

多视点视频编码去相关颜色校正

潘 榕,侯正信,刘 昱

(天津大学 电子信息工程学院,天津 300072)

(panrong@tju.edu.cn; zhengxinhou@163.com; liuyu@tju.edu.cn)

摘 要:多视点视频编码效率受到各个视点图像之间颜色不均衡的影响。在三色激励值近似线性无关的 $l\alpha\beta$ 颜色空间中,对多视点视频数据实现了颜色校正。根据视频序列原始数据的特点,选择合适的变换矩阵,提供了YUV到 $l\alpha\beta$ 空间的变换式。为降低不同视点间亮度差异的影响,在块搜索和匹配中结合相关分析法,获取最优匹配块。将匹配块数据变换到从 $l\alpha\beta$ 衍生的一个线性无关的颜色空间中,采用统计量逼近的方法对数据进行了更简便的校正。结果表明,所校正的数据变换回YUV空间后,主观效果良好,消除了颜色差异,在编码性能上,Y分量平均PSNR提高达1.4 dB以上,证明了该颜色校正算法的有效性。

关键词:多视点视频编码;颜色校正;亮度补偿;去相关颜色空间;块匹配

中图分类号: TN919.8 **文献标志码:** A

De-correlated color correction for multiview video coding

PAN Rong, HOU Zheng-xin, LIU Yu

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The efficiency of multiview video coding is influenced by the color discrepancies of pictures in different views. A new color correction method was proposed for multiview videos in the $l\alpha\beta$ color space whose tristimulus values were approximately irrelevant to each other. According to the characteristics of the original data of multiview videos, the appropriate transformation matrices were selected to provide formula for transforming data from YUV to $l\alpha\beta$ color space. In order to mitigate the influence of illumination change between different views, correlation analysis was integrated in block-matching to search for the best matching blocks. The data of these blocks was transformed into a de-correlated color space derived from $l\alpha\beta$, and corrected with a statistic approaching method in a more convenient way. The results show that the subjective effect is satisfactory with the elimination of color discrepancies after color correction, and in terms of coding efficiency, the average PSNR of Y component is up to 1.4 dB, which proves the effectiveness of this color correction method.

Key words: Multiview Video Coding (MVC); color correction; illumination compensation; de-correlated color space; block-matching

0 引言

多视点视频在立体电视、自由视点视频和高性能图像等方面有广泛的应用前景。原始的多视点视频由多个摄像机在不同角度拍摄得到,是多个单视点视频流的组合,数据量庞大。为利于存储和传输,需要研究有效的压缩编码算法对多视点视频进行压缩。现有编码算法如H.264等可有效提取多视点视频视点内的时间和空间冗余,而视点间的冗余则需要根据多视点视频的特点来开发新的算法予以消除。多视点视频的一个特点是各个视点视频之间的颜色(包括亮度)不均衡,包括由于摄像机拍摄角度不同造成的局部颜色差异和摄像机性能不同造成的全局颜色差异。如果能校正视点间的颜色差异,则能有效提高视点间的预测和编码效率。

目前已经开发出了多种对多视点视频进行颜色校正的技术。根据校正的不同时机,主要有预处理颜色校正和编码中颜色校正两种;根据校正的不同方式,主要有全局颜色校正和局部颜色校正两种。文献[1-2]分别提出了两种不同的预处理全局颜色校正算法;其中Fecker等人^[1]提出了一种基于

直方图匹配的颜色校正算法,将YUV颜色空间变换到RGB颜色空间,以中间视点作为参考视点,调整其他视点的RGB三基色的直方图使之与参考视点匹配,从而得到较好的校正结果;Doutre等人^[2]考虑去除不同视点的遮蔽部分对全局校正的影响,采用块搜索方法得到不同视点的匹配块,并用这些匹配块的平均值作为新的参考值,利用三阶多项式结合最小二乘法,使每个视点的YUV值都逼近参考值,从而完成全局颜色校正。文献[3-4]则分别提出了两种编码中颜色校正的方法;其中Hur等人^[3]考虑了亮度变化对搜索匹配块的影响,提出了一种新的块匹配准则,并将额外的亮度差值传输给解码端,这种方法是一种局部颜色校正(只针对Y值的亮度补偿)方法;Yamamoto等人^[4]使用对应色度表在编码中对视点的每个色度值进行校正,然后传输对应色度表,这是一种全局校正的方法。要特别指出的是,文献[2,4]是在RGB空间而不是在YUV空间中对颜色进行校正,以提高校正效果^[2]或者降低校正的算法复杂度^[4]。

虽然在RGB空间中进行颜色校正有其优越性(摄像机拍摄所得源数据一般为RGB数据),但不论是YUV还是RGB

收稿日期:2010-04-13;修回日期:2010-06-08。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60902063)。

作者简介:潘榕(1983-),男,浙江浦江人,博士研究生,主要研究方向:信息处理、多视点视频编码;侯正信(1945-),男,北京人,教授,博士生导师,主要研究方向:现代数字信号、信息处理、数字图像处理、编码技术、数字视频;刘昱(1976-),男,云南昆明人,副教授,主要研究方向:现代信息理论、图像和视频压缩、HDTV、多媒体系统。

等颜色空间,其三色激励值都具有较强的相关性^[5]。这意味着如果对颜色空间中的其中一个色度进行校正,则必须考虑其他两个色度对它的影响,从而需要复杂的算法来同时处理三个色度的关系。Ruderman 等人在文献[5]中提出了一种新的 $\alpha\beta$ 颜色空间,将三个色度的相关性降到最小,从而可以设计较简单的算法分别对三个色度进行校正。文献[6]将 $\alpha\beta$ 颜色空间应用于图像之间的颜色转移,取得了较好的效果。经实验验证,根据多视点视频特点,将 $\alpha\beta$ 这种去相关颜色空间应用到多视点视频编码的颜色校正中,开发合适的校正算法和流程,能在不影响主观效果的基础上有效提高编码效率。

1 到 $\alpha\beta$ 颜色空间的变换

文献[5]中给出的从 LMS 颜色空间(经过对数变换)到 $\alpha\beta$ 颜色空间的变换公式可整理成如式(1)所示:

$$\alpha\beta = M_{L-l} \tilde{L} \tilde{M} \tilde{S} \quad (1)$$

其中:

$$\alpha\beta = [l \ \alpha \ \beta]^T, \quad \tilde{L} \tilde{M} \tilde{S} = [\tilde{L} \ \tilde{M} \ \tilde{S}]^T \quad (2)$$

$$M_{L-l} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{6}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5774 & 0.5774 & 0.5774 \\ 0.4082 & 0.4082 & -0.8165 \\ 0.7071 & -0.7071 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\tilde{L} = \lg L - \langle \lg L \rangle, \quad \tilde{M} = \lg M - \langle \lg M \rangle, \quad \tilde{S} = \lg S - \langle \lg S \rangle \quad (4)$$

$\langle X \rangle$ 表示 X 的平均值。多视点视频编码所用的低分辨率(640×480)测试序列是 YUV(数字格式为 YCbCr)4:2:0,高分辨(1024×768)序列则以 RGB(γ 校正后格式为 R'G'B')三色激励值的形式给出(16mp 图像)。因此要校正低分辨率序列,需将之从 YUV 变换到 $\alpha\beta$ 颜色空间,而对于高分辨率序列,则是从 RGB 到 $\alpha\beta$ 。本文将 YUV 先变换成 RGB 再进行处理。将 YUV 变换到 RGB 的矩阵根据 RGB 和 YUV 分别预留或不预留头空间和脚空间共分为四种;再根据 ITU-R BT.601 和 709 两个标准,总共 4×2=8 种变换矩阵。本文采用变换矩阵的前提:1)不同序列 YUV 的取值范围;2)尽量不预留头部和尾部空间(即全范围),使得变换后损失的色域范围最小。YUV 到 RGB 的变换式如下:

$$RGB = M_{Y-R}(YUV - YUV_offset) \quad (5)$$

其中:

$$RGB = [R \ G \ B]^T, \quad YUV = [Y \ U \ V]^T \quad (6)$$

Ballroom 等所有低分辨率序列的 YUV 取值至少有头空间,可认为 YUV 处于全范围。因此, M_{Y-R} 适合采用如下矩阵:

$$M_{Y-R} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 1.400 \\ 1.000 & -0.343 & -0.711 \\ 1.000 & 1.765 & 0.000 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$YUV_offset = [0 \ 128 \ 128]$$

M_{Y-R} 是符合 601 标准(SDTV)、从全范围 YUV 到全范围 RGB 的变换矩阵(对于高分辨率序列,则采用符合 709 HDTV 标准的矩阵)。所转换得到的 RGB 是 sRGB^[7]。RGB 是依赖

于设备的颜色空间,要将 RGB 变换为与设备无关的连接空间,如 CIE 1931 XYZ 空间。sRGB 到 CIE XYZ(D65 光源)的变换矩阵如下^[8]:

$$M_{R-X} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \quad (8)$$

为使变换前后的色域具有能量相等的白场,相同能量的激励值 $R_1 G_1 B_1 = [1 \ 1 \ 1]^T$ 需产生相同的响应 $X_1 Y_1 Z_1 = [1 \ 1 \ 1]^T$ 。为此,需要满足:

$$X_1 Y_1 Z_1 = M_{R-X_equal} R_1 G_1 B_1 \quad (9)$$

令 $X_1 Y_1 Z_1 = M_{R-X} R_1 G_1 B_1$, 可得:

$$R_1 G_1 B_1 = [1.2048 \ 0.9483 \ 0.9087]^T$$

当 $R_1 G_1 B_1$ 归一化到 $R_1 G_1 B_1$, M_{R-X} 转换为 M_{R-X_equal} 。令:

$$M_{R-X_equal} = M_{R-X} \cdot \begin{bmatrix} (R_1 G_1 B_1)^T \\ (R_1 G_1 B_1)^T \\ (R_1 G_1 B_1)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4969 & 0.3391 & 0.1640 \\ 0.2561 & 0.6782 & 0.0656 \\ 0.0233 & 0.1130 & 0.8637 \end{bmatrix} \quad (10)$$

即满足式(9)。其中 \cdot 表示 Hadamard 乘积。

而 CIE XYZ 到 LMS 空间的变换矩阵(已校正至同一能量的白场)^[9]如下:

$$M_{X-L} = \begin{bmatrix} 0.3897 & 0.6890 & -0.0787 \\ -0.2298 & 1.1834 & 0.0464 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (11)$$

综合式(5)~(11),可得 YUV 到 LMS 的变换式为:

$$LMS = M_{Y-L}(YUV - YUV_offset) \quad (12)$$

其中:

$$M_{Y-L} = M_{X-L} M_{R-X_equal} M_{Y-R} = M_{R-L} M_{Y-R} \quad (13)$$

M_{Y-L} 用于低分辨多视点测试序列从 YUV 到 LMS 的变换; M_{R-L} 为 RGB 到 LMS 的变换矩阵,直接应用于提供了 RGB 原始数据的高分辨率测试序列。最后通过式(1)~(4)转换到 $\alpha\beta$ 颜色空间。

2 获取视点间对应数据

由于摄像机拍摄角度的差异,所得的图像将有一部分表现不同的内容,因此需要在不同视点图像之间寻找对应数据。方法有对极几何法^[10]、块匹配法^[2]、全局视差法^[1]和特征提取法^[11]等。块匹配法的本质是要求得黑白图像块(即 Y 分量)的逼真度^[12]。由于不同视点间亮度变化的影响,采用相关系数 r 来表示两个块的相关性程度(相关分析):

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (14)$$

其中: X 和 Y 分别表示两个块的数据, \bar{X} 和 \bar{Y} 表示块数据的平均值。 r 的取值范围是 $[-1, 1]$, 正负值分别表示正相关和负相关,其绝对值越大,相关性越强。

r 衡量的是两组数据的变化趋势,而不能衡量数值差异。采用下式来约束数值变化大小(距离分析):

$$|\bar{X} - \bar{Y}| < |\bar{X}_p - \bar{Y}_p| \quad (15)$$

其中 \bar{X}_p 和 \bar{Y}_p 分别表示不同视点两副图像数据的平均值。以中间视点图像作为基准,在其他视点图像中寻找匹配块。当在所

有其他视点中搜索到 r 值满足合适大小(如0.9),且满足式的匹配块,则认为中间视点图像的某基准块在所有其他视点中都能找到对应块。

3 去相关颜色校正

若令:

$$\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta} = M_{L-l} \hat{L} \hat{M} \hat{S} \quad (16)$$

其中:

$$\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta} = [\hat{l} \quad \hat{\alpha} \quad \hat{\beta}]^T, \quad \hat{L} \hat{M} \hat{S} = [\hat{L} \quad \hat{M} \quad \hat{S}]^T \quad (17)$$

$$\hat{L} = \lg L, \quad \hat{M} = \lg M, \quad \hat{S} = \lg S \quad (18)$$

则综合以上各式,从YUV到 $\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta}$ 空间的变换式为:

$$\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta} = M_{L-l} \lg[M_{Y-L}(YUV - YUV_offset)] \quad (19)$$

可得两个结论:

1) $l\alpha\beta = \hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta} - \langle \hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta} \rangle$ 。即式(4)中在LMS空间中减去激励的平均值再变换到 $l\alpha\beta$ 空间等价于在 $\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta}$ 空间中减去相应平均值。此结论由矩阵运算规则可直接获得。

2) $\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta}$ 三色激励的相关性与 $l\alpha\beta$ 相等,若 $l\alpha\beta$ 线性无关,则 $\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta}$ 也线性无关。两个变量其中一个或两个加上或减去本身的均值,不改变其相关关系。

以上结论可判定在 $\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta}$ 空间中做校正等价于在 $l\alpha\beta$ 空间中做校正,而由于把均值相减操作放在了空间,使得空间变换和逆变换更为简单。在 $\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta}$ 空间中可用如下颜色校正算法:

$$\overline{l\alpha\beta} = \frac{\sigma_o}{\sigma_c} l\alpha\beta + \langle \hat{l}_c \hat{\alpha}_c \hat{\beta}_c \rangle \quad (20)$$

其中:

$$\overline{l\alpha\beta} = [\overline{l} \quad \overline{\alpha} \quad \overline{\beta}]^T, \quad \langle \hat{l}_c \hat{\alpha}_c \hat{\beta}_c \rangle = [\langle \hat{l}_c \rangle \quad \langle \hat{\alpha}_c \rangle \quad \langle \hat{\beta}_c \rangle]^T \quad (21)$$

$\overline{l\alpha\beta}$ 是在 $\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta}$ 空间中校正后的三色激励值, σ_o 和 σ_c 分别是当前视点图像和中间视点基准图像数据在 $\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta}$ 空间中的标准差(标准差校正), $\langle \hat{l}_c \hat{\alpha}_c \hat{\beta}_c \rangle$ 是中间视点基准图像 $\hat{l}_c \hat{\alpha}_c \hat{\beta}_c$ 三色激励值的平均值(均值校正)。式(20)表示把当前视点图像在空间上的三色激励值的统计特性逼近于中间视点基准图像。式(2)等价于在 $l\alpha\beta$ 空间中做标准差校正,变换到LMS空间后再做均值校正,但后者步骤繁琐,增加计算量。

从 $\overline{l\alpha\beta}$ 反变换到YUV空间:

$$YUV = \text{pow}10(M_{L-l}^{-1}) + YUV_offset \quad (22)$$

$\text{pow}10(X)$ 指对 X 中的元素分别做以10为底的指数运算。

综上,去相关颜色校正的流程为:

1) 式(14)、(15)获取测试序列各个视点图像的匹配块数据;

2) 式(19)将匹配块数据从YUV空间变换到 $\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta}$ 去相关颜色空间中;

3) 式(20)将 $\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta}$ 空间中的数据进行校正;

4) 式(22)将 $\hat{l} \hat{\alpha} \hat{\beta}$ 空间中的数据重新变换到YUV空间中。

4 实验结果

实验采用的测试序列为Flamenco2、Race1、Ballroom、Breakdancers和Janine1^[13],所用编码参数见文献[14]。采用

的编码平台为JMVM 8.0^[15]。

图1给出了YUV三色激励值的相互关系和 $l\alpha\beta$ 三色激励值的相互关系的对比(所采用的测试序列为ballroom)。可以看出,YUV三色激励值相关程度较大,而在 $l\alpha\beta$ 空间中,三色激励值近似无关(尤其是 β 与 l 、 α 与 β)^[5],表明所得YUV到 $l\alpha\beta$ 颜色空间变换矩阵的有效性。

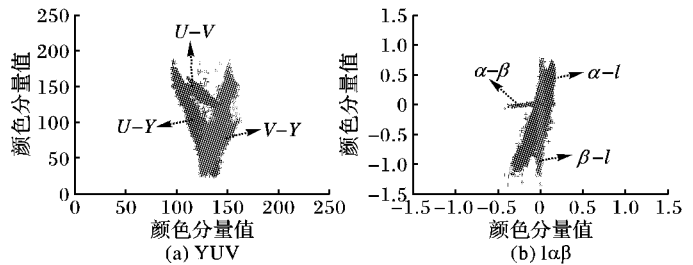


图1 YUV三色激励值的相互关系与 $l\alpha\beta$ 对比

图2给出了校正前后的图像对比,可以看出,校正后图像的颜色趋于相同,并且主观图像质量没有降低。

表1采用Bjontegaard方法^[16]给出JMVM对原始序列和校正后序列的编码比较结果。表中数据正值表示提高,负值为降低。其中, ΔY_PSNR 、 ΔU_PSNR 和 ΔV_PSNR 分别指校正后与校正前相比改变的Y、U和V分量的平均峰值信噪比(PSNR), $\Delta \text{bitrate}$ 为改变的平均比特率百分比(以Y_PSNR为基准)。

表1 Bjontegaard结果

图像序列	$\Delta Y_PSNR/\text{dB}$	$\Delta U_PSNR/\text{dB}$	$\Delta V_PSNR/\text{dB}$	$\Delta \text{bitrate}/\%$
Flamenco2	1.06	1.54	1.55	-40.91
Race1	1.43	2.54	2.89	-26.76
Ballroom	0.20	0.59	0.29	-5.09
Breakdancers	0.33	0.59	0.34	-13.72
Janine1	0.34	1.53	1.10	-7.62

与文献[1]相比,实验结果中的各项指标性能都有较大提高,与文献[2]相比则略有降低。但是,文献[2]中实验指标提高的主要因素之一是它采用了匹配块的平均值作为最小二乘法的参考值,带来的负面作用则是图像质量的下降。由于搜索到的匹配块并不完全匹配,平均化的结果是掩盖了图像的细节特征,使得各个视点图像模糊退化,从而在运动估计后残差变小,比特率降低。因此,文献[2]中提高的一部分编码效率是以损害图像质量作为代价而得到。通过提高搜索范围,提高匹配精度是解决这一缺陷的方法之一,但多视点视频的一个特征是每个视点图像根据对极几何点与点对应^[10],而不是块与块对应,因此并不能找到完全精确的匹配块。另外,如Breakdancers和Janine1等高分辨率测试序列是通过摄像机汇聚或弧线排列拍摄得到,所得匹配块更不精确。文献[2]并没有给出任一个高分辨率序列的实验结果。

5 结语

针对多视点视频各视点图像颜色不均衡从而影响编码效率的问题,在去相关 $l\alpha\beta$ 颜色空间中设计了一种对三色激励值进行校正的方法。根据多视点视频的特点,为克服亮度差异的影响,采用相关分析法和距离分析法获取匹配块。采用合适的变换矩阵,将匹配块数据从YUV(或RGB)变换到 $l\alpha\beta$ 颜色空间中,并设计一种简便的校正方法,逼近各个视点与中间基准视点的统计特性,最后将校正后的数据转换到YUV空

间,所得视频序列在主观效果上,图像颜色趋同,且观看质量

没有降低,在编码效率上则有了较大提高。

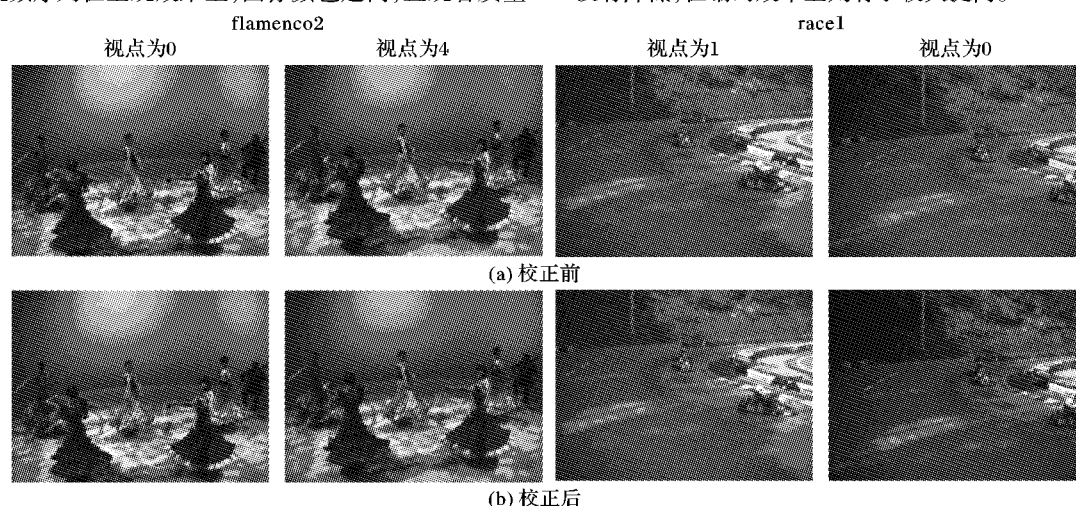


图2 校正前和校正后的多视点图像对比

参考文献:

- [1] FECKER U, BARKOWSKY M, KAUP A. Histogram-based prefiltering for luminance and chrominance compensation of multiview video [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(9): 1258 – 1267.
- [2] DOUTRE C, NASIOPOULOS P. Color correction preprocessing for multiview video coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2009, 19(9): 1400 – 1405.
- [3] HUR J H, CHO S, LEE Y L. Adaptive local illumination change compensation method for H.264/AVC-based multiview video coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(11): 1496 – 1505.
- [4] YAMAMOTO K, KITAHARA M, KIMATA H, *et al.* Multiview video coding using view interpolation and color correction [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(11): 1436 – 1449.
- [5] RUDERMAN D L, CRONIN T W, CHIAO C C. Statistics of cone responses to natural images: Implications for visual coding [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(8): 2036 – 2045.
- [6] REINHARD E, ADHIKMIN M, GOOCH B, *et al.* Color transfer between images [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(5): 34 – 41.
- [7] JACK K. Video demystified [M]. 5th ed. Oxford: Elsevier Nwines, 2007: 16.
- [8] STOKES M, ANDERSON M, CHANDRASEKAR S, *et al.* A standard default color space for the Internet—SRGB [R]. Palo Alto: Microsoft and Hewlett-Packard, 1996.
- [9] FAIRCHILD M D. Color appearance models [M]. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2005: 228.
- [10] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [11] 蒋刚毅, 费跃, 邵枫, 等. 面向编码和绘制的多视点图像颜色校正 [J]. 光子学报, 2009, 38(9): 2430 – 2434.
- [12] 姚庆东, 毕厚杰, 王兆华, 等. 图像编码基础 [M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2006: 40.
- [13] SU Y, VETRO A, SMOLIC A. Common test conditions for multiview video coding, JVT-U211 [R]. Hangzhou, China: JVT, 2006.
- [14] HO Y-S, OH K-J. Overview of multi-view video coding [C]// 14th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing: 2007 and 6th EURASIP Conference Focused on Speech and Image Processing, Multimedia Communications and Services. Washington, DC: IEEE, 2007: 5 – 12.
- [15] PANDIT P, VETRO A, CHEN Y. JMVM 8 software, JVT-AA208 [R]. Geneva: JVT, 2008.
- [16] BJONTEGAARD G. Calculation of average PSNR differences between RD-curves [DB/OL]. (2001 – 03 – 26) [2010 – 01 – 11]. http://wftp3.itu.int/av-arch/video-site/0104_Aus/VCEG-M33.doc.
- [9] LAEHER M S, DECKER S. RDF, topic maps and the semantic Web [J]. Theory and Practice, 2002, 3(3): 313 – 331.
- [10] GARSHOL L M. Topic maps, RDF, DAML, OIL—A comparison [EB/OL]. [2010 – 02 – 10]. <http://www.ontopia.net/topic-maps/materials/tmrdfoidaml.html>.
- [11] PATIL A, OUNDHAKAR S, SHETH A, *et al.* Meteor-S Web service annotation framework [C]// Proceedings of the 13th International Conference on World Wide Web. New York: ACM, 2004: 17 – 22.
- [12] ZHOU XIANGBIN. Semantics Web service characteristic composition approach based on particle swarm optimization [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2010, 56(1): 279 – 287.
- [13] MARTIN D. OWL-S: Semantic markup for Web services [EB/OL]. [2010 – 01 – 20]. <http://www.w3.org/Submission/2004/SUBM-OWL-S-20041122>.
- [14] HORROCKS I, SCHNEIDER P F, HARMELEN F V. From SHIQ and RDF to OWL: The making of a Web ontology language [J]. Journal of Web Semantics, 2003, 1(1): 7 – 26.
- [15] MAEDCHE A. Ontology learning for the semantic Web [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [16] LI YUHUA, BANDAR Z, McLEAD D. An approach for measuring semantic similarity between words using multiple information sources [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2003, 15(4): 871 – 882.
- [17] 宋峻峰, 张维明, 姚莉, 等. OWL DL 的形式化基础研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(2): 297 – 301.
- [18] HORROCKS I, SATTler U. A Tableau decision procedure for SHOIQ [J]. Journal of Automated Reasoning, 2007, 39(3): 249 – 276.

(上接第 2767 页)