

HDR 图像阶调复制的非线性蒙版改进算法

朱 明¹ 刘 真² 李晓春¹

1 河南工程学院材料与化学工程学院,河南 郑州,450007

2 上海理工大学出版印刷与艺术设计学院,上海,200093

摘 要:提出了一种新的高动态范围(high dynamic range,HDR)图像阶调复制算法。鉴于图像色貌模型在预测图像色貌方面的优势,基于最新的图像色貌模型 iCAM06 设计流程,对 iCAM06 的阶调压缩函数进行重要改进,使用基于改进非线性蒙版的阶调压缩函数取代其中的双曲线压缩函数,对基础层图像进行阶调压缩处理。另外,在 HDR 图像的显示过程中增加了亨特效应和史蒂文斯效应预测模型。最后,利用主观评价实验和 DRI 模型分别评价了新算法的显示偏好性和场景复制准确性。实验结果表明,无论在偏好性还是场景复制准确性上,新算法都取得了较好的效果。

关键词:高动态范围图像;阶调复制;非线性蒙版;图像色貌模型

中图分类号:P237.3

文献标志码:A

与普通图像相比,高动态范围图像能够再现人眼视觉可感知的真实场景亮度范围,因此在遥感图像处理、医学成像、虚拟现实和印刷复制等领域有广泛应用^[1]。但由于设备性能的限制,往往需要借助图像阶调复制(压缩)技术才能将 HDR 图像中反映真实场景的高动态范围信息压缩到普通显示和输出设备可表达的动态范围内。这个过程需要依据人眼视觉特性和图像自身特征,在符合设备性能的前提下,尽可能忠实地复制出原始场景的阶调范围。

目前常用的 HDR 图像阶调复制算法主要分为三类:空间一致性算法,空间非一致性算法和基于图像色貌模型的算法。前两类算法都没有考虑处理颜色和亮度的差别以及视觉机制对各颜色通道具有不同响应的特性,主要针对灰度图像的处理。针对这些问题,本文提出了基于图像色貌模型 iCAM(image color appearance model)的 HDR 图像阶调复制技术。图像色貌模型将传统色貌模型和空间视觉模型有机整合在一起,不仅能够准确预测图像色貌,而且适用于 HDR 图像的阶调复制。2007 年 Kuang 等人提出了基于 iCAM06 模型的 HDR 图像显示流程^[2]。2011 年,Liu 等人提出了基于色貌效应预测的 HDR 图像阶调复

制算法^[3],并通过实验分别确定了史蒂文斯效应和亨特效应预测模型中量化调制函数的最佳值,该算法对 iCAM06 算法进行了重要补充。

iCAM 算法采用的基于环境亮度因子的阶调压缩函数过于简单,效果不太理想。iCAM06 算法采用的双曲线压缩函数能够模拟人眼视觉系统中生理光感受器的响应,较为符合视觉生理学规律。但双曲线压缩函数需要计算局部色适应后的亮度图像和环境亮度因子,计算量较大,且在效果上还有进一步提升的空间。基于此,本文提出了一种基于改进非线性蒙版的阶调复制算法。

1 算法实现与阶调压缩函数的改进

1.1 算法实现

新算法的具体实现流程如图 1 所示。① 将 RGBE 格式的 HDR 图像数据转换为与绝对亮度呈线性关系的 RGB 浮点数据,然后利用当前显示设备的颜色特征化模型将其转换为 CIE-XYZ 数据,作为算法的输入数据;② 为了符合人眼视觉对图像局部对比度比全局对比度更加敏感这一特性^[4],采用双滤波技术将图像分为基础层和细节层,对基础层图像进行处理,保留细节层信息不

收稿日期:2013-03-25

项目来源:国家自然科学基金资助项目(201361301231);河南工程学院博士基金资助项目(D2012027)。

第一作者:朱明,博士,主要研究方向为印刷图像处理技术。E-mail:115457719@99.com

通讯作者:李晓春,博士,教授。E-mail: lxc888@163.com.

变;③采用 iCAM06 模型的色适应变换方法对基础层图像进行局部和全局色适应变换;④使用本文方法对色适应变换后的基础层图像进行阶调压缩并与细节层图像合并,再进行逆向色适应变换;⑤将史蒂文斯效应预测模型应用于细节层图像。将分层合并后的图像变换到 IPT 均匀颜色空间,

并对其应用亨特效应预测模型;⑥在图像显示之前,利用逆向颜色特征化模型将 XYZ 值图像转换为 RGB 浮点数据,并裁剪掉图像中的极高光和暗调像素数据,最后将所有像素数据等比例规范化到显示设备的编码范围[0,255]内。

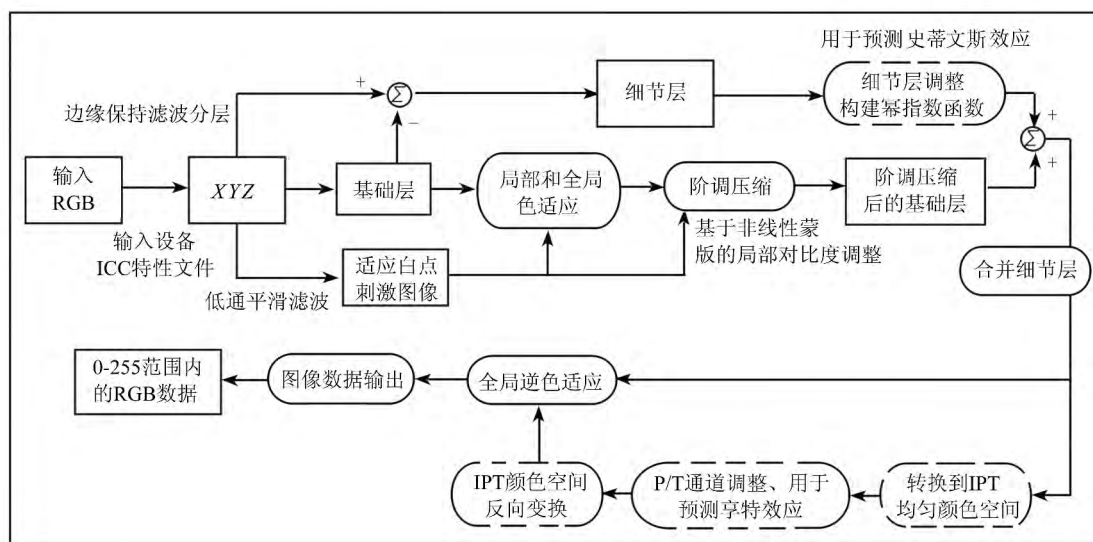


图1 新算法的实现流程

Fig. 1 Flowchart of the New Algorithm

1.2 非线性蒙版技术

非线性蒙版技术实质上是一种基于局部亮度校正的图像对比度调整技术。该方法根据某个像素周围邻域的亮度,对输入图像中的每个像素依次执行不同的非线性亮度值校正^[5],其作用相当于压缩了图像的整体对比度(动态范围)。非线性蒙版算法主要包括两个步骤:①蒙版图像的生成;②蒙版处理,即蒙版图像和输入图像的结合。蒙版处理是指利用由蒙版图像推导得到的幂函数对输入图像进行局部亮度校正和阶调范围压缩。

使用非线性蒙版进行阶调压缩的过程如下:

①将一幅彩色图像转换为单色灰度图像,其目的是为了图像色彩的扭曲;②对该灰度图像进行反向变换;③选用一个作用半径较大的低通滤波器(一般使用高斯滤波器)对反向变换后的灰度图像进行模糊处理,生成蒙版图像:

$$\text{MaskImage} =$$

$$\text{FFT}^{-1}\{\text{FFT}\{255 - \text{Image}\}\text{FFT}\{\text{Filter}\}\} \quad (1)$$

式(1)中,“MaskImage”代表蒙版图像;④利用由蒙版图像推导得来的幂函数对输入图像进行阶调范围压缩。

对蒙版图像进行模糊处理的目的是使图像细节不能被识别,如果对蒙版图像不作模糊处理(即滤波器的作用半径为0),那么输入图像中某一像

素对应的蒙版值直接为该像素的反向亮度值,这样会造成蒙版处理后的图像对比度大幅度降低,达不到阶调复制的目的。但如果使用一个作用半径过大的低通滤波器对蒙版图像进行模糊,则蒙版处理将会趋于一个简单的伽马校正过程,也会影响阶调复制的效果。因此,对蒙版图像进行模糊处理的滤波半径不能设置过大。

基于蒙版技术的图像阶调压缩实质是对输入图像的每个像素依次执行不同的非线性亮度校正,这个过程所使用的阶调复制曲线是由蒙版图像推导得来的一系列幂函数:

$$\text{output} = 255 \cdot \left(\frac{\text{input}}{255}\right)^{2^{\frac{128 - \text{mask}}{128}}} \quad (2)$$

式中,每个幂函数的指数为 $2^{((128 - \text{mask})/128)}$, mask 为输入图像某个像素对应的蒙版值。这样设置的目的是为了使得蒙版值大于中间像素值 128 时指数小于 1,小于 128 时指数大于 1,等于 128 时指数值为 1。图 2 显示了对应不同蒙版值的阶调复制曲线,横坐标为图像输入值,纵坐标为阶调调整后的输出值。

1.3 非线性蒙版技术的改进和应用

非线性蒙版技术最初只用于灰度图像的局部对比度调整,如果将其应用于 HDR 彩色图像的阶调复制,必须对其进行改进。首先, HDR 格式

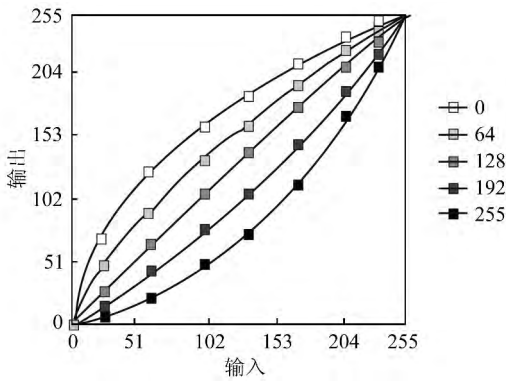


图 2 不同蒙版值对应的阶调复制曲线

Fig. 2 Tone Reproduction Curves for Different Mask Values

图像的输入像素值不再是 0 到 255,而是 0 到 10^{76} 之间的浮点亮度值;其次, R 、 G 、 B 三个通道的最大和最小输入值可能会相差很大,不像传统数字图像中三个通道对像素亮度的贡献几乎是 1:1:1(R 、 G 、 B 三通道的最大和最小像素值几乎都是 255 和 0)。基于以上两点,对非线性蒙版进行了改进:

$$\text{output} = \max(\text{input}_{\max}) \cdot \left(\frac{\text{input}_R}{\max(\text{input}_{\max})} \right)^{\left(2 \left(\frac{\text{input}_{Rm} - \text{mask}_R}{\text{input}_{Rm}} \right) \right)} \quad (3)$$

式(3)显示的是图像 R 通道的阶调调整算法,式中, mask_R 为 R 颜色通道的蒙版图像,是通过将图像通道的亮度值取反后再进行低通滤波变换得到的。 G 、 B 通道的计算方法与此类似,其中:

$$\text{input}_{\max} = [\max(\text{input}_R), \max(\text{input}_G), \max(\text{input}_B)] \quad (4)$$

$$\text{input}_{\min} = [\min(\text{input}_R), \min(\text{input}_G), \min(\text{input}_B)] \quad (5)$$

$$\text{input}_{Rm} = \frac{\max(\text{input}_{\max}) - \min(\text{input}_{\min})}{2} \quad (6)$$

改进后的式(3)与式(2)不同的是:① 将最大和最小像素值由 255、0 改为整幅图像的最大和最小浮点亮度值,如式(4)、(5)所示;② 将中间像素值由 128 改为整幅 HDR 图像的中间像素值,式(6)显示的是图像 R 通道中间像素值的计算方法, G 、 B 通道的计算方法与此相同;③ 各通道蒙版图像的计算统一采用整幅图像的最大浮点亮度值,之所以采用最大浮点亮度值而不是各颜色通道的最大像素值,是因为这样可以对整幅 HDR 图像进行最大程度的亮度压缩,避免了对 R 、 G 、 B 三通道单独控制时由于各通道最大像素值相差很大而造成的各通道阶调调整幅度不一致以及阶调压缩后

出现的偏色问题。

由于 iCAM 是在 Hunt-Pointer-Estevéz 颜色空间中计算图像的感知色貌属性,因此,需要将色适应变换后的基础层图像转换到 HPE 颜色空间,再应用非线性蒙版技术进行阶调压缩,在该颜色空间进行阶调压缩比较符合人眼视觉对图像色貌的感知特性。

1.4 新算法的实现

利用 JAVA-MATLAB 混合编程技术研发了 HDR 图像阶调复制软件,集成了基础 iCAM 算法和改进 iCAM 算法。图 3 反映了改进的 iCAM 算法流程。① 设置“图像降采样间隔”,该值在图像双滤波分层时设置,间隔设置越大,计算速度越快,但也会影响图像显示质量。根据之前的研究结果,为了在计算速度和图像显示质量之间获得平衡,一般将降采样间隔设置为 2~4;② 图像分层后,需要对基础层图像进行色适应变换,因此需要设置“观察环境参数”,其取值参考 iCAM06 模型的观察环境参数设置;③ 对色适应变换后的基础层图像进行阶调压缩,可选择本文提出的“非线性蒙版函数”和 CIECAM02 模型的“双曲线压缩函数”;④ 阶调压缩后对基础层和细节层图像合并,并使用亨特效应和史蒂文斯效应预测模型预测色貌效应。根据之前的研究实验可知,亨特效应和史蒂文斯效应预测模型中调制系数的最佳值分别为 1.2 和 1.0,用户也可以根据自己的偏好设置其他值。完成所有设置后即可按照所选参数计算并显示阶调压缩后的图像。



图 3 改进 iCAM 算法的详细参数设置

Fig. 3 Detailed Parameters Set of the Improved iCAM06 Algorithm

2 新算法的评价

显示偏好性(preference)和场景复制准确性(accuracy)是衡量 HDR 图像阶调复制算法性能最重要的两个指标。将新算法同几种经典算法进

行横向比较对这两个指标进行评价。偏好性评价采用主观评价法,场景复制准确性评价采用动态范围独立的 DRI (dynamic range independent) 图像质量评价模型。

2.1 显示偏好性评价实验

采用主观评价法评价算法的显示偏好性。在实验中,观察者不观察原始场景,只针对图像质量(如对比度、彩度、图像锐度,总体自然色貌等)的总体印象做出评价。评价实验通过基于对偶比较法的心理物理学实验来完成^[6],过程如下。

1) 选择测试图像和测试算法

首先选取 10 幅常用的 HDR 经典测试图像,所选图像在直方图分布、动态范围和平均亮度方面都具有很大的差异。选取 6 种经典的 HDR 图像阶调复制算法与新算法进行横向比较。这 6 种测试算法涉及全局一致性、全局非一致性和色貌模型三种类型,分别为直方图匹配算法、摄影算法、双滤波算法、自适应对数算法、iCAM 算法和 iCAM06 算法(双曲线阶调压缩函数),然后分别使用这 6 种测试算法和新算法对每幅 HDR 图像进行阶调压缩处理,这样对应每一幅 HDR 图像都可以得到 7 幅测试图像。

2) 设置实验环境

挑选 30 位观察者,针对每一幅 HDR 图像,利用对偶比较法对上述 7 种算法中任意两种处理后的图像进行偏好性评价。实验中,每位观察者共需完成 210 组对比实验,约耗时 40 min。

实验在暗室内进行,经阶调压缩后的图像两两显示在一个最大亮度为 225 cd/m^2 的 21-inch EIZO CG211 LCD 显示器的左右两侧,在实验前需要对显示器进行颜色校准。显示器的显示区域为 $1600 \text{ 像素} \times 1200 \text{ 像素}$,可以同时显示两幅宽度大约为 800 像素的图像,观察者坐在距离显示器正前方大约 60 cm 处的位置进行评价。图像两两随机显示在一个亮度为 20% 适应白场的灰色背景上^[8],图像出现的顺序和位置(屏幕左侧和右侧)是随机的。要求观察者为呈现在面前的两幅图像评价打分,评价内容包括图像对比度、彩度、锐度和整体自然外貌等方面,较好得 1 分,较差得 0 分。为了避免前一组评价对后一组的影响,组与组评价之间需要间隔 30 s,且重复进行多次观察。由于每种算法都要处理 10 幅 HDR 图像,因此每种算法可以得到 10 个偏好性分数,最后取平均值。

3) 实验结果及分析

根据实验所得各算法的偏好性分数,计算相

应的 Z 分数^[6],然后根据 Z 分数制作用于描述算法偏好性的等距量表(遵循 95% 置信区间),如图 4 所示。从图 4 中可以看出,新算法的 Z 分数最高,偏好性最好,其次是 iCAM06 和摄影匹配算法,iCAM 算法和直方图匹配法的图像偏好性最差,这也验证了空间非一致性算法总体上优于空间一致性算法。

2.2 场景复制准确性评价实验

2.2.1 选择评价模型

场景复制准确性评价是通过将阶调压缩后图像和其对应的真实场景进行比较,来评价算法对真实场景再现的准确性。由于主观评价方法对实验环境的依赖性较强,极易产生视觉误差,因此最好使用视觉量化评价模型。鉴于 HDR 图像和普通图像在动态范围上的差异,选择采用动态范围独立的图像质量量化评价模型^[7](DRI 模型)来评价 HDR 图像阶调复制算法的场景复制准确性。

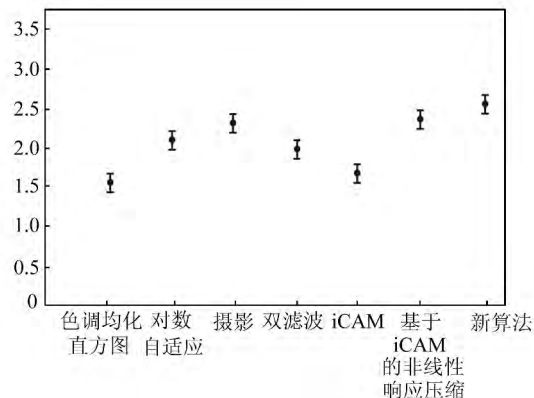


图 4 各算法的偏好性等距量表

Fig. 4 Preference Interval Scale for Each Algorithm

DRI 模型接收一幅 HDR 图像和一幅阶调压缩后的图像,经过模型计算后输出一幅 RGB 模式的失真概率图,用于直观显示压缩后图像的失真程度。失真概率图使用红、绿、蓝三个颜色通道分别反映了原始 HDR 图像和阶调压缩后图像之间的 3 类结构性失真。像素每个颜色通道的饱和度值与该像素位置相应的失真探测概率值成正比。根据这一特点可以方便地获知图像失真发生的位置和原因,进而指导阶调复制算法的改进。绿色梯尺表示可视对比度的丢失概率,丢失越多,绿色越饱和;蓝色梯尺表示不可视对比度的放大概率,放大越多,蓝色越饱和;红色表示可视对比度的逆转概率,逆转越多,红色越饱和。为避免不同类型失真在同一区域发生重叠的问题,模型仅在每个像素位置显示具有最高探测概率的失真类型。

2.2.2 评价结果及分析

使用新算法和6种测试算法对10幅HDR图像进行处理,可以得到10组失真概率图,每组7幅,分别对应7种算法。这里只显示其中1组的失真概率图,如图5所示。图5中左上角为原始HDR图像的亮度直方图,上面一行图像为算法处理后图像,下面为相应的失真概率图。从这10组概率图中可以看出:①直方图匹配法的阶调复制效果一般,特别是暗调区域的可视对比度丢失和亮调区域的可视对比度逆转较严重;②对数自适应算法的效果趋于一致且都较为理想;③摄影算法在较亮区域容易产生可视对比度逆转;④双滤波算法对测试图像的压缩效果不太理想,会带来不可视对比度的增加和可视对比度的逆转;⑤iCAM算法对所有测试图像的效果较为一致,但都会出现严重的可视对比度丢失;⑥iCAM06在暗调区会产生较强的可视对比度丢失。从实验的整体结果上看,新算法的场景复制准确性最佳,其次是对数自适应算法和iCAM06算法,直方图匹配法和摄影算法效果一般,最差的是双滤波算法和iCAM算法。

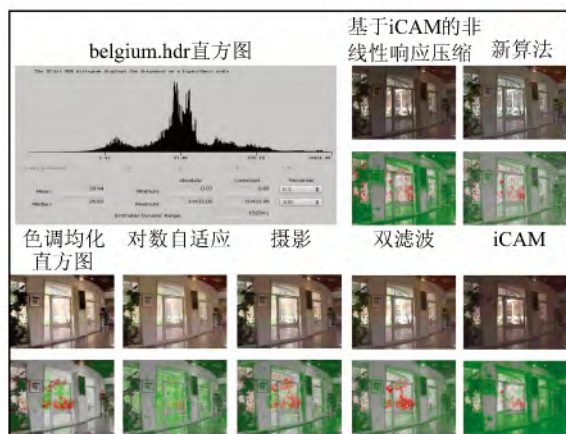


图5 “Belgium”图像的阶调复制结果和失真概率图

Fig. 5 Tone Reproduction Results and Distortion Probability Maps of the “Belgium” Image

3 结 语

本文提出了一种新的HDR图像阶调复制算法,以最新的图像色貌模型iCAM06为计算框架,对原有算法的阶调压缩函数进行了重要改进,使用基于改进非线性蒙版的阶调压缩函数取代iCAM06中的双曲线压缩函数,对分层后的基础层图像进行阶调压缩处理。另外,在HDR图像

的显示过程中,增加了之前研究提出的亨特效应和史蒂文斯效应预测模型。最后,利用主观评价实验和DRI模型分别评价了新算法的显示偏好性和场景复制准确性。实验结果表明:无论在偏好性还是场景复制准确性上,新算法都取得了不错的效果。新算法的阶调压缩函数较为简单,计算速度快。而且非线性蒙版的计算公式在形式上与CIECAM02色貌模型中的明度计算公式非常接近,这也从另一方面证明了使用新算法对HDR图像进行阶调复制是符合人眼视觉感受的。

参 考 文 献

- [1] Zhu Ming, Liu Zhen. Research on HDR Image Tone Compression Based on Luminance Factor of Local Environment[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(9): 85-89(朱明, 刘真. 基于局部环境亮度因子的HDR图像阶调压缩研究[J]. *包装工程*, 2011, 32(9): 85-89)
- [2] Kuang Jiangtao, Johnson G M, Fairchild M D. iCAM06: a Refined Image Appearance Model for HDR Image Rendering [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2007, 18:406-414
- [3] Liu Zhen, Zhu Ming, Chen Guangxue, et al. Research on HDR Image Rendering Based on Image Appearance Effect Predicting [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(7):871-876(刘真, 朱明, 陈广学, 等. 基于色貌效应预测的HDR图像显示研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2011, 36(7):871-876)
- [4] Durand F, Dorsey J. Fast Bilateral Filtering for the Display of High Dynamic-range Images [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(3): 257-266
- [5] Zhu Ming, Liu Zhen. A HDR Image Compression Algorithm Based on Non-linear Masking[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 174:123-126
- [6] Kuang J, Yamaguchi H, Liu C, et al. Evaluating HDR Rendering Algorithms [J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2007, 4(2):538-556
- [7] Mantiuk R, Daly S, Myszkowski K, et al. Predicting Visible Differences in High Dynamic Range Images-Model and Its Calibration[C]. *Human Vision and Electronic Imaging X, IS&T/SPIE's 17th Annual Symposium on Electronic Imaging, USA, 2005*
- [8] Kuang J, Yamaguchi H, Liu C, et al. Evaluating HDR Rendering Algorithms[J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2007, 4(2):212-217

An Improved Non-linear Masking Algorithm for HDR Image Tone Reproduction

ZHU Ming¹ LIU Zhen² LI Xiaochun¹

¹ College of Materials and Chemical Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China

² College of Communication and Art Design, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: A new tone-reproduction algorithm for high-dynamic-range (HDR) images is proposed in this paper. The image color appearance model is good at predicting color appearance of images, so the calculation frame of the new algorithm is based on the latest image color appearance model iCAM06. The tone-compression function of iCAM06 was improved significantly. The Hyperbola tone-compression function of iCAM06 was replaced by the tone-compression function based on the improved non-linear masking, and the new tone-compression function was used for tone-compression of the base layer image. In addition, in the rendering process of the HDR images, the new algorithm introduced the “Hunt effect” and “Stevens effect” predicting model proposed previously. Finally, the subjective evaluation test and DRI model were used to evaluate preference and scene-reproduction accuracy of the new algorithm respectively. The result of the evaluation test shows that the new algorithm has a very good effect on preference and scene-reproduction accuracy.

Key words: high dynamic range images; tone reproduction; non-linear masking; image color appearance model

First author: ZHU Ming, PhD, specializes in the theory and application of color reproduction. E-mail: 115457719@qq.com

Corresponding author: LI Xiaochun, PhD, professor. E-mail: lxc888@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 61301231; the Doctoral Science Foundation of Henan Institute of Engineering, No. D2012027.

+++++
(上接第 939 页)

logical stations from 2006 to 2007, and the GPS/PWV calculated from the two data sets are also contrasted. Results are as follows: ① Atmospheric pressure derived from upper-air reanalysis data, temperature and relative humidity derived from surface reanalysis data, has relatively high precision. ② The reanalysis parameters and meteorological observation data comparisons at 24 stations show a mean bias of 0.08 hpa and a RMSD of 0.85 hpa with atmospheric pressure, a mean bias of 0.05 K and a RMSD of 2.45 K with temperature, a mean bias of 2.82% and a RMSD of 14.75% with relative humidity. ③ The ERA-Interim reanalysis data is more reliable in the east of China than in the west. The precision of temperature and relative humidity data show seasonal variation. ④ As compared with GPS/PWV calculated by the meteorological observation data, the GPS/PWV calculated by the ERA-Interim data give a mean difference of less than 0.5 mm and a RMSD of less than 1 mm.

Key words: ERA-Interim; meteorological parameter; GPS/PWV; accuracy assessment

First author: ZHAO Jingyang, PhD candidate, specializes in space geodesy and GNSS meteorology. E-mail: jyzhao7@gmail.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 10603011, 11273048; the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 2009AA12Z307.