) 的梯度强度是这 3 者中最大的,则它就为边缘;

(8) 由于未采用双门限处理,因此上步的输出结果有少许离散分布的伪边缘,为提高检测效果,可将上步结果与 7×7 单位矩阵卷积,如果结果大于 5,则该像素确定为最终边缘。

由于 $j \geq 2$ 时,各低通、高通滤波器系数为 $j=1$ 时的滤波器系数的过采样,这里过采样定义为

$$[f]_{1,m}(\hat{k}) = \begin{cases} f(k) & k = mk \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

算法来方便得到 $j \geq 2$ 时的小波系数 $W_{2^j}^{(1)} f(x,y)$ 和 $W_{2^j}^{(2)} f(x,y)$,然后执行步骤(2)~步骤(8),即可。

4 实验结果

由于无法获取无噪的毫米波图像,为验证本文算法的效果,这里采用标准图像 Cameraman、Lena 的原图(大小为 256×256)及其添加高斯白噪声的图像对本文算法进行测试实验。实验中门限均采用 $T=5$,发现当 $j=1, j=2$ 时,本文方法可以对不同图像进行同门限检测,且均可检测出重要边缘。实验时分别用 Canny 算法对加噪图像和它们的原图进行同门限检测,得到加噪图像的检测结果分别如图 1(b)、图 2(b) 所示,其上有很多伪边缘,这说明 Canny 算法必须调整门限方可获得好的检测结果。用本文算法对原图及其加噪图像进行同门限检测,得到的结果如图 1(c)、图 1(d) 和图 2(c)、图 2(d) 所示,可见,本文方法对不同图像无需调整门限,就可获得较好的检测。

毫米波图像边缘检测的实验分析。实验是选用如图 3(a) 所示的 3 幅毫米波图像(大小为 50×50) 作为测试图像,对文献[4]提出的方法及本文方法进行了对比实验,其结果分别为图 3(b)、图 3(c)、图 3(d) 所示,表 1 列出了完成文献[4]方法与本文方法所需的时间。由表 1 可知,本文方法与文献[4]方法得到的结果非常类似,但若比较计算时间,本文方法不仅计算速度快,且随着图像尺寸的增大,

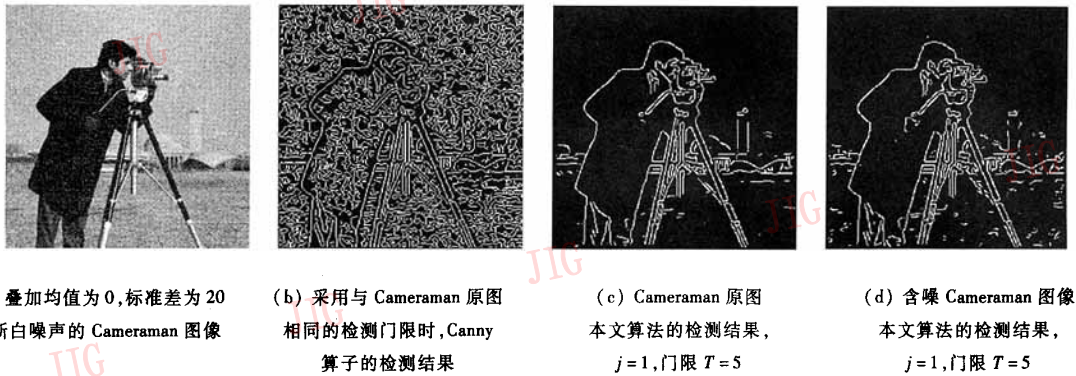


图 1 Cameraman 图像本文算法与 Canny 算子的边缘检测结果比较

Fig. 1 The edge detection results comparison between our method and Canny's for images of Cameraman

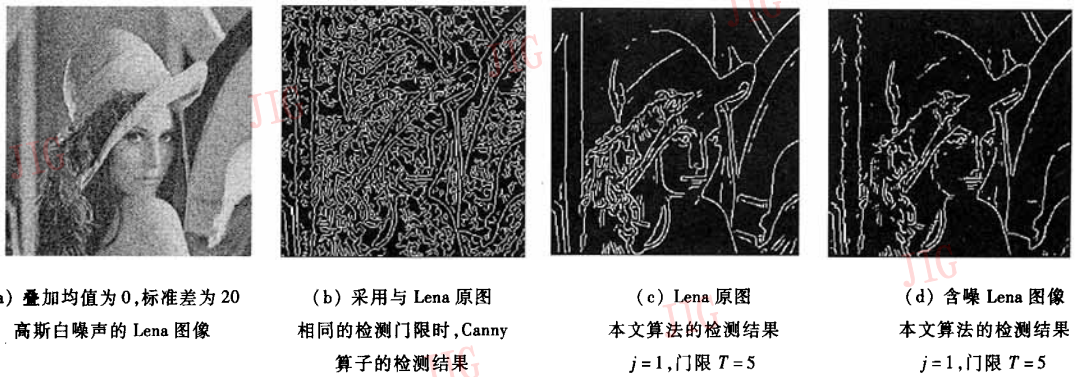


图 2 Lena 图像本文算法与 Canny 算子的边缘检测结果比较

Fig. 2 The edge detection results comparison between our method and Canny's for images of Lena

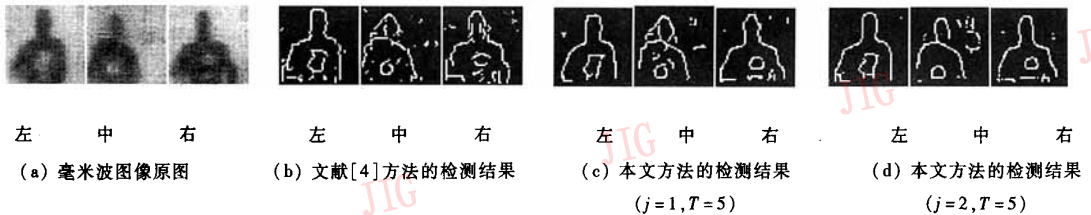


图 3 毫米波图像本文方法与文献[4]方法边缘检测结果比较

Fig. 3 Edge detection results for milli-meter images using our methods and that of reference 4

表 1 运行时间比较

Tab.1 Running time comparison

	毫米波 图像 a	毫米波 图像 b	毫米波 图像 c	Cameraman	Lena
文献[4]方法的 运行时间(s)	2.05	2.07	2.03	58.59	55.53
本文方法的 运行时间(s)	1.1	1.0	0.98	12.3	12.9

所需时间相对越少;分析原因是由于本文方法中 S 的定义简单,计算容易;同时,本文是先根据标准化梯度强度对边缘进行粗定位,然后再进行非最大抑制处理,而文献[4]的方法需先对整幅进行非最大抑制,而粗边缘相对整幅图像来说,像素数少很多,由于本文方法所需的插值运算明显减少,因此可提高计算速度;最后,本文方法只用单门限进行边缘粗定位,不仅省去了双门限所需的边缘再判断和多次

循环的连接过程,而且检测效果与采用双门限的方法基本相同,因此也较文献[4]方法简单。

5 结 论

本文提出了一种毫米波图像边缘检测方法,由于引入了标准化梯度强度、B 样条小波及沿梯度方向非最大抑制技术,在进行毫米波图像检测时能够较好地抑制噪声和提取边缘,同时不仅对不同毫米波图像可以使用同一个门限来进行边缘检测,而且实现时计算速度较快,实验证明,该方法可以实现毫米波图像的自动边缘检测,其在海关等自动检查方面具有重要的实用价值。

参考文献 (References)

- 1 Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing(second edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004:463 ~ 474. [Gonzalez R C, Woods R E. 数字图像处理(第二版). 阮秋琦, 阮宇智等译 [M]. 北京:电子工业出版社, 2004: 463 ~ 474.]
- 2 Canny J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6):679 ~ 698.
- 3 SHI Xiao-xi, DU Hui-qian, MEI Wen-bo. Millimeter-wave image edge detection based on adaptive binarization [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(181):61 ~ 63. [史晓希, 杜慧茜, 梅文博. 一种自适应二值化的毫米波图像边缘检测方法 [J]. 光电工程, 2004, 31(181):61 ~ 63.]
- 4 Rakesh R R, Chaudhuri P, Murthy C A. Thresholding in Edge Detection: A statistical approach [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(7):927 ~ 936.
- 5 Mallat S, Zhong Si-fen. Characterization of signals from multiscale edges [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7):710 ~ 732.
- 6 Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2):617 ~ 643.
- 7 WANG Yu-ping, CAI Yuan-long. Multiscale B-spline wavelet edge detector [J]. Science in China (Series A), 1995, 25(4): 426 ~ 437. [王玉平, 蔡元龙. 多尺度 B 样条小波边缘检测算子 [J], 中国科学(A 辑), 1995, 25(4):426 ~ 437.]