

# 带钢表面缺陷检测方法

茅正冲, 时文静, 邬 锋

(江南大学 物联网工程学院 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘 要:** 为了检测出生产过程中带钢表面缺陷, 提出了一种改进的 mallat 算法对其表面缺陷的检测方法。在小波分解中, 大部分小波滤波器长度大于 1, 分解出的图像是有限长序列, 这样原始的 mallat 算法就会截取一部分滤波器长度作用于有限长序列来实现小波分解, 导致重构后的图像失真。解决这一问题的根本方法是构造正交小波基, 通过信息熵来确定小波分解层数。对重构后的图像进行二值化, 通过形态学分析去除二值图像存在的噪声, 得到分割后的缺陷图像。matlab 进行仿真结果表明, 改进的 mallat 算法对缺陷图像分割方法是可靠的。

**关键词:** mallat 算法; 双向正交小波; 缺陷检测; 二值化; 形态学分析

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7024 (2014) 01-0233-04

## Strip surface defect detection method

MAO Zheng-chong, SHI Wen-jing, WU Feng

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry Ministry of Education,  
College of IOT Engineering, University Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** To detect the defect of strip surface while producing, the improved mallat algorithm is applied to the strip surface defect detection. In WT decomposition, most of the length of the wavelet filters are longer than 1, but the length of decomposed image is limited. So mallat algorithm intercepts part of length of the wavelet filters for image to realize decomposition, which leads to reconstructed image distortion. Constructing orthonormal wavelet basis is basic method to solve this problem. Wavelet decomposition level is decided by image entropy. The reconstruction images are translated into binarization images, the binarized images are obtained and the low-level noises involved in those images are removed by morphological analysis method, thus the segmented defective images are provided. The experimental results by simulation verify the reliability of the method proposed.

**Key words:** mallat algorithm; orthonormal two-direction wavelet; defect detection; binaryization; morphological analysis

## 0 引 言

1987 年, mallat 将计算机视觉领域中的多分辨率分析方法引入到了小波分析中, 提出多分辨率分析的理论, 提出了信号的塔式多分辨率分解与重构的算法, 这就是著名的 mallat 算法。但 mallat 算法在对信号处理时会对滤波器的截取一部分长度再来作用于信号, 这样就会导致重构后的信号失真, 本文给出了一类正交双向和双向小波的构造算法, 利用正交双向多分辨率分析, 得到双向正交小波分解与重构的 mallat 算法, 采用该算法来分解重构带钢表面缺陷的图像, 该算法得到的重构图

像将失真减到最小。作为钢铁制造业主要产品之一, 板带钢被广泛应用于机械制造和建筑业等领域, 其外形和表面质量也是金属板材产品最重要的指标之一, 表面缺陷是影响产品质量的重要因素。生产中人工检测早已不能满足生产线上对产品实时性和可靠性的要求, 基于机器视觉的缺陷检测技术已经成为生产线上控制产品质量的重要手段。近几年来, 小波分析作为一个数学分支迅速发展起来, 已经广泛地应用于信号处理、图像处理, 语音识别、机械故障诊断与监控等科技领域。传统的傅里叶变换在时域和频域上都比不上小波变换, 小波变换具有良好的局部化性质<sup>[1,2]</sup>。

收稿日期: 2013-01-21; 修订日期: 2013-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60973095)

作者简介: 茅正冲 (1964-), 男, 江苏南通人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为机器人视听觉识别、工业控制; 时文静 (1988-), 女, 江苏连云港人, 硕士研究生, 研究方向为图像识别; 邬锋 (1989-), 男, 江西萍乡人, 硕士研究生, 研究方向为图像识别。

E-mail: maozcandxia@163.com

## 1 算法原理

### 1.1 原始的 mallat 算法

在二维数字图像中, 常采用 mallat 算法来实现小波分解, 设  $\{V_j\}_{j \in \mathbf{Z}}$  是  $L^2(R)$  的一个 OMRA (多分辨率分析),  $\varphi(t)$  是相应的生成元, 相应的双尺度方程为

$$\begin{aligned}\varphi(t) &= \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_k \varphi(2t-k), \varphi(t) \in V_0 \\ \psi(t) &= \sum_{n \in \mathbf{Z}} g_n \varphi(2t-k), \psi(t) \in W_0\end{aligned}\quad (1)$$

分解算法

$$\begin{cases} c_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{p \in \mathbf{Z}} c_{j+1,p} \overline{h_{p-2k}} \\ d_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{p \in \mathbf{Z}} c_{j+1,p} \overline{g_{p-2k}} \end{cases}\quad (2)$$

记  $C^j = \{c_{j,k}\}$ ,  $D^j = \{d_{j,k}\}$ , 引进算子:  $H: l^2 \rightarrow l^2$ ;  $G: l^2 \rightarrow l^2$ .

其运算由式 (2) 决定, 即

$$\begin{cases} (HC^{j+1})_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{p \in \mathbf{Z}} c_{j+1,p} \overline{h_{p-2k}} \\ (GC^{j+1})_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{p \in \mathbf{Z}} c_{j+1,p} \overline{g_{p-2k}} \end{cases}$$

其结构示意图如图 1 所示。由此可见

$$\begin{cases} C^N = H^{J-N} C^J \\ D^N = G H^{J-N-1} C^J \end{cases}$$

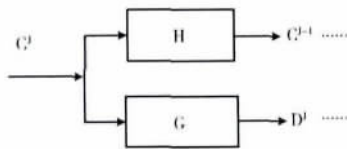


图 1 分解算法结构

重构算法

$$c_{j+1,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{p \in \mathbf{Z}} c_{j,(k-p)/2} h_p + \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{p \in \mathbf{Z}} d_{j,(k-p)/2} g_p \quad (3)$$

运算由式 (3) 决定, 即

$$\begin{cases} (HC^j)_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{p \in \mathbf{Z}} c_{j,(k-p)/2} h_p \\ (GD^j)_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{p \in \mathbf{Z}} d_{j,(k-p)/2} g_p \end{cases}$$

由此可见  $C^{j+1} = HC^j + GD^j$ , 于是从  $j=0$  尺度层到  $j=J$  尺度层的重构算法过程如图 2 所示。

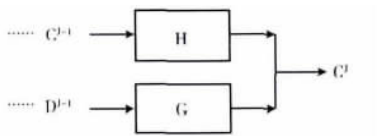


图 2 重构算法结构

### 1.2 文中的算法介绍

设  $\{V_j\}_{j \in \mathbf{Z}}$  和  $\{V_j^*\}_{j \in \mathbf{Z}}$  是  $L^2(R)$  的一个组双正交

GMRA (广义分辨分析)

$$\begin{cases} V_{j+1} = V_j \cup W_j \\ V_{j+1}^* = V_j^* \cup W_j^* \\ V_j \perp W_j^*, W_j \perp V_j^*, j \in \mathbf{Z} \end{cases}\quad (4)$$

式中:  $\cup$ ——直和运算,  $\perp$ ——正交运算,  $W_j$ —— $V_j$  在  $V_{j+1}$  中的补集, 但不一定是正交补;  $W_j^*$ —— $V_j^*$  在  $V_{j+1}^*$  中的补集, 也不一定是正交补。

又设  $\{\varphi(t), \psi(t), \varphi^*(t), \psi^*(t)\}$  是相应的双正交小波系统, 相应的双尺度方程为

$$\begin{cases} \varphi(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_k \varphi(2t-k) \\ \psi(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} g_k \varphi(2t-k) \\ \varphi^*(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_k^* \varphi^*(2t-k) \\ \psi^*(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} g_k^* \varphi^*(2t-k) \end{cases}\quad (5)$$

其等价的频域形式为

$$\begin{cases} \hat{\varphi}(2w) = H(w) \hat{\varphi}(w) \\ \hat{\psi}(2w) = G(w) \hat{\varphi}(w) \\ \hat{\varphi}^*(2w) = H^*(w) \hat{\varphi}^*(w) \\ \hat{\psi}^*(2w) = G^*(w) \hat{\varphi}^*(w) \end{cases}\quad (6)$$

其中双正交滤波器组  $\{H(w), H^*(w), G(w), G^*(w)\}$  为

$$\begin{cases} H(w) = \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_k e^{-ikw} \\ G(w) = \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} g_k e^{-ikw} \\ H^*(w) = \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_k^* e^{-ikw} \\ G^*(w) = \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} g_k^* e^{-ikw} \end{cases}\quad (7)$$

和双正交 (或对偶) 关系:  $\forall l \in \mathbf{Z}$ , 有

$$\begin{cases} \langle \varphi^*, \varphi(\cdot-l) \rangle = \langle \varphi, \varphi^*(\cdot-l) \rangle = 0 \\ \langle \varphi^*, \varphi(\cdot-l) \rangle = \langle \psi^*, \psi(\cdot-l) \rangle = \delta_{0,l} \end{cases}\quad (8)$$

对于  $j \in \mathbf{Z}$ , 定义投影算子  $P_j, Q_j$

$$\begin{cases} P_j: L^2(R) \rightarrow V_j, P_j f = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \langle f, \varphi_{j,k}^* \rangle \varphi_{j,k} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} c_{j,k} \varphi_{j,k} \\ Q_j: L^2(R) \rightarrow W_j, Q_j f = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \langle f, \psi_{j,k}^* \rangle \psi_{j,k} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} d_{j,k} \psi_{j,k} \end{cases}\quad (9)$$

则有如下分解和重构算法

(1) 分解算法

$$\begin{cases} c_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{p \in \mathbf{Z}} \overline{h_{p-2k}^*} c_{j+1,p} \\ d_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{p \in \mathbf{Z}} \overline{g_{p-2k}^*} c_{j+1,p} \end{cases}\quad (10)$$

(2) 重构算法

$$c_{j+1,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{p \in Z} h_{k-2p} c_{j,p} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{p \in Z} g_{k-2p} d_{j,p} \tag{11}$$

从上式可以看出, 文中的 mallat 算法与原始的 mallat 算法很相似, 但前者分解与重构过程中采用的分别是不同的两对滤波器, 分解时用的是  $\{h_k^*\}$ ,  $\{g_k^*\}$  即称为小波分析滤波器, 而重构时用的则是另一对滤波器  $\{h_k\}$ ,  $\{g_k\}$  即称为小波综合滤波器。重构算法是分解算法的逆过程, 目标是利用  $\{c_{j,k}\}$ ,  $\{d_{j,k}\}$ ,  $\{h_k\}$  和  $\{g_k\}$  来计算逼近系数  $\{c_{j+1,k}\}$ , 其中  $d_{j,k}$  是经过修改后的小波系数。

2 文中算法的实现

在实际的应用中, 人们对小波的要求要同时具有正交性、对称性、紧支性等多种性质。但 Daubechies 已经证明: 在小波基函数族中, 实践证明只有 haar 小波同时具有正交性, 对称性和紧支集性质, 但 haar 小波的最大缺陷是光滑性较差, 而双正交小波正好的解决了这个问题。双向正交小波 mallat 算法是双正交小波基的构造方法及正交小波的 mallat 快速算法的结合, 根据 mallat 算法对于任意信号  $f(t)$  可将信号一层层分解, 每一层分解的结果都是将上次分解得到的低频信号分解成低频和高频两个部分, 随着小波分解的层数越多, 信号的高低频就分解的越细致; 但同时随着分解层数的增多, 计算量会增大; 此外, 还会导致重构后的图像失真, 因此, 找出最佳分解层数来与系统响应时间取得平衡是不可忽略的任务。这里利用信息熵来确定分解的层数, 信息熵可以对给定的信号进行性能描述, 用  $x_i$  表示已给的信号,  $p(x_i)$  则表示  $x_i$  在整个分布中出现的概率, 信息熵的公式如下

$$e(x_i) = - \sum p(x_i) \log 2 p(x_i) (i = 1, 2, \dots, n) \tag{12}$$

信息熵表示信源输出每个符号所提供的平均信息量, 它是一种信息的测度。信息熵作用是消除人们对信息的不确定性, 熵越大信息量就越多, 熵值越小信息就越少, 表 1 给出 haar 小波分解—重构的子图信息熵。

表 1 各子图的信息熵

图像	1 层分解熵	2 层分解熵	3 层分解熵	4 层分解熵
LL	6.3515	7.3007	6.6211	6.2786
LH	1.7010	2.1462	1.8584	1.6989
HL	1.6525	2.0635	1.7329	1.5971
HH	1.2958	1.7581	1.5643	1.1364
总熵	11.0008	13.2685	11.7767	10.7110

表 1 中的 LL 表示分解的低频子带近似图像; LH 表示水平高频细节图像; HL 表示分解的垂直高频细节子图像; HH 表示分解的对角线高频细节子图像。由表 1 可以看出, 分解到第 2 层时图像熵值最大, 分解到 3, 4 层时熵值逐渐减小, 只有在分解成 2 层时, 子图代表的信息量最多, 所

以最佳分解层数是 2 层。  
选取大小为  $256 \times 256$  的图像作为仿真图像, 如图 3 所示。



图 3 缺陷图像

对图 3 进行分解, 图 4 和图 5 分别是对图 3 进行第一和第二层分解。



图 4 第一层分解



图 5 第二层分解

由图 4, 图 5 可以看出, 对图 3 分解时得到了水平、垂直和对角线 3 个方向的高频子图, 其中对角线细节子图含的噪声最多。所以, 只是用近似子图, 水平细节子图和垂直细节 3 个子图对图像进行重构, 图 6 是重构后的缺陷图像, 可以看得出重构后的图像能够较为明显的显示出原始图像的特征。

未改进算法重构后的图像如图 7 所示。



图 6 本文算法重构后的缺陷图像



图 7 未改进算法重构后的图像

3 经过形态学处理的重构图像

数学形态学是一门以严谨的数学理论和几何学为基础的图像分析学科, 主要研究图像的几何结构及相互关系; 它是一种非线性滤波方法, 形态和差运算, 包括膨胀运算, 腐蚀运算, 开运算和闭运算 4 种基本运算。腐蚀运算和膨

膨胀运算是最基本的运算,开运算和闭运算则是结合前两者的运算。目前,数学形态学已由二值形态学,灰度形态学,软数学形态学,模糊形态学发展到模糊软形态学,在图像处理领域得到越来越广泛的应用,可用于抑制噪声,纹理分析,特征提取,图像分割,边缘检测,形状识别,图像恢复与重建等图像处理问题。将数学形态学分析方法用于本文中去消除二值化后图像仍存在的噪声,数学形态学分析方法的天然并行实现结构的优点,从而可以实现处理算法和形态学的并行,进而快速提高了图像分析和处理速度。

### 3.1 膨胀运算和腐蚀运算

膨胀运算具有扩大图像的作用,填平原图边界上不平滑的凹陷部分,可以通过补集来定义:  $A \oplus B = [A^c \ominus B^c]^c$ 。

腐蚀运算具有收缩图像的作用,可以消除物体边缘点。定义为:  $A \ominus B = \{x; B + x \subset A\}$ 。

### 3.2 开运算和闭运算

经过腐蚀和膨胀处理之后的图像会丢失一些有用的信息,为了恢复丢失的信息,这里需要进行二值形态学的开运算和闭运算。

开运算具有磨光图像的外边界作用,是图像更加平滑,定义为:  $A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$ ; 闭运算具有磨光图像内边界作用,定义为:  $A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$ 。

从图 8,图 9,图 10 中可以看出,没经过处理的缺陷图像经过滤波没有较好的显示出缺陷信息,如图 8 所示;原始的 mallat 算法处理后的图像经过滤波后只能检测出部分缺陷,如图 9 所示;而双向正交小波处理后的图像经过滤波后能够将缺陷明显全部的检测出来,如图 10 所示。



图 8 形态学滤波后的原图像



图 9 形态学滤波后的图 7 图像



图 10 形态学滤波后的图 4 图像

## 4 结束语

本文引入了一种双向正交小波的 mallat 算法对带钢表面缺陷的检测系统方法,通过摄像机采集到缺陷图像传输到计算机上进行处理,通过信息熵确定小波分解的层数,再利用 Haar 小波对图像进行处理,结果仅保留近似信息,从而降低了图像数据,在提取近似信息的基础上提高了系统的实时性,便于图像的分割应用。将分割后的图像进行二值化,再进一步通过形态学滤除图像上的噪声,最后得出分割后缺陷图像。实验结果表明双向正交 mallat 算法能够较好的检测出缺陷的存在。

## 参考文献:

- [1] DI Jizheng. Theory of wavelet analysis [M]. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese). [邱继征. 小波分析原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [2] FAN Qibin. Wavelet analysis [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008 (in Chinese). [樊启斌. 小波分析 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.]
- [3] GUAN Shengqi, SHI Xiuhua. Fabric texture defect for rapid detection method [J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30 (14): 3433-3435 (in Chinese). [管声启, 石秀华, 等. 织物纹理疵点快速检测方法 [J]. 计算机工程与设计, 2009, 30 (14): 3433-3435.]
- [4] CONG Jiahui, YAN Yunhui, DONG Dewei, et al. Application of gabor filter to strip surface defect detection [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010, 31 (2): 257-260 (in Chinese). [丛家慧, 颜云辉, 董德威, 等. Gabor 滤波器在带钢表面缺陷检测中的应用 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2010, 31 (2): 257-260.]
- [5] SUN Jiping, LI Yingchun. Study of image boundary problem based on Mallat algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2006, 27 (6): 949-951 (in Chinese). [孙继平, 李迎春. 基于 Mallat 算法的图像边界问题的研究 [J]. 计算机工程与设计, 2006, 27 (6): 949-951.]
- [6] LI Wanshe, HAO Wei, MENG Shaoting, et al. The Mallat algorithm of orthonormal two-direction wavelets with dilation factor a [J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2010, 38 (3): 1-5 (in Chinese). [李万社, 郝伟, 蒙少亭, 等. a 尺度正交双向小波的 Mallat 算法 [J]. 陕西师范大学学报, 2010, 38 (3): 1-5.]
- [7] WANG Shuailing, FAN Qibin, ZHENG Hong. The Mallat of orthonormal wavelets with dilation factor a [J]. Journal of Mathematics, 2007, 27 (6): 664-668 (in Chinese). [王帅灵, 樊启斌, 郑宏. a 尺度正交小波的 Mallat 算法 [J]. 数学杂志, 2007, 27 (6): 664-668.]

(下转第 242 页)

## 参考文献:

- [1] Geuzaine C, Remacle J. Gmsh: A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2009, 79 (11): 1309-1331.
- [2] Wu X, Wang M, Han B. An automatic hole-filling algorithm for polygonal meshes [J]. Computer-Aided Design and Applications, 2008, 5 (6): 889-899.
- [3] Marchandise E, Piret C. CAD and mesh repair with radial basis functions [J]. Journal of Computational Physics, 2012, 231 (5): 2376-2387.
- [4] Remacle J, Geuzaine C, Compère G, et al. High quality surface remeshing using harmonic maps [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 83 (4): 403-425.
- [5] Marchandise E, Carton de Wiart C, Vos W, et al. High quality surface remeshing using harmonic maps—Part II: Surfaces with high genus and of large aspect ratio [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2011, 86 (11): 1303-1321.
- [6] Wright G B, Flyer N, Yuen D. A hybrid radial basis function-pseudo-spectral method for thermal convection in a 3d spherical shell [J]. Chemistry Geophysics Geosystems, 2010, 11 (7): 1-18.
- [7] CHEM Jie, GAO Chenghui, HE Bingwei. Automatic recognition of boundary features of non-closed triangulation model [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011 (11): 89-94.
- [8] Macdonald C B, Ruuth S J. The implicit closest point method for the numerical solution of partial differential equations on surfaces [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2009, 31 (6): 4330-4350.
- [9] Ulaş, Çaydaş, Sami Ekici. Support vector machines models for surface roughness prediction in CNC turning of AISI 304 austenitic stainless steel [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23 (3): 639-650.
- [10] WU Dehui. Intelligent prediction model for surface roughness in milling [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13 (6): 1137-1141 (in Chinese).
- [11] LIU Deping, YU Shuijing. Hole repairing in triangular meshes based on least-squares support vector machines [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15 (9): 1868-187 (in Chinese). [刘德平, 于水晶. 基于最小二乘支持向量机的三角网格修补算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15 (9): 1868-187.]
- (上接第 236 页)
- [8] ZHOU Xiaoyong, YE Yinzong. Multi-fault diagnosis method on Mallat pyramidal algorithm wavelet analysis [J]. Control and Decision, 2007, 19 (5): 592-594 (in Chinese). [周小勇, 叶银忠. 基于 Mallat 塔式算法小波变换的多故障诊断方法 [J]. 控制与决策, 2007, 19 (5): 592-594.]
- [9] Mak K L, Peng P, Yiu K F C. Fabric defect detection using morphological filters [J]. Image and Vision Computing, 2009, 27 (10): 1585-1592.
- [10] Bai X Z, Zhou F. Edge detection based on mathematical morphology and iterative thresholding [C] //International Conference on Computational Intelligence and Security. New York: IEEE, 2006: 1849-1852.