

基于小波变换与偏微分方程的图像分解及边缘检测

张力娜^{1,2}, 李小林^{2*}

(1. 咸阳师范学院 数学与信息科学学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 咸阳师范学院 图形图像处理研究所, 陕西 咸阳 712000)

(* 通信作者电子邮箱 ricky_lxl@163.com)

摘要 针对含纹理的自然图像在图像分解时, 结构图像的边缘信息容易被当作纹理分解到纹理图像中, 致使结构图像的边缘不清晰, 检测到的边缘不准确, 提出了基于小波分解的偏微分方程 (PDE) 图像分解及边缘检测模型。首先利用小波变换阈值提取部分纹理信息, 再利用改进的保边缘的偏微分方程图像分解模型进一步分解图像并提取边缘。实验结果表明, 新方法提高了图像分解的质量, 纹理信息提取充分, 结构图像有较好的分片光滑性和较清晰的边缘, 检测到的结构边缘更准确。

关键词 小波变换; 偏微分方程; 图像分解; 边缘检测; 结构; 纹理

中图分类号 TP391.41; TN911.73 文献标志码 A

Image decomposition and edge detection based on wavelet transform and partial differential equation

ZHANG Lina^{1,2}, LI Xiaolin^{2*}

(1. College of Mathematics and Information Science, Xianyang Normal University, Xianyang Shaanxi 712000, China ;

2. Institute of Graphics and Image Processing, Xianyang Normal University, Xianyang Shaanxi 712000, China)

Abstract: In the decomposition of natural image containing texture, the edge information of structure image is easy to be regarded as the texture, which results in blurred edge of the structural image and inaccurate detected edge. An image decomposition and edge detection method was proposed based on wavelet transform of Partial Differential Equation (PDE). At first, wavelet transform threshold was used to extract texture information. Then the improved PDE image decomposition model was used to further decompose the image and extract the edge. The numerical experimental results show that this method improves the quality of image decomposition, makes the texture extraction through and the structure image piecewise smooth, and better protects the edge of the structure.

Key words: wavelet transform; Partial Differential Equation (PDE); image decomposition; edge detection; structure; texture

0 引言

结构图像和纹理图像是两种不同特征的图像。结构图像由分片光滑的区域及清晰的边缘组成, 而纹理图像是不平滑的且有一定的空域周期性的图像。在一些图像处理中, 如图像压缩^[1]、目标检测^[2]、图像重构^[3]等, 对纹理和结构常常采用不同的处理方法。而一幅自然图像往往是结构图像和纹理图像的混合, 因此, 将一幅图像的结构部分和纹理部分分开, 能为后续的图像处理工作提供很大的便利。

Vese 等^[4]提出了基于偏微分方程 (Partial Differential Equation, PDE) 的卡通—纹理分解模型, 能有效地将图像中的结构部分和纹理部分分开, 但对于较复杂的图像, 分解的结构图像边缘不清晰, 边缘被当作纹理分解到纹理图像中, 图像分解的效果不是很理想。于是, 许多研究人员提出了改进方法, 如基于形态学成分分析的方法^[5]、基于小波空间的图像分解变分模型^[6]、基于 H^{-1} 范数^[7]、BMO 范数^[8-9]的方法、保护边缘的图像分解方法^[10-11]以及彩色图像的分解方法^[12]等。文献[13]提出的耦合卡通—纹理分解及边缘检测模型, 能使图像分解与边缘检测同时进行, 在一定程度上保护了结构图像的边缘信息。本文在耦合卡通—纹理分解及边缘检测模型

的基础上, 提出了基于小波分解的偏微分方程图像分解及边缘检测模型, 首先利用小波变换阈值提取部分纹理信息, 再利用改进的偏微分方程图像分解模型进一步分解, 从而将一幅原图分解为结构图像和纹理图像, 同时检测出结构图像的边缘信息。

1 耦合卡通—纹理分解及边缘检测的模型

设一幅含纹理的自然图像 f , Vese 等^[4]提出的基于 PDE 的分解模型如下:

$$\inf_{u \in G_1, g_2} \left\{ \int_{\Omega} u |g_1, g_2| + \int_{\Omega} |\nabla u| + \lambda \int_{\Omega} |f - u - \partial_x g_1 - \partial_y g_2|^2 dx dy + \mu \left[\int_{\Omega} \sqrt{g_1^2 + g_2^2} dx dy \right]^{\frac{1}{p}} \right\} \quad (1)$$

其中 $v := \operatorname{div} g$, $g = (g_1, g_2)$, 参数 $\lambda, \mu > 0$, $\mu \rightarrow \infty$, f_i 与 u, v 的关系为 $f = u + v + w$, μ 为结构 (分片光滑) 图像, v 为纹理图像, w 则是被磨掉的噪声或部分图像信息。

在 Vese 等的分解模型的基础上, 文献[13]提出了耦合卡通—纹理分解及边缘检测的模型:

$$G_{\varepsilon} u(g_1, g_2, b) = \int \left(b^2 |\nabla u|^2 + \frac{b(-1)^2}{\varepsilon} \right) + \alpha \int \eta |\nabla b| + \lambda \int |f - u - \partial_x g_1 - \partial_y g_2|^2 dx dy + \mu \int \sqrt{g_1^2 + g_2^2} dx dy \quad (2)$$

其中参数 $\alpha, \lambda, \mu, \varepsilon > 0$ 。模型中引入了一个新的能量泛函 b ，它与原来的能量泛函有相同的极小化子。 b 为结构图像 u 的边缘指示函数，它标记结构图像中边缘的位置。模型中第一项 u 的正则项，对 u 的扩散就是在 b 的指引下进行的，在边缘附近 $b \rightarrow 0$ ，扩散就减弱，在结构区域内部光滑的地方 $b \rightarrow 1$ ，扩散就增大。因此，模型 (2) 能使得图像分解与边缘检测同时进行，并在一定程度上保护了结构图像的边缘信息。

模型 (2) 由变分法基本原理可得 Euler-Lagrange 方程：

$$\begin{cases} u = f - \partial_x g_1 - \partial_y g_2 + \frac{1}{2\lambda} \operatorname{div} [b(\nabla u)] \\ \mu \frac{g_1}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}} = 2\lambda \left[\frac{\partial}{\partial x} (u - f) + \partial_{xx}^2 g_1 + \partial_{yy}^2 g_2 \right] \\ \mu \frac{g_2}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}} = 2\lambda \left[\frac{\partial}{\partial y} (u - f) + \partial_{xy}^2 g_1 + \partial_{yy}^2 g_2 \right] \\ b = \frac{1 + \gamma \operatorname{div} \left[\frac{\eta' |\nabla b|}{2 |\nabla b|} \nabla b \right]}{\varepsilon |\nabla u|^2 + 1} \end{cases} \quad (3)$$

其中参数 $\gamma = \frac{1}{2} \alpha \varepsilon$ 。

2 改进的图像分解及边缘检测方法

模型 (2) 的方法虽然在一定程度上减少了纹理图像中包含的结构边缘，保护了结构图像的边缘信息，但是对于一些梯度模较大的纹理，有可能被识别为结构边缘保留在了结构图像中，若要提取出来，一些梯度模较小的边缘信息又会被识别为纹理，分解到纹理图像中。因此，本文借助小波分解来提高纹理信息的提取率，并改进小波系数阈值及偏微分分解模型来保护结构边缘不被提取出来，从而提高图像分解的质量。本文提出的图像分解算法流程如图 1 所示。

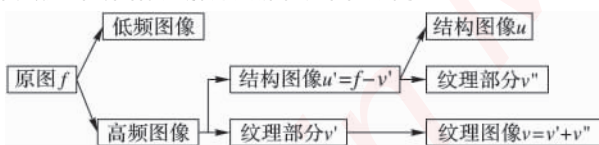


图 1 本文图像分解算法流程

2.1 基于小波变换阈值的纹理提取

小波变换是一种多分辨率信号分析方法，在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力。利用小波变换可将图像分解为不同尺度和方向的分量，便于对不同信息做不同的处理，因此小波变换在纹理分析方面十分有用。本文将含纹理的原图像 f 经过一层小波分解，分解成一个低频分量图 LL 和 3 个高频分量图 HL, LH, HH ，高频分量图分别表示竖直方向、水平方向和对角方向。分解后的低频分量图主要是图像的平滑部分和部分的边缘与纹理信息，而高频部分则集中了大部分的边缘与纹理信息。由于希望图像分解后得到的结构图像是片光滑且边缘清晰的图像，而纹理图像仅含纹理不含结构的边缘，因此，本文对小波分解的高频图像通过阈值来提取其中的纹理信息。

原图像 f 经过一层小波分解后得到的小波系数记为 $d_{1,k}$ ，其中分量图 HL 的小波系数为 $d_{1,1}$ ， LH 的小波系数为 $d_{1,2}$ ， HH

的小波系数为 $d_{1,3}$ 。

首先，将低频分量图 LL 重构得到含纹理较少的低频图像 u_{LL} ，对 u_{LL} 利用模型^[14]

$$G u_{LL}(b') = \int \left(b'^2 |\nabla u_{LL}|^2 + \frac{b'(-1)^2}{\varepsilon} \right) + \alpha \int \eta |\nabla b'| + \lambda \int |f - u_{LL}|^2 dx dy \quad (4)$$

来检测结构图像的边缘信息，得到边缘指示函数 b' ，当 $b' \rightarrow 0$ 时为边缘，当 $b' \rightarrow 1$ 时为非边缘区域，因为模型中增加了 b' 的正则项，所以能在一定程度上避免将纹理信息检测为结构边缘信息。

然后，根据边缘指示函数来确定高频分量图中结构边缘的位置，构造阈值函数。为确保提取的纹理中不含边缘信息，根据函数来确定边缘的位置，作如下变换，适当选取参数 $l, t > 0$ ，其中 $t \rightarrow 0$ ，令

$$\bar{b} = \begin{cases} t, & b' < l \\ 1, & b' \geq l \end{cases} \quad (5)$$

则当 $\bar{b} = t$ 时，视为边缘区域，当 $\bar{b} = 1$ 时，视为非边缘区域。构造阈值函数，记 $w_{1,l} = |d_{1,l}| * \bar{b}$ ($l = 1, 2, 3$) 为各高频分量小波系数的状态，此时在边缘及光滑的区域 $w_{1,l}$ 的值较小且趋向于 0，在纹理区域 $w_{1,l}$ 的值则相对较大，选取适当的阈值 s ，于是得到估计的小波系数为

$$\bar{d}_{1,l} = \begin{cases} 0, & w_{1,l} < s \\ d_{1,l}, & w_{1,l} \geq s \end{cases} \quad (6)$$

其中 $l = 1, 2, 3$ 。

最后，将各高频分量估计的小波系数重构，则得到提取的纹理部分 v' ，令 $u' = f - v'$ 为结构图像。



图 2 小波变换阈值分解结果示意图

2.2 改进的偏微分方程图像分解算法

经过一次小波变换阈值，原图像分解成了纹理部分 v' 和结构部分 u' ，纹理部分 v' 中只有很少的边缘信息，而结构部分 u' 中保留了绝大部分的边缘信息。但是从实验结果也可以看到结构部分 u' 中还含有很多的纹理信息，结构区域内部不够光滑，就说明 u' 中纹理信息没有被完全提取出来，考虑到模型 (2) 的方法能够使边缘检测与图像分解同时进行，并且较好地保护边缘信息，于是本文对 u' 用改进的模型 (2) 的方法作进一步的分解。

模型 (2) 中第三项图像 u 的保真项的系数 λ 影响着 u 的扩散强弱，当 λ 取值较小时，扩散就强，当 λ 取值较大时，扩散就弱。为了保持区域内部较好的光滑性就需要较强的扩散，反之，要保持边缘就需要较弱的扩散。 μ 为第四项参数，影响着纹理提取的程度，当 μ 取值越小时，提取的纹理细节越多，而当 μ 取值越大时，提取的纹理细节越少。于是，本文根据低频图像 u_{LL} 检测到的边缘指示函数 b' 选取参数 $\lambda, \mu > 0$ ，有

$$\begin{cases} \lambda b' = \begin{cases} \lambda_1, & b' < s_1 \\ \lambda_2, & b' \geq s_1 \end{cases} \\ \mu b' = \begin{cases} \mu_1, & b' < s_2 \\ \mu_2, & b' \geq s_2 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

当 $b' < s_i$ 时, 视为边缘区域, 选取较大参数值 λ_1 及 μ_1 ; 而当 $b' \geq s_i$ 时, 视为光滑区域, 选取较小的参数值 λ_2 及 μ_2 , 从而使得在边缘处扩散较弱并且不会被当作纹理提取出来, 在结构区域内部扩散较强达到较好的光滑性, 同时纹理细节能被充分地提取。

2.3 本文算法步骤

步骤 1 对原图像 f 进行小波分解, 得到低频分量图 LL 和高频分量图 HL, LH, HH 。

步骤 2 利用重构得到的低频图像 u_{LL} 检测边缘指示函数 b' 。

步骤 3 对各高频分量 HL, LH, HH 进行阈值估计小波系数, 并重构得到纹理部分 v' , 令 $u' = f - v'$ 得到结构部分 u' 。

步骤 4 用改进的模型 2(将 u' 分解为结构图像 u 和纹理部分 v'' , 同时检测结构图像的边缘信息 b 。

步骤 5 令 $v = v' + v''$, 则得到最终的分解结果: 纹理图像 v 、结构图像 u 及边缘 b 。

3 数值实验结果

本文以图 3 所示的 3 幅图像为实验图像, 实验中均使用小波函数 $db1$ 对图像进行 1 层分解。

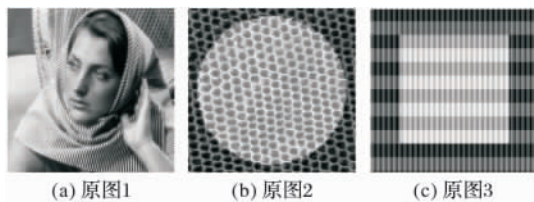


图 3 原图

图 4 为模型 2(方法对图 3 a(分解的结果, 其中参数选取为 $\alpha = 0.1, \lambda = 0.12, \mu = 0.6, \varepsilon = 0.005$ 。图 5 为本文方法对图 3 a(分解的结果, 式 2(及式 7(中参数选取为 $\alpha = 0.08, \lambda_1 = 0.15, \lambda_2 = 0.7, \mu_1 = 0.6, \mu_2 = 0.95, \varepsilon = 0.005$ 。比较图 4 与图 5 可以看出, 图 4 中结构图像 u 的人物的五官较模糊, 特别是眼睛部分, 而图 5 中结构图像 u 的人物的五官清晰, 结构边缘也比较清楚, 区域内部较光滑。从图 4 中纹理图像 v 可以看到不但提取了纹理信息, 还提出了较多的结构边缘信息, 有较明显的人物的五官信息, 相应的提取的结构边缘也不够准确, 边缘图像 b 中, 有较多的灰色的奇异信息, 而眼睛部位的边缘又比较淡, 图 5 中纹理图像 v 包含的边缘信息较少, 大部分边缘信息保留在了结构图像 u 中, 因此提取的结构边缘 b 较准确, 奇异信息较少, 眼睛部位的边缘也比较清晰。

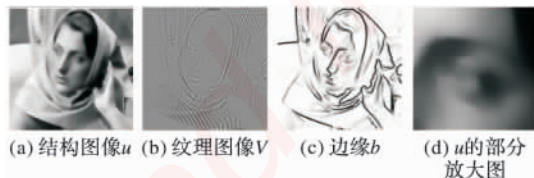


图 4 模型 2(方法对图 3 a(分解的结果



图 5 本文方法对图 3 a(分解的结果

图 6 为模型 2(方法对图 3 b(分解的结果, 其中参数选取为 $\alpha = 0.01, \lambda = 0.09, \mu = 0.5, \varepsilon = 0.003$ 。图 7 为本文方法对图 3 b(分解的结果, 式 2(及式 7(中参数选取为 $\alpha =$

$0.01, \lambda_1 = 0.03, \lambda_2 = 0.9, \mu_1 = 0.03, \mu_2 = 0.95, \varepsilon = 0.0035$ 。比较图 6 与图 7 可以看出, 图 7 中本文方法分解的结构图像 u 的区域内部更光滑, 边缘清晰, 提取的结构边缘 b 较准确, 而图 6 中的结构图像 u 的区域内部还有较明显的纹理痕迹, 边缘也较模糊, 实验中若要再提高区域内的光滑性, 则边缘会更模糊, 提取的结构边缘 b 也会更模糊。

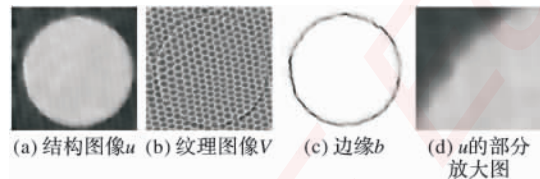


图 6 模型 2(方法对图 3 b(分解的结果

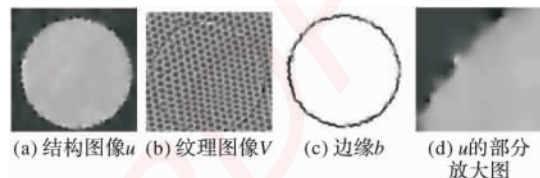


图 7 本文方法对图 3 b(分解的结果

图 8 为模型 2(方法对图 3 c(分解的结果, 其中参数选取为 $\alpha = 0.01, \lambda = 0.01, \mu = 0.1, \varepsilon = 0.01$ 。图 9 为本文方法对图 3 c(分解的结果, 式 2(及式 7(中参数选取为 $\alpha = 0.01, \lambda_1 = 0.01, \lambda_2 = 0.1, \mu_1 = 0.06, \mu_2 = 0.1, \varepsilon = 0.018$ 。比较图 8 与图 9 可以看出, 图 9 中本文方法分解的结构图像 u 有光滑的区域内部, 边缘更清晰。

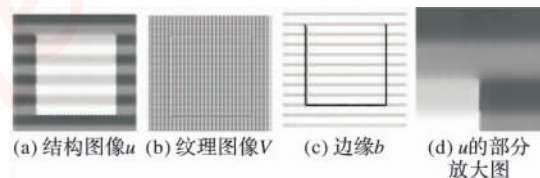


图 8 模型 2(方法对图 3 c(分解的结果

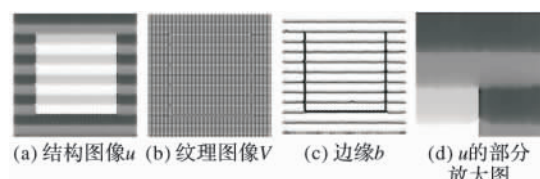


图 9 本文方法对图 3 c(分解的结果

4 结语

本文在耦合卡通-纹理分解及边缘检测模型的基础上, 提出了基于小波变换的偏微分方程图像分解及边缘检测模型, 新方法即保证了结构图像 u 较好的分片光滑性, 又较好地保护了结构区域的边缘, 在提取纹理信息时尽量避免提取边缘信息, 使得图像的分解更加彻底, 检测的边缘更加准确。

参考文献:

- [1] 张军, 黄英君, 代科学, 等. 图像分解和区域保护在 SAR 图像压缩中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(1): 4-7.
- [2] 王卫卫, 席灯炎, 杨堃鹏, 等. 利用结构纹理分解的海洋舰船目标检测[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(4): 132-137.
- [3] 甄小仙, 刘哲, 马聪. 结合级联字典和双层稀疏分解的图像重构[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(23): 154-156.
- [4] VESE L A, OSHER S J. Modeling textures with total variation minimization and oscillating patterns in image processing[J]. Journal of Scientific Computing, 2003, 19(1/2/3): 553-572.

为进一步验证此学习核函数算法的性能,从好样品集中选择一个样本 x , 然后人为添加部分缺陷得到带缺陷图像 I , 最后用采用上面学习到的核函数对图像 I 进行降噪得到复原图像 z 。同时,人工选择带宽部分带宽进行实验得到相应的复原图像,然后将原图像与复原图像进行误差比较,比较数据见表 2。

表 1 不同核参数下的复原误差

带宽	误差	带宽	误差
5 000	1 130	20 000	659
10 000	679	25 000	683
14 755	641		

表 1 中的误差是利用公式 $\|x - z\|_2$ 得到的,从表中的变化趋势来看,通过选择算法是比较有效的。这与选择核函数及参数的目标函数是一致的。

4 结语

通过数值实验发现,将标准化内积矩阵作为目标来学习核函数的方法符合检测目的,可以较准确地计算出样本上的缺陷,同时也为非监督问题核函数及参数的选择确立了一个学习标准。结合最优解分布的理论分析得到的迭代算法是切实可行的,算法收敛速度比较快。学习到的核函数基本可以达到统计意义上的图像复原误差最小化。本文是利用学习组合系数来得到线性组合核函数的,下一步的研究内容是学习非线性组合核函数。

参考文献

- [1] BARTLETT P, SHAWE-TAYLOR J. Generalization performance of support vector machines and other pattern classifiers [M]// Advances in Kernel Methods — Support Vector Learning. Cambridge: MIT Press, 1999: 43 – 54.
- [2] LANCKRIET G R G, CRISTIANINI N, BARTLETT P, et al. Learning the kernel matrix with semi-definite programming[J]. Journal of Machine Learning Research, 2004, 5(1): 27 – 72.
- [3] MICCHELLI C A, PONTIL M. On learning vector-valued functions [J]. Neural Computation, 2005, 17(1): 177 – 204.
- [4] CORTES C, MOHRI M, ROSTAMIZADEH A. L_2 regularization for learning kernels [C]// UAI 09: Proceedings of the Twenty-Fifth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. Arlington, Virginia: AUAI Press, 2009: 109 – 116.
- [5] CORTES C, MOHRI M, ROSTAMIZADEH A. Learning non-linear combinations of kernels [C]// NIPS 2009: Proceedings of the Twenty-Third Annual Conference on Neural Information Processing Systems. [S. l.]: NIPS Foundation, 2009: 396 – 404.
- [6] ARGYRIOU A, MICCHELLI C A, PONTIL M. Learning convex combinations of continuously parameterized basic kernels [C]// COLT 2005: Proceedings of the 18th Annual Conference on Learning Theory, LNCS 3559. Berlin: Springer, 2005: 338 – 352.
- [7] ONG C S, SMOLA A J, WILLIAMSON R C. Learning the kernel with hyperkernels[J]. The Journal of Machine Learning Research, 2005, 6: 1043 – 1071.
- [8] SONNENBURG S, RÄTSCH G, SCHÄFER C, et al. Large scale multiple kernel learning[J]. The Journal of Machine Learning Research, 2006, 7: 1531 – 1565.
- [9] ZIEN A, ONG C S. Multiclass multiple kernel learning[C]// ICML 2007: Proceedings of the 24th Annual International Conference on Machine Learning. New York: ACM, 2007: 1191 – 1198.
- [10] RAKOTOMAMONJY A, BACH F R, CANU S, et al. SimpleMKL [J]. The Journal of Machine Learning Research, 2008, 9: 2491 – 2521.
- [11] SHAO J-D, RONG G, LEE J M. Learning a data-dependent kernel function for KPCA-based nonlinear process monitoring [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 87(11): 1471 – 1480.
- [12] CORTES C, MOHRI M, ROSTAMIZADEH A. Two-stage learning kernel algorithms [C]// ICML 2010: Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning. Haifa, Israel: Omni Press, 2010: 239 – 246.
- [13] KLOFT M, BREFELD U, SONNENBURG S, et al. L_p -norm multiple kernel learning [J]. Journal of Machine Learning Research, 2011, 12: 953 – 997.
- [14] MIKA S, SCHÖLKOPF B, SMOLA A, et al. Kernel PCA and denoising in feature spaces [C]// Proceedings of The 1998 Conference on Advances in Neural Information Processing Systems II. Cambridge: MIT Press, 1999: 536 – 542.
- [15] TAN Z Y, FENG Y, XU K J, et al. Calculating the pre-image using the kernel methods [J]. Advances in Information Sciences and Service Sciences, 2012, 4(22): 612 – 618.
- [5] STARCK J L, ELAD M, DONOHO D L. Image decomposition via the combination of sparse representations and variational approach [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(10): 1570 – 1582.
- [6] 李敏,冯象初. 基于小波空间的图像分解变分模型[J]. 电子学报, 2008, 36(1): 184 – 187.
- [7] OSHER S J, SOLE A, VESE L A. Image decomposition and restoration using total variation minimization and the H^{-1} norm[J]. Multiscale Modeling and Simulation: A SIAM Interdisciplinary Journal, 2003, 1(3): 349 – 370.
- [8] LE T M, VESE L A. Image decomposition using total variation and $\text{div}(BMO)^*$ [J]. Multiscale Modeling and Simulation, 2005, 4(2): 390 – 423.
- [9] GARNETT J B, LE T M, MEYER Y, VESE L A. Image decomposition using total variation and homogeneous besov spaces[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2007, 23(1): 25 – 56.
- [10] 殷海青,江玲玲,刘红卫. 联合纹理提取和边缘检测的新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4): 847 – 850.
- [11] 魏伟波,潘振宽,赵增芳. 彩色纹理图像分解的 VO 模型及其 Split Bregman 方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(10): 2279 – 2285.
- [12] XU C, LI M, SUN X L. An edge-preserving variational method for image decomposition [J]. Chinese Journal of Electronics, 2013, 22(1): 109 – 113.
- [13] 张力娜,冯象初,刘晨华. 一种耦合卡通一纹理分解及边缘检测的方法[J]. 激光与红外, 2009, 39(5): 542 – 545.
- [14] AMBROSIO L, TORTORELLI V. Approximation of functionals depending on jumps by elliptic functionals via Γ -convergence [J]. Communication on Pure and Applied Mathematics, 1990, 43(8): 999 – 1036.

嵌入式资源免费下载

总线协议:

1. [基于 PCIe 驱动程序的数据传输卡 DMA 传输](#)
2. [基于 PCIe 总线协议的设备驱动开发](#)
3. [CANopen 协议介绍](#)
4. [基于 PXI 总线 RS422 数据通信卡 WDM 驱动程序设计](#)
5. [FPGA 实现 PCIe 总线 DMA 设计](#)
6. [PCI Express 协议实现与验证](#)
7. [VPX 总线技术及其实现](#)
8. [基于 Xilinx FPGA 的 PCIE 接口实现](#)
9. [基于 PCI 总线的 GPS 授时卡设计](#)
10. [基于 CPCI 标准的 6U 信号处理平台的设计](#)
11. [USB30 电路保护](#)
12. [USB30 协议分析与框架设计](#)
13. [USB 30 中的 CRC 校验原理及实现](#)
14. [基于 CPLD 的 UART 设计](#)
15. [IPMI 在 VPX 系统中的应用与设计](#)
16. [基于 CPCI 总线的 PMC 载板设计](#)
17. [基于 VPX 总线的工件台运动控制系统研究与开发](#)
18. [PCI Express 流控机制的研究与实现](#)
19. [UART16C554 的设计](#)
20. [基于 VPX 的高性能计算机设计](#)
21. [基于 CAN 总线技术的嵌入式网关设计](#)
22. [Visual C 串行通讯控件使用方法与技巧的研究](#)
23. [IEEE1588 精密时钟同步关键技术研究](#)
24. [GPS 信号发生器射频模块的一种实现方案](#)
25. [基于 CPCI 接口的视频采集卡的设计](#)
26. [基于 VPX 的 3U 信号处理平台的设计](#)
27. [基于 PCI Express 总线 1394b 网络传输系统 WDM 驱动设计](#)
28. [AT89C52 单片机与 ARINC429 航空总线接口设计](#)
29. [基于 CPCI 总线多 DSP 系统的高速主机接口设计](#)
30. [总线协议中的 CRC 及其在 SATA 通信技术中的应用](#)
31. [基于 FPGA 的 SATA 硬盘加解密控制器设计](#)
32. [Modbus 协议在串口通讯中的研究及应用](#)
33. [高可用的磁盘阵列 Cache 的设计和实现](#)
34. [RAID 阵列中高速 Cache 管理的优化](#)

35. [一种新的基于 RAID 的 CACHE 技术研究](#)与实现
36. [基于 PCIE-104 总线的高速数据接口设计](#)
37. [基于 VPX 标准的 RapidIO 交换和 Flash 存储模块设计](#)
38. [北斗卫星系统在海洋工程中的应用](#)
39. [北斗卫星系统在远洋船舶上应用的研究](#)
40. [基于 CPCI 总线的红外实时信号处理系统](#)
41. [硬件实现 RAID 与软件实现 RAID 的比较](#)
42. [基于 PCI Express 总线系统的热插拔设计](#)
43. [基于 RAID5 的磁盘阵列 Cache 的研究与实现](#)
44. [基于 PCI 总线的 MPEG2 码流播放卡驱动程序开发](#)
45. [基于磁盘阵列引擎的 RAID5 小写性能优化](#)
46. [基于 IEEE1588 的时钟同步技术研究](#)
47. [基于 Davinci 平台的 SD 卡读写优化](#)
48. [基于 PCI 总线的图像处理及传输系统的设计](#)
49. [串口和以太网通信技术在油液在线监测系统中的应用](#)
50. [USB30 数据传输协议分析及实现](#)
51. [IEEE 1588 协议在工业以太网中的实现](#)
52. [基于 USB30 的设备自定义请求实现方法](#)
53. [IEEE1588 协议在网络测控系统中的应用](#)
54. [USB30 物理层中弹性缓冲的设计与实现](#)
55. [USB30 的高速信息传输瓶颈研究](#)
56. [基于 IPv6 的 UDP 通信的实现](#)
57. [一种基于 IPv6 的流媒体传送方案研究与实现](#)
58. [基于 IPv4-IPv6 双栈的 MODBUS-TCP 协议实现](#)
59. [RS485CAN 网关设计与实现](#)
60. [MVB 周期信息的实时调度](#)
61. [RS485 和 PROFINET 网关设计](#)
62. [基于 IPv6 的 Socket 通信的实现](#)
63. [MVB 网络重复器的设计](#)
64. [一种新型 MVB 通信板的探究](#)
65. [具有 MVB 接口的输入输出设备的分析](#)
66. [基于 STM32 的 GSM 模块综合应用](#)
67. [基于 ARM7 的 MVB CAN 网关设计](#)
68. [机车车辆的 MVB CAN 总线网关设计](#)
69. [智能变电站冗余网络中 IEEE1588 协议的应用](#)

VxWorks:

1. [基于 VxWorks 的多任务程序设计](#)

2. [基于 VxWorks 的数据采集存储装置设计](#)
3. [Flash 文件系统分析及其在 VxWorks 中的实现](#)
4. [VxWorks 多任务编程中的异常研究](#)
5. [VxWorks 应用技巧两例](#)
6. [一种基于 VxWorks 的飞行仿真实时管理系统](#)
7. [在 VxWorks 系统中使用 TrueType 字库](#)
8. [基于 FreeType 的 VxWorks 中文显示方案](#)
9. [基于 Tilcon 的 VxWorks 简单动画开发](#)
10. [基于 Tilcon 的某武器显控系统界面设计](#)
11. [基于 Tilcon 的综合导航信息处理装置界面设计](#)
12. [VxWorks 的内存配置和管理](#)
13. [基于 VxWorks 系统的 PCI 配置与应用](#)
14. [基于 MPC8270 的 VxWorks BSP 的移植](#)
15. [Bootrom 功能改进经验谈](#)
16. [基于 VxWorks 嵌入式系统的中文平台研究与实现](#)
17. [VxBus 的 A429 接口驱动](#)
18. [基于 VxBus 和 MPC8569E 千兆网驱动开发和实现](#)
19. [一种基于 vxBus 的 PPC 与 FPGA 高速互联的驱动设计方法](#)
20. [基于 VxBus 的设备驱动开发](#)
21. [基于 VxBus 的驱动程序架构分析](#)
22. [基于 VxBus 的高速数据采集卡驱动程序开发](#)
23. [Vxworks 下的冗余 CAN 通讯模块设计](#)
24. [WindML 工业平台下开发 S1d13506 驱动及显示功能的实现](#)
25. [WindML 中 Mesa 的应用](#)
26. [VxWorks 下图形用户界面开发中双缓冲技术应用](#)
27. [VxWorks 上的一种 GUI 系统的设计与实现](#)
28. [VxWorks 环境下 socket 的实现](#)
29. [VxWorks 的 WindML 图形界面程序的框架分析](#)
30. [VxWorks 实时操作系统及其在 PC104 下以太网编程的应用](#)
31. [实时操作系统任务调度策略的研究与设计](#)
32. [军事指挥系统中 VxWorks 下汉字显示技术](#)
33. [基于 VxWorks 实时控制系统中文交互界面开发平台](#)
34. [基于 VxWorks 操作系统的 WindML 图形操控界面实现方法](#)
35. [基于 GPU FPGA 芯片原型的 VxWorks 下驱动软件开发](#)
36. [VxWorks 下的多串口卡设计](#)
37. [VxWorks 内存管理机制的研究](#)
38. [T9 输入法在 Tilcon 下的实现](#)
39. [基于 VxWorks 的 WindML 图形界面开发方法](#)
40. [基于 Tilcon 的 IO 控制板可视化测试软件的设计和实现](#)
41. [基于 VxWorks 的通信服务器实时多任务软件设计](#)
42. [基于 VXWORKS 的 RS485MVB 网关的设计与实现](#)
43. [实时操作系统 VxWorks 在微机保护中的应用](#)

44. [基于 VxWorks 的多任务程序设计及通信管理](#)
45. [基于 Tilcon 的 VxWorks 图形界面开发技术](#)
46. [嵌入式图形系统 Tilcon 及应用研究](#)
47. [基于 VxWorks 的数据采集与重演软件的图形界面的设计与实现](#)
48. [基于嵌入式的 Tilcon 用户图形界面设计与开发](#)
49. [基于 Tilcon 的交互式多页面的设计](#)
50. [基于 Tilcon 的嵌入式系统人机界面开发技术](#)
51. [基于 Tilcon 的指控系统多任务人机交互软件设计](#)
52. [基于 Tilcon 航海标绘台界面设计](#)
53. [基于 Tornado 和 Tilcon 的嵌入式 GIS 图形编辑软件的开发](#)

Linux:

1. [Linux 程序设计第三版及源代码](#)
2. [NAND FLASH 文件系统的设计与实现](#)
3. [多通道串行通信设备的 Linux 驱动程序实现](#)
4. [Zsh 开发指南-数组](#)
5. [常用 GDB 命令中文速览](#)
6. [嵌入式 C 进阶之道](#)
7. [Linux 串口编程实例](#)
8. [基于 Yocto Project 的嵌入式应用设计](#)
9. [Android 应用的反编译](#)
10. [基于 Android 行为的加密应用系统研究](#)
11. [嵌入式 Linux 系统移植步步通](#)
12. [嵌入式 CC++ 语言精华文章集锦](#)
13. [基于 Linux 的高性能服务器端的设计与研究](#)
14. [S3C6410 移植 Android 内核](#)
15. [Android 开发指南中文版](#)
16. [图解 Linux 操作系统架构设计与实现原理（第二版）](#)
17. [如何在 Ubuntu 和 Linux Mint 下轻松升级 Linux 内核](#)
18. [Android 简单 mp3 播放器源码](#)
19. [嵌入式 Linux 系统实时性的研究](#)
20. [Android 嵌入式系统架构及内核浅析](#)
21. [基于嵌入式 Linux 操作系统内核实时性的改进方法研究](#)
22. [Linux TCP IP 协议详解](#)
23. [Linux 桌面环境下内存去重技术的研究与实现](#)
24. [掌握 Android 7.0 新增特性 Quick Settings](#)
25. [Android 应用逆向分析方法研究](#)
26. [Android 操作系统的课程教学](#)

27. [Android 智能手机操作系统的研究](#)
28. [Android 英文朗读功能的实现](#)
29. [基于 Yocto 订制嵌入式 Linux 发行版](#)
30. [基于嵌入式 Linux 的网络设备驱动设计与实现](#)
31. [如何高效学习嵌入式](#)
32. [基于 Android 平台的 GPS 定位系统的设计与实现](#)
33. [LINUX ARM 下的 USB 驱动开发](#)
34. [Linux 下基于 I2C 协议的 RTC 驱动开发](#)
35. [嵌入式下 Linux 系统设备驱动程序的开发](#)
36. [基于嵌入式 Linux 的 SD 卡驱动程序的设计与实现](#)
37. [Linux 系统中进程调度策略](#)
38. [嵌入式 Linux 实时性方法](#)
39. [基于实时 Linux 计算机联锁系统实时性分析与改进](#)
40. [基于嵌入式 Linux 下的 USB30 驱动程序开发方法研究](#)
41. [Android 手机应用开发之音乐资源播放器](#)
42. [Linux 下以太网的 IPv6 隧道技术的实现](#)
43. [Research and design of mobile learning platform based on Android](#)
44. [基于 linux 和 Qt 的串口通信调试器调的设计及应用](#)
45. [在 Linux 平台上基于 QT 的动态图像采集系统的设计](#)
46. [基于 Android 平台的医护查房系统的研究与设计](#)
47. [基于 Android 平台的软件自动化监控工具的设计开发](#)
48. [基于 Android 的视频软硬解码及渲染的对比研究与实现](#)
49. [基于 Android 移动设备的加速度传感器技术研究](#)
50. [基于 Android 系统振动测试仪研究](#)
51. [基于缓存竞争优化的 Linux 进程调度策略](#)

Windows CE:

1. [Windows CE.NET 下 YAFFS 文件系统 NAND Flash 驱动程序设计](#)
2. [Windows CE 的 CAN 总线驱动程序设计](#)
3. [基于 Windows CE.NET 的 ADC 驱动程序实现与应用的研究](#)
4. [基于 Windows CE.NET 平台的串行通信实现](#)
5. [基于 Windows CE.NET 下的 GPRS 模块的研究与开发](#)
6. [win2k 下 NTFS 分区用 ntldr 加载进 dos 源代码](#)
7. [Windows 下的 USB 设备驱动程序开发](#)
8. [WinCE 的大容量程控数据传输解决方案设计](#)
9. [WinCE6.0 安装开发详解](#)
10. [DOS 下仿 Windows 的自带计算器程序 C 源码](#)
11. [G726 局域网语音通话程序和源代码](#)

12. [WinCE 主板加载第三方驱动程序的方法](#)
13. [WinCE 下的注册表编辑程序和源代码](#)
14. [WinCE 串口通信源代码](#)
15. [WINCE 的 SD 卡程序\[可实现读写的源码\]](#)
16. [基于 WinCE 的 BootLoader 研究](#)
17. [Windows CE 环境下无线网卡的自动安装](#)
18. [基于 Windows CE 的可视电话的研究与实现](#)
19. [基于 WinCE 的嵌入式图像采集系统设计](#)
20. [基于 ARM 与 WinCE 的掌纹鉴别系统](#)
21. [DCOM 协议在网络冗余环境下的应用](#)
22. [Windows XP Embedded 在变电站通信管理机中的应用](#)
23. [XPE 在多功能显控台上的开发与应用](#)
24. [基于 Windows XP Embedded 的 LKJ2000 仿真系统设计与实现](#)
25. [虚拟仪器的 Windows XP Embedded 操作系统开发](#)
26. [基于 EVC 的嵌入式导航电子地图设计](#)
27. [基于 XPEmbedded 的警务区 SMS 指挥平台的设计与实现](#)
28. [基于 XPE 的数字残币兑换工具开发](#)

PowerPC:

1. [Freescale MPC8536 开发板原理图](#)
2. [基于 MPC8548E 的固件设计](#)
3. [基于 MPC8548E 的嵌入式数据处理系统设计](#)
4. [基于 PowerPC 嵌入式网络通信平台的实现](#)
5. [PowerPC 在车辆显控系统中的应用](#)
6. [基于 PowerPC 的单板计算机的设计](#)
7. [用 PowerPC860 实现 FPGA 配置](#)
8. [基于 MPC8247 嵌入式电力交换系统的设计与实现](#)
9. [基于设备树的 MPC8247 嵌入式 Linux 系统开发](#)
10. [基于 MPC8313E 嵌入式系统 UBoot 的移植](#)
11. [基于 PowerPC 处理器 SMP 系统的 UBoot 移植](#)
12. [基于 PowerPC 双核处理器嵌入式系统 UBoot 移植](#)
13. [基于 PowerPC 的雷达通用处理机设计](#)
14. [PowerPC 平台引导加载程序的移植](#)
15. [基于 PowerPC 嵌入式内核的多串口通信扩展设计](#)
16. [基于 PowerPC 的多网口系统抗干扰设计](#)
17. [基于 MPC860T 与 VxWorks 的图形界面设计](#)
18. [基于 MPC8260 处理器的 PPMC 系统](#)

19. [基于 PowerPC 的控制器研究与设计](#)
20. [基于 PowerPC 的模拟量输入接口扩展](#)
21. [基于 PowerPC 的车载通信系统设计](#)
22. [基于 PowerPC 的嵌入式系统中通用 I/O 口的扩展方法](#)
23. [基于 PowerPC440GP 型微控制器的嵌入式系统设计与研究](#)
24. [基于双 PowerPC 7447A 处理器的嵌入式系统硬件设计](#)
25. [基于 PowerPC603e 通用处理模块的设计与实现](#)
26. [嵌入式微机 MPC555 驻留片内监控器的开发与实现](#)
27. [基于 PowerPC 和 DSP 的电能质量在线监测装置的研制](#)
28. [基于 PowerPC 架构多核处理器嵌入式系统硬件设计](#)
29. [基于 PowerPC 的多屏系统设计](#)
30. [基于 PowerPC 的嵌入式 SMP 系统设计](#)

ARM:

1. [基于 DiskOnChip 2000 的驱动程序设计及应用](#)
2. [基于 ARM 体系的 PC-104 总线设计](#)
3. [基于 ARM 的嵌入式系统中断处理机制研究](#)
4. [设计 ARM 的中断处理](#)
5. [基于 ARM 的数据采集系统并行总线的驱动设计](#)
6. [S3C2410 下的 TFT LCD 驱动源码](#)
7. [STM32 SD 卡移植 FATFS 文件系统源码](#)
8. [STM32 ADC 多通道源码](#)
9. [ARM Linux 在 EP7312 上的移植](#)
10. [ARM 经典 300 问](#)
11. [基于 S5PV210 的频谱监测设备嵌入式系统设计与实现](#)
12. [Uboot 中 start.S 源码的指令级的详尽解析](#)
13. [基于 ARM9 的嵌入式 Zigbee 网关设计与实现](#)
14. [基于 S3C6410 处理器的嵌入式 Linux 系统移植](#)
15. [CortexA8 平台的 \$\mu\$ C-OS II 及 LwIP 协议栈的移植与实现](#)
16. [基于 ARM 的嵌入式 Linux 无线网卡设备驱动设计](#)
17. [ARM S3C2440 Linux ADC 驱动](#)
18. [ARM S3C2440 Linux 触摸屏驱动](#)
19. [Linux 和 Cortex-A8 的视频处理及数字微波传输系统设计](#)
20. [Nand Flash 启动模式下的 Uboot 移植](#)
21. [基于 ARM 处理器的 UART 设计](#)
22. [ARM CortexM3 处理器故障的分析与处理](#)
23. [ARM 微处理器启动和调试浅析](#)

24. [基于 ARM 系统下映像文件的执行与中断运行机制的实现](#)
25. [中断调用方式的 ARM 二次开发接口设计](#)
26. [ARM11 嵌入式系统 Linux 下 LCD 的驱动设计](#)
27. [Uboot 在 S3C2440 上的移植](#)
28. [基于 ARM11 的嵌入式无线视频终端的设计](#)
29. [基于 S3C6410 的 Uboot 分析与移植](#)
30. [基于 ARM 嵌入式系统的高保真无损音乐播放器设计](#)
31. [UBoot 在 Mini6410 上的移植](#)
32. [基于 ARM11 的嵌入式 Linux NAND FLASH 模拟 U 盘挂载分析与实现](#)
33. [基于 ARM11 的电源完整性分析](#)
34. [基于 ARM S3C6410 的 uboot 分析与移植](#)
35. [基于 S5PC100 移动视频监控终端的设计与实现](#)

Hardware:

1. [DSP 电源的典型设计](#)
2. [高频脉冲电源设计](#)
3. [电源的综合保护设计](#)
4. [任意波形电源的设计](#)
5. [高速 PCB 信号完整性分析及应用](#)
6. [DM642 高速图像采集系统的电磁干扰设计](#)
7. [使用 COM Express Nano 工控板实现 IP 调度设备](#)
8. [基于 COM Express 架构的数据记录仪的设计与实现](#)
9. [基于 COM Express 的信号系统逻辑运算单元设计](#)
10. [基于 COM Express 的回波预处理模块设计](#)
11. [基于 X86 平台的简单多任务内核的分析与实现](#)
12. [基于 UEFI Shell 的 PreOS Application 的开发与研究](#)
13. [基于 UEFI 固件的恶意代码防范技术研究](#)
14. [MIPS 架构计算机平台的支持固件研究](#)
15. [基于 UEFI 固件的攻击验证技术研究](#)
16. [基于 UEFI 的 Application 和 Driver 的分析与开发](#)
17. [基于 UEFI 的可信 BIOS 研究与实现](#)
18. [基于 UEFI 的国产计算机平台 BIOS 研究](#)
19. [基于 UEFI 的安全模块设计分析](#)
20. [基于 FPGA Nios II 的等精度频率计设计](#)
21. [基于 FPGA 的 SOPC 设计](#)
22. [基于 SOPC 基本信号产生器的设计与实现](#)
23. [基于龙芯平台的 PMON 研究与开发](#)
24. [基于 X86 平台的嵌入式 BIOS 可配置设计](#)

25. [基于龙芯 2F 架构的 PMON 分析与优化](#)
26. [CPU 与 GPU 之间接口电路的设计与实现](#)
27. [基于龙芯 1A 平台的 PMON 源码编译和启动分析](#)
28. [基于 PC104 工控机的嵌入式直流监控装置的设计](#)
29. [GPGPU 技术研究与发展](#)
30. [GPU 实现的高速 FIR 数字滤波算法](#)
31. [一种基于 CPU/GPU 异构计算的混合编程模型](#)
32. [面向 OpenCL 模型的 GPU 性能优化](#)
33. [基于 GPU 的 FDTD 算法](#)
34. [基于 GPU 的瑕疵检测](#)
35. [基于 GPU 通用计算的分析与研究](#)
36. [面向 OpenCL 架构的 GPGPU 量化性能模型](#)
37. [基于 OpenCL 的图像积分图算法优化研究](#)
38. [基于 OpenCL 的均值平移算法在多个众核平台的性能优化研究](#)
39. [基于 OpenCL 的异构系统并行编程](#)
40. [嵌入式系统中热备份双机切换技术研究](#)

Programming:

1. [计算机软件基础数据结构 - 算法](#)
2. [高级数据结构对算法的优化](#)
3. [零基础学算法](#)
4. [Linux 环境下基于 TCP 的 Socket 编程浅析](#)
5. [Linux 环境下基于 UDP 的 socket 编程浅析](#)
6. [基于 Socket 的网络编程技术及其实现](#)
7. [数据结构考题 - 第 1 章 绪论](#)
8. [数据结构考题 - 第 2 章 线性表](#)
9. [数据结构考题 - 第 2 章 线性表 - 答案](#)

FPGA / CPLD:

1. [一种基于并行处理器的快速车道线检测系统及 FPGA 实现](#)
- 2.

Created in Master PDF Editor