

基于小波变换与局部能量的多聚焦图像融合^{*}

苗启广^{1,2} 王宝树¹

(西安电子科技大学计算机学院 西安710071)¹ (桂林电子工业学院 桂林541004)²

摘要 本文提出了一种基于区域局部能量的不同聚焦点图像融合方法。本文利用小波分解,将图像分解为低频部分和高频部分,然后选择合适的比例,削弱低频部分,减小低频部分在整个图像能量中所占的比例,相对增大高频部分的比例,再重构图像。对于重构的图像,在空域中使用区域局部能量大小判定的方法,对各幅图像中的目标进行判断,并选择其中的清晰部分生成融合图像。该方法不但适用于多聚焦图像融合,而且还可以应用于特性类似的医学图像的融合。实验结果表明,该方法可以提取出多聚焦图像中的清晰目标,生成的融合图像效果优于 Laplacian 塔型方法和小波变换方法。

关键词 小波变换,多聚焦图像,图像融合,局部能量

Multi-Focus Image Fusion Based on Wavelet Transform and Local Energy

MIAO Qi-Guang^{1,2} WANG Bao-Shu¹

(School of Computer Science, Xidian University, Xi'an 710071)¹ (Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004)²

Abstract A new multi-focus image fusion algorithm is given in this paper, which is based on the difference of the region energy of each image. The wavelet decomposition is used to decompose the original image to two different parts, namely, the low frequency part and the high frequency part. The high frequency part contains the horizontal high frequency, the vertical high frequency and the diagonal high frequency. For the low frequency part, an appropriate parameter R is chosen to reduce the proportion of the energy of the low frequency part to that of the whole image. In this way, the proportion of high frequency part to the low frequency part is improved. The adjusted images are reconstructed with wavelet reverse transform. For the new reconstructed images, the method of comparing the region energy to determine in which image the object is clear is used. The clear object is decided by the comparison of the difference of energy of the two new adjusted different focus images pixel by pixel. Through this way, the clear region of each original image are decided automatically, and merged into the fused image. The approach can be applied not only to multi-focus image fusion, but also to image fusion of medical images, with a similar property of multi-focus images. Experiments show that the proposed algorithm works better in extracting the clear object from the original images than that of the other image fusion methods in multi-focus image fusion.

Keywords Wavelet transform, Multi-focus image, Image fusion, Region energy

1 引言

图像融合就是采用一定的算法,把两个或多个具有互补特性的源图像融合成一个新的图像,从而使融合后的图像具有更高的可信度和清晰度、更好的可理解性^[1]。图像融合是多传感器数据融合的一个重要分支,它不仅可以使处理后的图像更适合人的视觉观察,而且可以为进一步的计算机图像处理提供更有用的信息,例如图像的分类、识别与目标检测等^[2,3]。图像融合在自动目标识别、计算机视觉、机器人、复杂智能系统、医学图像处理以及军事应用等领域有着广泛的应用潜力。本文所研究的多聚焦图像融合是图像融合中的一个研究方向,所谓多聚焦图像融合指的是将多幅已经配准的、成像条件相同而且关于同一场景的不同焦点图像,融合成一幅完全清晰的图像。

小波变换是时间-尺度分析和多分辨分析的一种新技术,使用小波变换可以将原始图像分解成一系列不同空间分辨率和频域特性的子图像,充分反映原始图像局部变化特征^[5]。图像的能量是描述图像的一种基本属性,从统计特性上描述了图像的特点。由于区域能量较大的中心像素代表了原始图像中的明显特征,同时,图像的局部特征一般不只取决于某一像素,因此,采用基于区域局部能量特性量测的选择相对于仅仅根据单一独立像素的简单选择来确定融合像素来说,

显得更合理、更科学。

本文提出了一种新的多聚焦图像融合方法。该方法利用小波分解将原始图像分解为低频部分和高频部分,然后去除部分低频信息,再和高频部分重构得到一幅新的图像,对这幅新图像,以其局部能量作为判定依据,判定原图像中的模糊目标和清晰目标,并将两幅原始图像进行合并,得到一幅各目标均清晰的融合图像。该方法不但适用于多聚焦图像融合,而且还可以应用于特性类似的医学图像的融合。实验结果表明,本方法具有比小波变换方法和 Laplacian 塔型方法更好的融合效果。

2 图像的小波变换

小波变换是正交变换,除了具有传统的 Fourier 变换的优点外,还较好地解决了 Fourier 变换在时域和频域的矛盾,能够在时域和频域上同时具有较好的局部化特性。图像是二维信号,经小波分解后,可以分解成低频子图像和高频子图像(包括水平高频、垂直高频和对角高频子图像),低频子图像还可以再逐级分解,分解后的各级子图像都包含着原始图像的空间结构信息。

设二维图像为 $C(m, n)$,则对于给定的尺度函数和小波函数,可用下式进行小波分解^[6,7]:

$$C_k(i, j) = \sum_m \sum_n C_{k-1}(m, n) h(2m-i) h(2n-j)$$

^{*} 本文获得国防科技预研基金项目(51406050301DZ0107)资助。苗启广 讲师,博士生,主要从事智能信息处理与模式识别、图像融合等方面的研究;王宝树 教授、博导,主要研究方向:数据融合、智能信息处理等。

苗启广 讲师,博士生,主要从事智能信息处理与模式识别、图像融合等方面的研究;王宝树 教授、博导,主要研究方向:数据融合、智能信息处理等。

$$\begin{aligned}
 d_k^H(i, j) &= \sum_m \sum_n C_{k-1}(m, n) h(2m-i) g(2n-j) \\
 d_k^V(i, j) &= \sum_m \sum_n C_{k-1}(m, n) g(2m-i) h(2n-j) \\
 d_k^D(i, j) &= \sum_m \sum_n C_{k-1}(m, n) g(2m-i) g(2n-j) \quad (1)
 \end{aligned}$$

其重构过程为:

$$\begin{aligned}
 C_{k-1}(m, n) &= \sum_i \sum_j C_k(i, j) h(2m-i) h(2n-j) + \\
 &\quad \sum_i \sum_j d_k^H(i, j) h(2m-i) g(2n-j) + \sum_i \sum_j d_k^V(i, j) \\
 &\quad g(2m-i) h(2n-j) + \sum_i \sum_j d_k^D(i, j) g(2m-i) g(2n-j) \quad (2)
 \end{aligned}$$

上式中, C_k 、 d_k^H 、 d_k^V 和 d_k^D 分别表示原图像在本分辨率下的低频分量、水平高频分量、垂直高频分量和对角高频分量。其中低频分量反映了原图像的近似和平均特性,集中了图像的大部分能量信息。三个高频分量体现了原图像的突变特性,对应于原图像的边缘、区域边界等,也称为边缘子图像。

3 局部图像的能量

图像的能量是图像的一个基本属性,从统计特性上描述了图像的某些特点。一幅图像 f 的能量 E 定义为^[8]:

$$E = \sum_{(i,j) \in w} f^2(i, j) \quad (3)$$

式中 $i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N, M, N$ 分别为图像 f 的高度和宽度。

由于图像中某像素与邻域像素之间相关性比较大,对图像中某像素 $f(i, j)$ 的局部能量定义为其邻域窗口内的能量:

$$E = \sum_{(m,n) \in w} f^2(m, n) \quad (4)$$

式中, $i-k \leq m \leq i+k, j-k \leq n \leq j+k$; 窗口的宽度为 $w(w=2k+1)$ 个像素。

4 融合方法

在多聚焦图像中,焦点附近的目标清晰,而离焦区域目标模糊。对于离焦模糊的过程,实质上类似于一个方差为 σ 的高斯平滑函数 $G_\sigma(x, y)$ 对清晰图像进行了低通滤波,原图像中的一些高频信息被滤掉了,故离焦模糊目标的局部能量必然比原始清晰图像对应目标处的局部能量要小。基于此,对于多聚焦图像,可以通过计算其相应像素邻域内的能量大小作为清晰目标和模糊目标的判断依据。由于低频部分能量占的比

例比较大,而目标清晰和模糊的特征也主要体现在高频部分中,故可以适当减少低频子图像的比例来重构图像,得到一幅高低频比例升高的新图像,而后来计算图像局部能量进行清晰目标的判定。

将图像分别做一级小波分解,分解后,信号的能量不变,而分布发生了比较大的变化,图像的能量被分散到低频分量和高频分量上。假设将低频子图像削弱为原来的 $\frac{1}{R}$, 参与融合的图像和融合图像分别为 A, B 和 F 。将图像 A, B 分别做一级小波分解,得到低频系数 C_A, C_B 和高频系数 H_A, H_B , 则将每个分解得到的低频系数乘以 $\frac{1}{R}$, 然后 $\frac{C_A}{R}, \frac{C_B}{R}$ 再和高频系数 H_A, H_B 一起, 重构得到减少了低频比例的新图像 A_1, B_1 。设图像 A_1, B_1 中像素 (i, j) 处的能量分别为 E_{A_1} 和 E_{B_1} , 其计算公式如下:

$$E_{A_1} = \sum_{(i,j) \in w} A_1^2(i, j) \quad E_{B_1} = \sum_{(i,j) \in w} B_1^2(i, j) \quad (5)$$

式中, w 是像素 (i, j) 的邻域窗口, $A_1(i, j), B_1(i, j)$ 为图像 A_1, B_1 像素 (i, j) 处的灰度值。

对于图像中每一个像素,逐个计算其能量,则融合清晰图像 F 为:

$$F(i, j) = \begin{cases} A(i, j), E_{A_1} \geq E_{B_1} (\text{清晰目标在 A 中}) \\ B(i, j), E_{A_1} < E_{B_1} (\text{清晰目标在 B 中}) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N, M, N$ 分别为图像 f 的高度和宽度。

5 实验结果与分析

此处所选的图像为常用的 Clock 图像, 图像大小为 123×122 像素, 256 级灰度。图 1. b 聚焦在右边的大闹钟上, 大闹钟清晰, 小闹钟模糊; 图 1. c 聚焦在左边的小闹钟上, 小闹钟清晰, 大闹钟模糊。通过剪贴的方式可以获得两个闹钟都清晰的原始清晰图像如图 1. a 所示。

采用简单平均方法的融合结果如图 1. d 所示。图 1. e 是采用 Laplacian 金字塔方法得到的融合结果, 图 1. f 是采用 8 层 haar 小波分解, 对于高频层采用取极大值方法, 低频层采用平均的融合方法得到的融合结果。直接采用空域局部能量差异情况判定进行融合 (相当于 $R=1$) 的融合结果如图 1. g 所示, 本文方法的融合结果如图 1. h 所示, 采用的参数 $R=100, W=9$ 。上述五种融合算法的实验结果如表 1 所示。

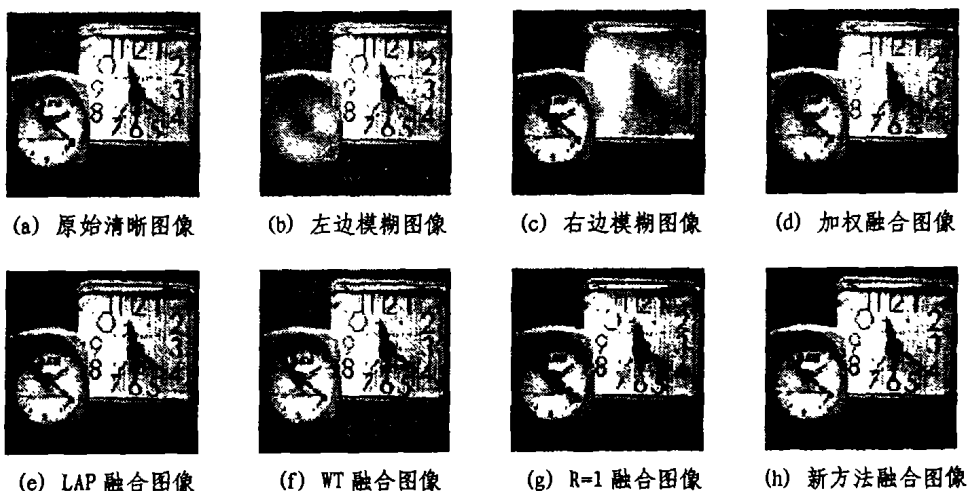


图1 原始图像和各种方法融合结果图像

对图 1. d~1. h, 从视觉效果上看, 本文方法融合图像清晰, 边缘特征信息明显。加权平均方法融合结果图像明显是有模糊的, Laplacian 方法和小波方法和本文方法的融合结果比

较接近, 两个闹钟的图像都比较清晰。从图 1. g 可以看出, 直接采用空域局部能量差异情况进行判定融合 (相当于 $R=1$), 融合效果有明显的块状振铃效应, 而且也有比较模糊的感觉。

在这儿,由于可以通过剪贴的方法获得标准原始图像,可以采用均方误差(MSE)作为客观评价融合效果的标准,融合图像 F 与理想图像 R 的均方误差为:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i, j) - F(i, j)]^2 \quad (7)$$

式(7)中, M 和 N 分别是图像的宽度和高度, $F(i, j)$ 是融合结果图像在坐标 (i, j) 处的像素值, $R(i, j)$ 是原始清晰图像在坐标 (i, j) 处的像素值。MSE 越小,说明融合效果越好,反之,则融合效果越差。上述五种融合算法的实验结果如表1所示。

表1 四种融合算法的客观评价测度值

	简单平均法	Laplacian塔型	小波变换方法	直接空域局部能量方法	本文方法
MSE	63.6364	7.3361	11.1206	87.8904	5.5758

从表1的客观评价测度值,可以看出,本文的方法均方误差最小,这表明,从客观评测上看,本文的方法较好地保留了各幅图像的有用信息,与标准图像相比,差异最小,融合效果

比其它几种方法好。

6 不同类型医学图像的融合

对于医学影像的CT图像和MRI图像,由于其固有的特点,可以近似认为是不同聚焦而生成的两种图像,只是离焦部分目标高度模糊,基本不可见。图2.a为CT(Computer Tomography,计算机X射线断层造影术)图像,图2.b是MRI(Magnetic Resonance imaging,核磁共振成像)图像。CT和MRI得到的均是断层扫描图像,然而其特性是有差别的。CT图像中图像亮度于组织密度有关,骨骼在CT图像中亮度高,一些软组织在CT图像中无法反映。MRI图像中图像的亮度与组织中的氢原子等的数量有关,一些软组织在MRI图像中亮度高,而骨骼在MRI图像中无法显示。也就是说,其包含的信息中有不少是“互补”的。将本文的方法应用于医学图像融合,融合时本方法参数选择 $R=100, W=5$, 本文方法和其它几种方法的融合结果如图2所示。

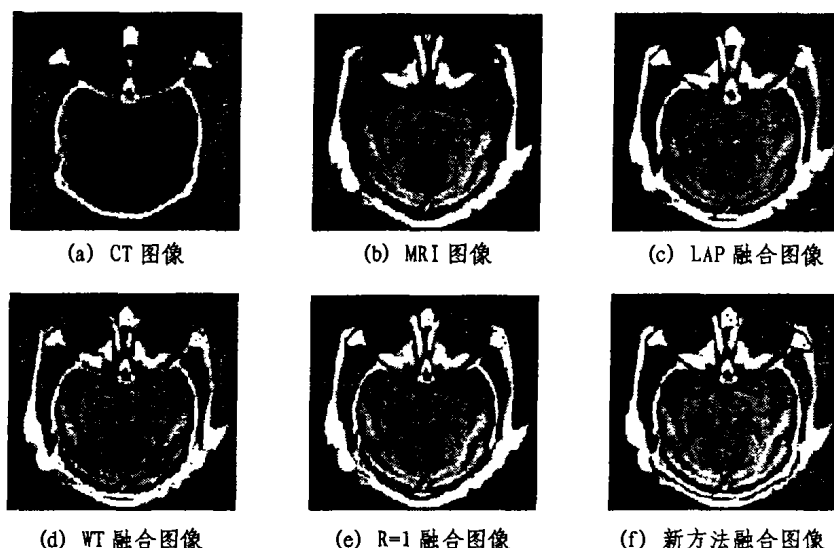


图2 医学CT和MRI图像和各方法融合结果

从融合结果可以看出,Laplacian塔型方法、小波变换方法、直接空域局部能量判定方法和本文的方法都能够对这两类医学图像进行融合,而且效果还可以接受。但是,仔细比较,可以发现,本文方法较其它几种方法要好,融合图像包含的细节部分更多,效果比较理想。

由于这类图像没有标准参考图像,对于融合效果的客观性能评价采用清晰度和熵两个评价测度来进行。融合后图像的熵的大小反映了融合图像包含的信息量的多少,图像的熵的定义为:

$$H = - \sum_{g=0}^{L-1} p(g) \log_2 p(g) \quad (8)$$

其中: H 表示图像的熵, L 表示图像的总的灰度级数; $p(g)$ 表示灰度值为 g 的像素数 N_g 与图像总像素数 N 之比,即: $p(g) = \frac{N_g}{N}$ 。一幅图像的清晰度,大致反映了图像的清晰程度和可视效果,图像的清晰度定义为:

$$C = \sum_{(x,y) \in W} \{ [f(x,y) - f(x+1,y)]^2 + [f(x,y) - f(x,y+1)]^2 \}^{1/2} \quad (9)$$

式(9)中, W 表示整个图像窗口, $x=1 \dots M, y=1 \dots N, M$ 和 N 分别为图像的高度和宽度。一般情况下,融合图像的熵越大,说明从原始参与图像中提取的信息越多,效果越好;融合图像

的清晰度越高,可视和分辨效果越好。

表2 四种融合算法的客观评价测度值

	Laplacian塔型	小波变换方法	直接空域局部能量方法	本文方法
清晰度	8.0522	11.0873	11.4097	13.0279
熵	6.6371	5.0786	6.7671	6.7892

从表2的客观评价测度可以看出,本文的方法清晰度最高,熵最大,即本文方法的融合图像携带的信息量较大,融合效果较好。

结论 本文提出了一种基于小波分解和局部能量特性进行判决融合的图像融合方法。由于多聚焦图像的离焦模糊区域细节边缘信息都平滑了,其相应的能量也减少了。但是,由于图像的能量大部分集中于低频区域,高频部分所占的比例小,所以,直接使用区域局部能量判定来进行图像融合,易于受噪声等信息的干扰,融合效果不好。据此,利用小波分解,将二维图像分解为低频部分和三个方向的高频部分,然后削弱低频部分,减小低频部分在整个图像能量中所占的比例,相对增大高频部分的比例,然后重构图像,再在空域中使用区域局部能量的方法进行判定融合。实验仿真结果表明,本方法的融

合图像,保留了不同聚焦点图像中的清晰区域及其各种特征信息,融合效果优于其它几种融合方法。而且,将本文的方法应用于医学图像融合,效果也较理想。

融合算法中,保留低频部分的比例参数 R 和区域局部能量计算选择的窗口大小参数 W 的选择,根据不同的图像有所不同,使用的时候可以根据情况通过经验和实验的方法选取。此外,对于小波分解层数的选取,本文中是直接选择了一层小波分解,使用时根据图像的不同,也可以选择多层小波分解,这样,可以保留更多的高频分量参与局部能量的判定分析,提高融合效果。

参考文献

1 Aggarwal J K. Multisensor Fusion for Computer Vision [M].

- Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 1993
- 朱述龙,张占睦. 遥感图像获取与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2000
 - Pohl C, Van Genderen J L. Multi-sensor image fusion in remote sensing: concepts, methods, and applications [J]. IntJ Remote Sensing, 1998,19(5):823~854
 - Varshney P K. Multi-sensor data fusion [J]. Electron & Commun Eng J, 1997, 9(6):245~253
 - Yocky D A. Image merging and data fusion by means of the discrete two dimensional wavelet transform [J]. J. Opt Soc Am A, 1995,12(9):1834~1841
 - 焦李成,保铮. 小波理论与应用: 进展与展望[J]. 北京: 电子学报, 1993,21(7):91~96
 - Daubechies I. Orthogonal bases of compactly supported wavelets [J]. Com. Pure Appl. Math., 1988,41(2):909~996
 - 徐飞,施晓红著. MATLAB 应用图像处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. 5

(上接第198页)

40个序列(格子数为40)。计算每个格子对应的两个序列的位

变化率,然后对40个格子序列的计算结果求平均值,得到表4中的位变化率50.53%。其他列的数据均按此方法产生。

表4 时空混沌二值序列的参数敏感性

项目	序列长度 N			
	1000	2000	5000	10000
测试条件	$x_0=0.300000$	$x_0=0.300000$	$x_0=0.300000$	$x_0=0.300001$
(x_0 为驱动系统初值, w 为驱动系统控制参数)	$x_0=0.299999$	$x_0=0.300000$	$w=2$	$w=2$
	$w=2$	$w=2$	$w=3$	$w=3$
位变化率(%)	50.53	49.77	50.14	49.93

表4中的实验结果表明,时空混沌二值序列对驱动系统的初值和参数非常敏感,不同初值和控制参数下得到的二值序列都有接近50%的位变化率,因此对参数进行猜测都将导致对序列破译的失败。

结论 本文基于一维耦合映像格子模型,用 Chebyshev 混沌映射作为驱动序列,给出了时空混沌二值序列的产生方法,并对二值序列的性能进行了详细分析。分析结果表明,本文讨论的时空混沌二值序列具有十分理想的随机性和相关性。由于混沌序列的产生非常方便,只需修改驱动系统的初值和控制参数,就可以产生数量众多性能优良的二值序列,并且序列的线性复杂度高、难以破译,可广泛应用于保密通信、密码学等诸多领域。如用时空混沌二值序列替代 m -序列或 Gold 序列,以满足 CDMA 通信对大容量的需求。

由于耦合映像格子模型可以一次同时产生多个随机序列(与格子的规模有关),因此可利用该模型来设计多路通信系统,以满足如数字图像等大数据对象的多路保密通信需求。本文的进一步工作可研究这种多路保密通信系统,我们将在后续的文章中报道。

参考文献

- Schneier B. Applied Cryptography: Protocols, algorithm and source code in C(Second Edition). Wiley, New York, 1996
- Kohda T, Tsuneda A. Pseudonoise sequences by chaotic nonlinear maps and their correlation properties. IEICE Trans. Commun., 1993, E76-B: 855~862
- Werter M J. An Improved Chaotic Digital Encoder. IEEE Trans. on CAS-II, 1998, 45(2): 227~229
- Stojanovski T, Kocarev L. Chaos based random number generators Part I: Analysis [cryptography]. IEEE Trans. on CAS-I, 2001, 43(3): 281~288
- Stojanovski T, Pihl J, Kocarev L. Chaos based random number generators Part II: Practical realization. IEEE Trans. on CAS-I, 2001, 43(3): 382~385

- Kocarev L, Jakimoski G. Pseudorandom bits generated by chaotic maps. IEEE Trans. on CAS-I, 2003, 50(1): 123~126
- Pérez G, Cerdeira H A. Extracting messages masked by chaos. Phys. Rev. Lett., 1995, 74(11): 1970~1973
- Yang T, Lin B Y, Chun M Y. Application of neural networks to unmasking chaotic secure communication. Physica D, 1998, 124(1-3): 248~257
- Tsay S C, Huang C K, Chiang C T. Design the hyperchaotic cryptosystems via the Gerschgorin theorem. Chaos, Solitons and Fractals, 2004, 19(4): 935~948
- 彭军, 廖晓峰, 吴中福, 等. 一个时延混沌系统的耦合同步及其在保密通信中的应用. 计算机研究与发展, 2003, 40(2): 263~268
- Guptea N, Sharma A, Pradhan G R. Dynamical and statistical behaviour of coupled map lattices. Physica A, 2003, 318 (1-2): 85~91
- Aranson I, Golomb D, Sompolinsky H. Spatial coherence and temporal chaos in macroscopic with asymmetrical couplings. Physical Review E, 1992, 68(24): 3495~3498
- Xiao J H, Hu G, Qu Z L. Synchronization of spatiotemporal chaos and its application to multichannel spread-spectrum communication. Physical Review E, 1996, 77(20): 4162~4165
- Jiang Y, Parmananda P. Synchronization of spatiotemporal chaos in asymmetrically coupled map lattices. Physical Review E, 1998, 57(4): 4135~4139
- 李宁, 山秀明, 任勇, 等. 一种实用的时空混沌二值化方法. 系统工程与电子技术, 2002, 24(11): 60~63
- 邓浩, 华一满, 倪婉荪. 混沌伪随机序列和数字语音保密通信. 通信学报, 1999, 20(4): 29~35
- Golomb S W. Shift Register Sequences. Holden-Day, San Francisco, 1967
- Massey J L. Shift-register synthesis and BCH decoding. IEEE Trans. on IT, 1969, IT-15(1): 122~127
- Janson B. The shortest feedback shift register, that can generate a given sequence. Advances in Cryptology, EURO CRYPTO'89 (LNCS 435), 1990. 90~99
- Rueppel R A. Linear complexity and random sequences. Advances in Cryptology, EURO CRYPT'85 (LNCS 219), 1986. 167~188
- 周红. 有限精度混沌系统的 m 序列扰动实现. 电子学报, 1997, 25(7): 95~97
- 李一兵, 楼喆, 李彬. 一种新的复合混沌扩频序列. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 22(3): 75~79