

使用静态小波变换增强与降噪真彩图像

熊杰¹ 冯晓强² 耿国华¹ 周明全³

(西北大学可视化技术研究所 西安 710127)¹ (西北大学光子学与光子技术研究所 西安 710127)²
(北京师范大学信息科学与技术学院 北京 100875)³

摘要 由于几乎所有真彩图像都不同程度含有噪声,并且含有阴影和明亮光源的图像的动态范围超过了多数电子设备和人眼的感受区域,这就要求真彩图像被增强的同时还能够对噪声进行抑制。因此,在分析了噪声在HSV色彩空间分布的基础上,根据静态小波变换解释的入射-反射模型,提出了一种能够同时增强与降噪真彩图像的方法。实验表明,本方法在明显增强真彩图像的同时,还可以有效抑制图像中的噪声。

关键词 真彩图像, HSV空间, 静态小波变换, 入射-反射模型, 增强, 噪声

Real Color Image Enhanced and Denoised by Stationary Wavelet Transform

XIONG Jie¹ FENG Xiao-qiang² GENG Guo-hua¹ ZHOU Ming-quan³

(Institute of Visualization Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)¹

(Institute of Photonic and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)²

(School of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)³

Abstract Because all real color images contain noise in different degree and the high dynamic range of some real color images with dark shadows and bright light sources exceeds the range of most electronic capturing devices and human eyes sensing, real color images should be enhance and denoised at the same time. Based on the analysis of noise in H, S, V channel and a new illumination-reflectance model described by stationary wavelet transform(SWT), a new method which can enhance and denoise real color images simultaneous was put forward. Experiments show that the color images are enhanced obviously and the noise is efficiently restrained at one time.

Keywords Real color image, HSV space, Stationary wavelet transform, Illumination-reflectance model, Enhancement, Noise

1 概述

带有暗影和明亮光源的高动态真彩照片大量存在,因为这类图像的动态范围超过了人眼和一些电子设备的感应区域,所以部分影像很难被人眼感受。除此之外,基本上所有真彩图像都不同程度含有噪声。因此,图像的动态范围需要被压缩,但在压缩图像的动态范围时,即在增强图像时,图像中的噪声几乎都被放大。所以,良好的图像增强方法要求在压缩图像动态范围以便人眼观察的同时,也能够一定程度上抑制图像中的噪声。

真彩图像的增强与降噪应该考虑3个部分的内容:1)增强前后色彩的一致性问题,即色彩的保真性,文献[1]分析了色彩保真的主要方法,其中认为真彩图像由RGB色彩空间变换到色彩与亮度近似正交(即色彩亮度近似可分离)的色彩空间,就可以满足大部分的应用需求。2)噪声在色彩、亮度近似正交的色彩空间(如HSV色彩空间)的分布状况。3)寻找一种能够同时满足增强和降噪的光照模型。目前,很少有文献

涉及真彩图像被同时增强和降噪,文献[2]虽然提出了一种真彩图像降噪方法,但几乎未提及图像的增强。

因此,本文分析了真彩图像噪声在HSV色彩空间的分布情况,提出用静态小波变换重新描述入射-反射模型,在新模型基础上用本文提出的方法可以同时进行真彩图像的增强与降噪。实验证实,采用本文提出的方法增强后,图像色彩保持良好,动态范围适当,并且噪声被明显抑制。

2 真彩图像的增强及降噪

2.1 真彩图像噪声在HSV色彩空间的分布

一般情况下,图像噪声大多包含加法噪声,部分情况下包含乘法噪声,由于数字摄像设备的光路、电路和感光元件的同一性,噪声在R,G,B通道中是相等的^[3]。

$$\begin{cases} R' = \Delta\alpha \times R + \Delta\beta \\ G' = \Delta\alpha \times G + \Delta\beta \\ B' = \Delta\alpha \times B + \Delta\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\Delta\alpha$ 是乘法噪声, $\Delta\beta$ 是加法噪声。

到稿日期:2009-01-10 返修日期:2009-09-18 本文受国家自然科学基金(60573179)资助。

熊杰(1969-),男,博士生,主要研究方向为图像处理等,E-mail: xiongjie69@126.com;冯晓强(1974-),男,博士,主要研究方向为光子学、光谱学、图像处理等;耿国华(1955-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为图像处理等;周明全(1954-),男,教授,主要研究方向为图形图像处理。

在 HSV 色彩空间中包含噪声的色度通道 H' 可表示为:

$$\max' = \max(R', G', B') \quad (2)$$

$$\min' = \min(R', G', B') \quad (3)$$

$$\begin{cases} H' = (G' - B') / (\max' - \min'), R' = \max' \\ H' = 2 + (B' - R') / (\max' - \min'), G' = \max' \\ H' = 4 + (R' - G') / (\max' - \min'), B' = \max' \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} H' = \frac{(\Delta\alpha \times G + \Delta\beta) - (\Delta\alpha \times B + \Delta\beta)}{(\Delta\alpha \times \max + \Delta\beta) - (\Delta\alpha \times \min + \Delta\beta)} = H \\ H' = 2 + \frac{(\Delta\alpha \times B + \Delta\beta) - (\Delta\alpha \times R + \Delta\beta)}{(\Delta\alpha \times \max + \Delta\beta) - (\Delta\alpha \times \min + \Delta\beta)} = H \\ H' = 4 + \frac{(\Delta\alpha \times R + \Delta\beta) - (\Delta\alpha \times G + \Delta\beta)}{(\Delta\alpha \times \max + \Delta\beta) - (\Delta\alpha \times \min + \Delta\beta)} = H \end{cases} \quad (5)$$

可以得到如下结论:色度通道不会受到加法噪声和乘法噪声的影响。

含有噪声的亮度 V' 为:

$$V' = \max' = \Delta\alpha \times V + \Delta\beta \quad (6)$$

含有噪声的色饱和度 S' 为:

$$S' = (\max' - \min') / \max' = \Delta\alpha \times (\max - \min) / (\Delta\alpha \times V + \Delta\beta) \quad (7)$$

如果能够消除 V' 中的 $\Delta\beta$, 则 S' 中的 $\Delta\alpha$ 也会自动消失。因此, 可以认为乘法噪声不能单独影响色饱和度通道, 色饱和度和通道主要受加法噪声的影响。如果 $V \gg \Delta\beta$ 或者 $\Delta\alpha \times V \gg \Delta\beta$, 则可以近似认为 $S' = S$ 。

2.2 静态小波变换解释的入射-反射模型

入射-反射模型是图像增强的重要基础, 它揭示了人类视觉特性的许多原理, 并且从理论上描述了物体成像的物理学原理, 因而其有能力压缩图像的高动态范围, 所以在实际应用中扮演了十分重要的角色^[4-7]。

一幅图像可以描述为:

$$f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y) \quad (8)$$

式中, $0 < i(x, y) < 1$ 是图像的入射分量, 其主要由图像中的所有光源决定, $0 < r(x, y) < 1$ 是图像的反射分量, 其主要由图像中的物体和细节决定。

入射分量 $i(x, y)$ 是图像中的慢变部分(主要反映图像中的光照, 入射-反射模型认为图像的高动态主要由入射分量引起), 反射分量是图像中的快变部分(主要反映图像中的细节)。使用入射-反射模型增强图像的思想主要是衰减图像中入射分量的能量。如果能够从图像中分离出入射分量, 就可以通过衰减入射分量的能量来消除入射分量对图像的影响, 达到压缩图像动态范围的目的。但是, 入射-反射模型严格限制入射分量^[8], 它认为图像中的光照必须是均匀的, 不过有很多图像的光照剧烈且不均匀, 这就会造成“光晕”及细节损失等诸多问题。除此之外, 传统的入射-反射模型对图像降噪无能为力。

用眼睛观察带有明亮光源的场景时, 我们总能够不断调节晶状体和瞳孔用不同尺度来适应场景中光亮和细节的变化。小波变换的多尺度特性与人眼的功能十分相似。小波分解后, 其高频部分主要由图像的细节(即反射分量的主要组成部分并包含噪声)构成, 低频部分主要由图像的光照(即入射分量的主要组成部分)构成。

假设有下式的 2-D 多尺度分解^[9]:

$$V_j = V_{j+1} \oplus W_{j+1} \quad (9)$$

式中, V_j 是小波分解后的低频部分 cA_j , W_{j+1} 由小波分解的

高频部分 $cD_j^{(h)}$, $cD_j^{(v)}$ 和 $cD_j^{(d)}$ 构成。 cA_j , $cD_j^{(h)}$, $cD_j^{(v)}$ 和 $cD_j^{(d)}$ 的含义如图 2 所示, j 是小波变换的尺度。

$$W_{j+1} = \frac{V_j}{V_{j+1}} \quad (10)$$

$$V_{j-1} = (V_{j+1} \oplus W_{j+1}) \oplus W_j = V_{j+1} \oplus W_{j+1} \oplus W_j \quad (11)$$

$$V_0 = V_j \oplus W_j \oplus W_{j-1} \oplus \dots \oplus W_2 \oplus W_1 \quad (12)$$

假设:

$$W = W_j \oplus W_{j-1} \oplus \dots \oplus W_2 \oplus W_1 \quad (13)$$

则可以得到:

$$V_0 = V_j \oplus W \quad (14)$$

如果 $V_0(x, y)$ 被看作 $f(x, y)$, 则由于 V_j 是 $V_0(x, y)$ 的慢变部分, $i(x, y)$ 是 $f(x, y)$ 的慢变部分, 因此 V_j 可以近似地看作 $i(x, y)$; 与此类似, W 也可以近似地看作 $r(x, y)$ 。入射-反射模型也就可以近似地用小波变换表示。式(2)就可以近似地表示为:

$$f(x, y) = V_j(x, y) \oplus W(x, y) \quad (15)$$

图 1 表示了式(15)对图像的分解, 小波变换很容易分离图像的入射分量与反射分量, 因为静态小波变换(SWT)分解信号时不改变信号长度, 其十分有利于图像的分解和合成, 正如图 1 所示, 可以方便直观地表示入射-反射模型。

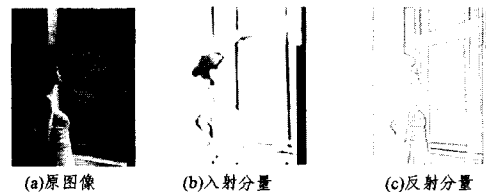


图 1

图 2 中, F_j 和 G_j 为静态小波变换的滤波器。

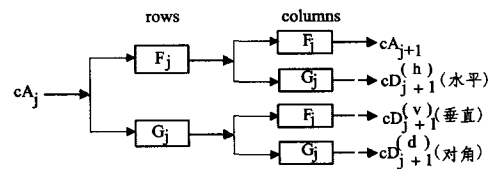


图 2 SWT

因为新模型有效分离了入射和反射分量, 压缩图像动态范围时, 可以只处理入射分量, 由于细节大多被分离在反射分量之中, 可以最大限度减少对细节的影响, 因此“光晕”和细节模糊等影响图像质量的现象可以得到有效抑制。与此同时, 噪声被分离在反射分量, 可以很方便地对噪声在小波域给予滤除, 而不会影响图像的光照。入射-反射模型的小波解释很好地兼顾了增强和降噪的双重作用。

2.3 亮度通道的增强与降噪

通过 2.2 节分析可以得到, 噪声被 SWT 分解在其高频区域的各个部分, 因此可以使用 bayes 软域值 (bayes soft threshold)^[10] 滤除各高频部分的噪声。

$$\hat{W}_j = \text{sign}(W_j) \times (|W_j| - T)_+ \quad (16)$$

$$T = r \times \sigma_n^2 / \sigma_x \quad (17)$$

式中, σ_n 是噪声的标准差, σ_x 是图像信号的标准差。 r 是比例系数, 当图像中噪声较大时, r 的取值也较大, 但过大的 r 会滤掉图像中过多的细节并使图像模糊, r 一般取值从 $\sqrt{2}$ 到 5。经过试验发现, 小波选为 sym4, 小波尺度为 4, $r=3$ 时, 就可

以很好地满足图像降噪的需要。

图 3(a)是图 1(a)加入高斯(Gaussian)噪声(0,0.001)的图像。图 3(a)的 PSNR(峰值信噪比)是 30.518。图 3(b)是图 3(a)用本文方法的降噪图像,其 PSNR 是 36.168。

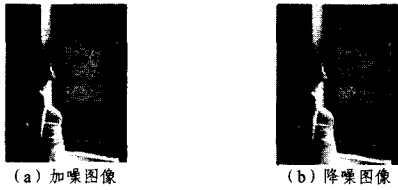


图 3

根据新的人射-反射模型,入射分量被分离在 SWT 的低频部分,因此只要能够衰减 SWT 的低频部分的能量,就可以压缩图像的动态范围。

图 5 是图 4 的 Fourier 变换,因为图像的 Fourier 变换能量主要集中在图 5 的 4 个角上,低通滤波器可以很好地衰减图像能量。Gaussian 低通滤波器较好地近似了人眼的一些特性,其十分有利于图像增强。

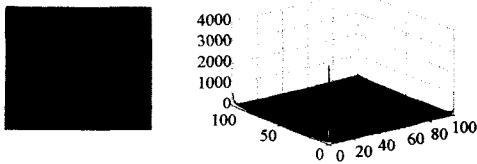


图 4 原图像

图 5 图像 Fourier 变换

Gaussian 低通滤波器(如图 7 所示)可表示为:

$$H(u,v) = rH \times e^{-c(D^2(u,v)/D_0^2)} \quad (18)$$

$$D(u,v) = \sqrt{(u-M/2)^2 + (v-N/2)^2} \quad (19)$$

式(18),式(19)中, M,N 是图像大小, c 是决定滤波器斜面的常数, D_0 是截至频率, rH 是比例系数并且 $rH=0.7$ 。

$$D_0 = 0.5 \times \text{median}(\text{median}(D(u,v))) \quad (20)$$

图 6 的动态范围已经被明显压缩,只要利用能量被压缩的低频部分(包含了细节并被滤除噪声的各个高频部分)进行静态小波反变换(ISWT)重构图像,就可以得到既压缩了动态范围又保存了细节并滤出了噪声的图像。

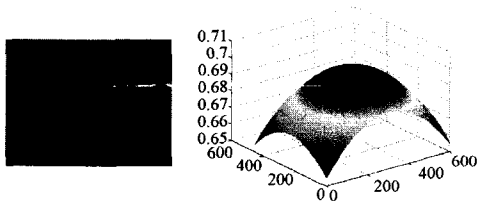


图 6 图像的 Gaussian 低通滤波

图 7 Gaussian 低通滤波器

因为图像的能量被衰减,所以重构后的图像比较暗。可以利用 Gamma 方法调节图像亮度。

$$g = g^\alpha \quad (21)$$

式中, α 根据需要调整,本文中, $\alpha=0.35$ 。

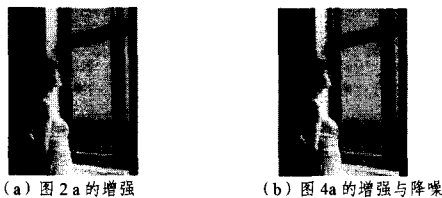


图 8

图 8(b)的 PSNR 是 31.136。

2.4 色饱和度通道的降噪

从 2.1 节中的分析可知,色饱和度通道中的噪声主要受亮度通道中加法噪声的影响。我们总能够事先滤出亮度通道中的加法噪声。

假设:

$$V'' = V' - \Delta\beta = \Delta\alpha \times \max \quad (22)$$

从式(7)可以推导出下式滤除色饱和度通道的加法噪声。

$$SS = S' \times \frac{V''}{V'} = \frac{\Delta\alpha \times (\max - \min)}{\Delta\alpha \times \max} = S \quad (23)$$

当加法噪声过大时, R,G,B 通道中的一些像素可能会饱和,这就会使色饱和度通道产生零脉冲(zero-pulse)噪声。式(23)不能消除零脉冲噪声,必须设计一种零脉冲噪声滤波器消除这种噪声。

以 SS 的每一个像素 $f(x,y)$ 为中心,将这个中心的 5×5 邻域看成矩阵 I ,假设矩阵 I 中的零元素的个数是 N 。

$$f(x,y) = \begin{cases} f(x,y), f(x,y) \neq 0 \\ \text{median}(I), f(x,y) = 0 \text{ and } N < 9 \\ 0, f(x,y) = 0 \text{ and } N \geq 9 \end{cases} \quad (24)$$

图 9 中,(a)是原图像,(b)是受 Gaussian 噪声污染的图像,(c)是(b)的式(23)降噪,(d)是(c)的式(24)降噪,(c)中的零脉冲噪声已经被完全消除。

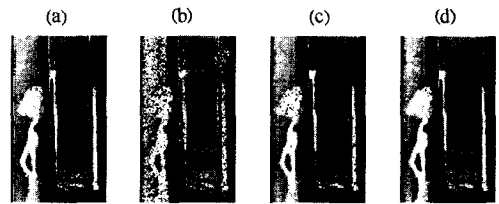


图 9 色饱和度通道降

2.5 真彩图像的增强与降噪

图像的色彩主要由图像中光的波长和频谱决定。图像的亮度主要由光的强度决定,与光的波长和频谱无关。只要色彩空间的色彩和亮度能够基本分开,就基本可以做到只调节图像中的光的强度,保持光的波长和频谱不变。HSV 色彩空间较好地分离了色彩和亮度,其色度和色饱和度决定了图像色彩,只要色度和色饱和度在彩色图像增强时不发生明显改变,色彩就不会发生大的变化,光的波长和频谱就不会发生大的变化,增强后的真彩图像的色彩就不会产生明显失真。因此,只要增强亮度通道,就可以有效增强真彩图像(即调节图像中光的强度),并可以很好地保持增强后真彩图像的色彩。对于含有噪声的亮度通道,总可以用新入射-反射模型将细节和光照分开,同时用 2.3 节中的方法降噪。对于色饱和度通道中的噪声,可以利用事先降噪的亮度通道和 2.4 节中的方法降噪。图 10 给出了真彩图像增强与降噪流程图。

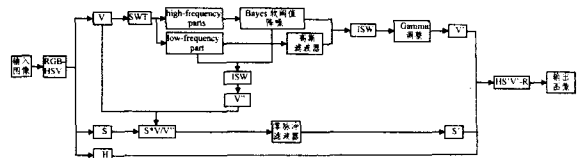


图 10 真彩图像增强与降噪流程图

3 试验和分析

根据式(8)和 2.2 节中传统入射-反射模型的描述,图像

增强可以近似看作滤除图像中乘法噪声的过程。所以,我们只在实验图像中加入加法噪声。如在图 11(a)中加入 Gaussian 噪声(0,0.001)。

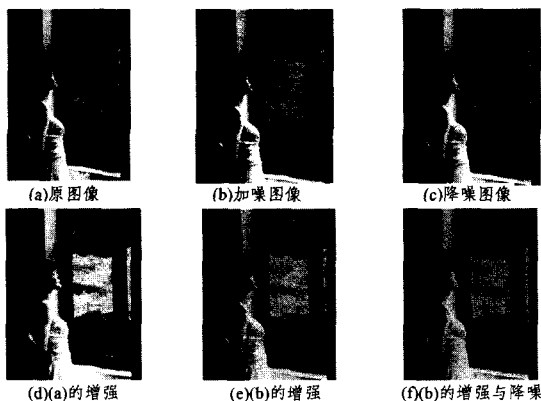


图 11

图 11(b)的 PSNR 是 30.981。图 11(c)是图 11(b)的本文方法降噪,其 PSNR 是 35.619。图 11(e)是图 11(b)的本文方法增强,其 PSNR 是 25.378。图 11(f)的 PSNR 是 31.135。

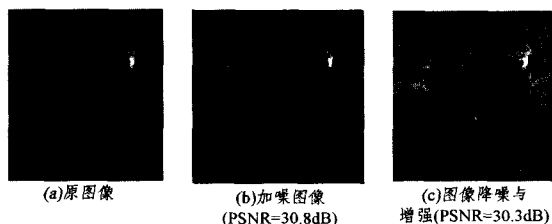


图 12



图 13

图 11 中的各个图像的处理方法和参数在第 2 节中都有详细的描述。从图 11(e)可知,在真彩图像增强的处理过程中,图像中的噪声被明显放大。从图 11(f)可知,本文的方法在真彩图像增强过程中可以有效抑制真彩图像中的噪声,达到了既增强真彩图像又抑制图像中的噪声的双重目的,并且

增强后的图像色彩人眼感觉舒适,细节保持良好。

为了验证本文方法的可重复性和适应性,用另两幅风景图像试验验证本文方法,如图 12 和图 13 所示。

通过实验观察,增强与降噪后的真彩图像色彩生动,图像细节保持良好,处理后的图像人眼感觉舒适。本文方法不仅能够有效增强真彩图像,同时还能够明显抑制真彩图像中的噪声。

结束语 本文方法处理的真彩图像,色彩没有明显偏离,细节保持良好,图像增强适度,人眼观察舒适,并且还能够有效抑制真彩图像中的噪声。今后,应该寻找比 HSV 色彩空间更有效分离色彩和亮度的色彩空间,而且这个色彩空间能够被物理学和神经生理学所证明。还应该寻找更有效地滤除真彩图像中的噪声的方法。同时,由于小波理论和方法的不断发展,还可以使用脊波变换和曲波变换来增强与降噪真彩图像,以便取得比静态小波变换更好的效果。

参考文献

- [1] Xiong Jie. Real Color Image Enhanced by Illumination—Reflection Model and Wavelet Transform[C]// International Forum on Information Technology and Applications, IFITA 2009 Proceedings. 2009;691-695
- [2] George J, Indu S P. Color Image Enhancement and Denoising Using an Optimized Filternet Based Structure Tensor Analysis[C]// ICSP 2008 Processing. 2008;236-239
- [3] Gonzalez K R C, Woods R E. Digital Image Processing[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2005;268
- [4] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. A multi-scale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. IEEE Trans. Image Process, 1997, 6(7):965-976
- [5] Land E H, McCann J J. Lightness and retinex theory [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1971, 61(1):1-11
- [6] Land E H. An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision[C]// Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1986, 83:3078-3080
- [7] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1):100-110
- [8] Hurlbert A. Formal connection between lightness algorithms [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1986, 3(10):1684-1693
- [9] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2005;102
- [10] 阎静文,等. 数字图像处理[M]. 北京:国防工业出版社, 2007;95-104

(上接第 231 页)

存好的随机序列。可以看出, PF 算法预测结果较准确, EKF 算法与基于 WMMSE 的 KF 算法预测结果接近。

结束语 本文引入了一种基于加权最小二乘的线性化方法,并将其同 KF 算法结合,得出了可用于非线性系统且不需要求偏导的滤波算法。实验表明,这种算法的预测结果同 EKF 相似,但不需要 EKF 算法中的求偏导步骤。在一些偏导较难计算的系统中,这种算法有一定的应用价值。

参考文献

- [1] Kalman R E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems[J]. Transactions of the ASME, 1960, 82:35-45
- [2] Thrun S, Burgard W, Fox D. Probabilistic Robotics[M]. London; The MIT Press, 2005

- [3] Julier S J, Uhlmann J K. Unscented filtering and nonlinear estimation[J]. Proc of the IEEE Aerospace and Electronic Systems, 2004, 92(3):401-422
- [4] Arulampalam M S, Maskell S, Gordon N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(2):174-188
- [5] Schon T, Gustafsson F, Nordlund P J. Marginalized particle filters for mixed linear/nonlinear state-space models [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(7):2279-2289
- [6] Schön T B. Estimation of Nonlinear Dynamic Systems Theory and Applications[D]. Linköpings Universitet, Linköping, 2006
- [7] Gordon N J, Salmond D J, Smith A F M. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation[J]. IEEE Proc on Radar and Signal Processing, 1993, 140(2):107-113