一种基于 LAB 色空间拓扑剖分影射的颜色恒常性模型

许家佗[1],屠立平[1],张志枫[1],邱锡鹏[2],郭跃飞[2],危 辉[2]
(1. 上海中医药大学中医信息科学与技术中心,上海 201203;
2. 复旦大学计算机科学与工程系,上海 200433)

摘 要: 本文针对人体肤色和黏膜颜色特点,建立一种室内自然光条件下的医学真彩图像采集分析的颜色恒常性模型. 在 LAB 均匀色度空间中,对一维 L *空间进行线性影射,二维 a *b *空间进行三角剖分影射和还原,建立了一种拓扑剖分影射 TRM 模型. 通过对 SG 色标中 13 个肤色色标进行的校正还原,结果显示,TRM 模型还原的颜色色差明显减小,离散度小,性能稳定.

关键词: 颜色恒常性模型; 拓扑剖分影射 (Topology Resolve-Map, TRM) 模型; LAB 色空间; 颜色校正
中图分类号: R241.24 O432.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 0372-2112 (2009) 09-2109-04

A Color Constancy Model Based on LAB Topology Resolve-Map

XU Jia-tuo[1], TU Li-ping[1], ZHANG Zhi-feng[1], QIU Xi-peng[2], GUO Yue-fei[2], WEI Hui[2]
(1. *Chinese Medicine Information Science and Technology Center, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai* 201203, *China*;
2. *Department of Computer Science and Engineering, Fudan University, Shanghai* 200433, *China*)

Abstract: Aiming at the color features of human skin and mucosa, a color constancy model is established to collect and analyze medical true color images under natural light condition. In LAB color space, a TRM (topology resolve-map) model is established to restore these colors from the gathered images to standard values by linear mapping to the one-dimensional L * space and triangulation mapping to the two-dimensional a *b * space. Via regulating and restoring the 13 skin colors in SG color codes, the experimental results show that the TRM model has good accuracy and stability and the differences of delta L, delta ab and delta E are dramatically decreased.

Key words: color constancy model; topology resolve-map (TRM); LAB color space (LAB); color rectification

1 引言

颜色还原性问题是机器视觉领域重要研究内容之一. 在医学真彩图像采集与分析领域,颜色还原的准确性和稳定性具有比普通应用领域更高的专业要求,图像采集设备和分析方法尽可能具有颜色恒常性的特点,以保证颜色分析的稳定和准确. 人的视觉具有颜色恒常性,能够一定程度上排除光照条件对颜色的影响,正确地反应实物本身所固有的颜色. 机器视觉颜色恒常性问题也是机器视觉研究的难点之一[1]. 颜色恒常性模型中经常采用的方法比较典型的是白色标准样品,称为有监督下的颜色恒常性,或运用在线监督色板,将其与被摄物体一起拍摄,以确定拍摄环境与标准环境的颜色对应关系[2,3]. 颜色还原可以通过事先对环境光照条件测量和校准来实现,一般采用多项式影射和神经网络的方法将颜色转化为标准环境下的颜色值,多项式和神经网络参数可以通过在实际拍摄环境和标准环境下分别获取的色板颜色数据进行运算确定[4]. 但是,环境光照条件测量和校准方法比较复杂,对设备的依赖性也比较强,光学设备昂贵测量代价高,临床应用的可行性差. 在临床面色、口唇、舌象等真彩图像的采集分析过程中,对室内不同自然光条件下真彩图像的颜色稳定和准确具有较高的要求. 在医学真彩图像采集应用中,光照性能、场景反射性能、图像传感器性能等都是相对稳定的. 光照条件主要针对符合 CCD 设备使用的室内自然光,光照色温范围主要在 5000-7000 K 相对稳定的变化范围以内;图像采集对象主要为脸部、口唇、舌、指甲等,相对面积较小,在同一幅图像中,光照的性能、场景反射性能等是基本稳定和一致的;CCD 图像传感器主要应用性能稳定的数码单反相机(DSLR). 稳定的图像获取性能为建立精确的颜色还原奠定了重要基础. 针对这一特定图像获取条件,本文设计了一种基于均匀 LAB 色度空间条件下,应用色监督方法,筛选和利用标准色将均匀色度空间"剖分-影射-还原"(Topology Resolve-Map)的 TRM 模

收稿日期:2008-09-02;修回日期:2009-03-28
基金项目:国家 863 高技术研究发展计划(No. 2008AA02Z407);国家自然科学基金(No. 30873463,30300443);上海市重点学科(No. S30302)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

型.模型以标准色标为还原依据,将不同条件下获取的图像颜色,通过 TRM 函数还原到标准条件下的色度值.

2 原理与方法

2.1 TRM 模型原理

CCD 图像颜色的变化受光照的性能、场景反射性能、图像传感器性能等多种因素影响,图像中的颜色改变,属于非线性变化.如果可以通过某种方法将这种总体的非线性变化分解转化成局部的近似线性变化,再求解近似线性变化规律,最大限度地降低这种颜色的变化,就可以实现图像颜色分析的恒常性.根据拓扑学原理,将非线性变化的空间进行剖分,剖分得到的空间与标准条件下的该空间具有对应的同胚影射关系[5].所以,如果确定合理的剖分尺度,那么,将非线性变化的颜色空间分解成若干个近似线性变化的子空间,就可以在相应的子空间中,对颜色进行线性的近似还原.因此,实验应用均匀色空间,通过标准色在均匀色度空间的变化,进行"剖分-影射-还原",将发生变化了的图像颜色影射回对应的标准条件下色空间内,求解图像标准条件下在色空间中影射对应的色度值.又因为,在 LAB 色空间中,亮度 L 空间与色度 AB 空间具有相互独立性,因此,可以分别对一维 L 值和二维 AB 空间进行还原分析.

主要过程:(1)针对人体的肤色、粘膜颜色特点,在 $L^*a^*b^*$ 色度空间中选择相应的色度范围;(2)根据剖分精度选取 SG 色标的标准色;(3)建立相应的影射函数,依据标准色标,分别对一维 L^* 空间和二维 a^*b^* 空间进行拓扑剖分-影射还原,求解与图像颜色对应的标准条件下的 L、a、b 色值.

2.2 色度空间的选取与范围确定

在运用函数进行颜色还原的过程中,要求色度空间的距离能够准确的反映颜色的差别,即应用均匀色度空间.因此色度空间选择国际照明委员会(CIE)推荐的 CIE1976 $L^*a^*b^*$ 均匀色空间(简称 LAB).原始图像从 RGB 到 LAB 的转换方法见文献[6].

由于人脸、皮肤、口唇、指甲、黏膜等部位颜色特征具有相对的稳定范围,因此在通过对这些研究对象在 LAB 颜色空间的色度值分布范围的总结和归纳,实验筛选的 LAB 色空间范围为:L 值 10-100,A 值 10-40,B 值 10-40.实验所研究的图像采集条件是,在室内自然光条件下,对人脸、舌体等局部区域应用稳定的 CCD 图像采集设备进行图像采集,所以在人脸、舌体等局部图像区域内,光照的性能、场景反射性能和图像传感器三个影响颜色性能的关键环节,在每一幅图像中颜色变化是相对稳定和均匀的,即用监督的标准色板能够反映整个图像的颜色变化.

图像采集设备采用 NIKON D70 单镜反光数码相机(DSLR);图像采集环境为自然光照充分的室内环境.实验的标准色标选用 Gretagmacbeth Digital Color Checker SG(简称 SG),该色板提供了 140 个标准色标,其中有针对皮肤颜色设计的 D-J(7-8)色标.

2.3 L 值的还原方法

选择 SG 标准色卡中 n 个标准灰度色作为监督色和还原依据,将 L 值的一维空间 10-100 分成 n-1 个空间段,以色标提供的 L 值 Ni 为标准,将采集得到的图像中的 L 值利用相应的比例关系进行影射还原.

(1)所选 SG 色板中 n 块 L 值监督色标准分别为 Ni (i = 1, …, n);

(2)采集得到图像中,该 n 块监督色对应的 L 值则分别为 M_i (i = 1, …, n);

(3)图像中测试对象的 L 值为 l,l 值在 M_i 中的某两值 M_{i1}, M_{i2} 之间,($M_{i1} < l < M_{i2}$);M_{i1}, M_{i2} 对应的标准 L 值分别为 N_{i1}、N_{i2} ($N_{i1} < N_{i2}$);

(4)则,测试对象影射到原始标准条件的 L 值 l_0,与 M_{i1}、M_{i2}、N_{i1}、N_{i2}、l 在拓扑空间影射关系可以表示为:

$$\frac{l_0 - N_{i1}}{N_{i2} - N_{i2}} = \frac{l - M_{i1}}{M_{i2} - M_{i1}} \tag{1}$$

则
$$l_0 = N_{i1} + \frac{(1 - M_{i1})(N_{i2} - N_{i1})}{(M_{i2} - M_{i1})} \tag{2}$$

(5)若 $l = M_{i1}$ 则 $l_0 = N_{i1}$;

实验中,n 取 6,即选择 SG 色卡中 $E6$、$F6$、$G6$、$H6$、$I6$、$J6$ 灰度色块的 L 值作为监督和还原标准.

2.4 a*、b*值的还原方法

2.4.1 AB 空间的剖分

根据拓扑剖分原理对 AB 空间应用三角剖分,图像颜色特征空间与标准色值空间具有一一对应关系,三角形作为色度空间剖分的基本单元,每一对对应的三角形之间也具有拓扑影射关系.图像颜色坐标向标准颜色坐标的影射还原,实际上就是求解图像颜色空间与标准空间的对应关系.

根据肤色在 AB 色坐标的分布范围,实验选择 a: 10-40, b:10-40 范围作为剖分区间范围.本实验考虑主要以 SG 色卡中具有肤色特征的色标作为测试对象,所以,剖分的三角形尽可能多地涵盖肤色色块,选取了 $B9$、$G3$、$I9$ 作为 AB 坐标中剖分三角形的三个顶点,选取了落在同一个剖分三角形内的 13 个色块:$E2$、$F2$、$D8$、$E7$、$E8$、$F7$、$F8$、$G7$、$G8$、$H7$、$H8$、$I8$、$J7$ 作为测试色标.三角剖分方法见图 1.

2.4.2 a*、b*值的影射还原

AB 色度坐标变化前后的二维空间影射关系,还原主要方法:

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

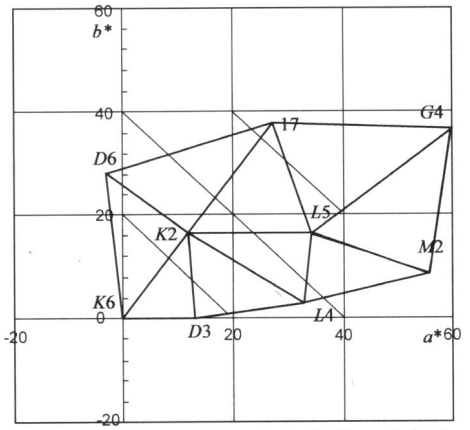


图1　理想的三角剖分与实验采用的三角剖分

(1) 选择监督色标,以色标的 a^*、b^* 值确定 AB 坐标空间 N,并根据上述规则进行该二维三角剖分;

(2) 把监督色标在图像中的 a^*、b^* 值构成坐标空间看成 N 的同胚拓扑变换,并形成了新的拓扑空间 M 和三角剖分;

(3) 以监督色坐标点为影射依据,坐标空间 M 与 N 具有对应三角形影射关系,应用三角形重心逼近方法,对图像中的颜色测试对象所在剖分三角建立影射函数 $F(X_i): N_i \rightarrow M_i$;

(4) 则图像中的颜色测试对象 AB 值坐标点 $m(a, b) \in M_i$,应用影射函数 $F(X_i)$ 可得到 m 在影射空间 N_i 内的影射坐标点 $m'(a', b') \in N_i$.

2.4.3　三角形重心逼近法求 a*、b*值

已知两个三角形所有顶点坐标,它们的顶点是拓扑影射对应关系.

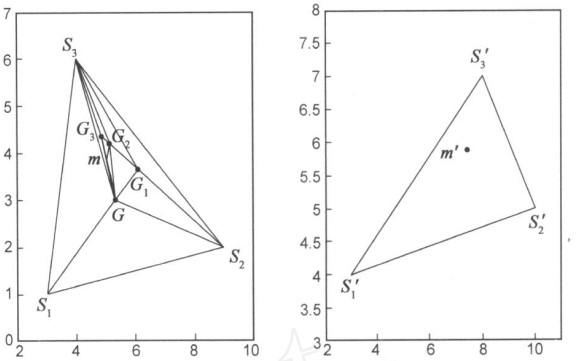
(1) 三角形 $\triangle S$ 为监督色标的 AB 坐标拓扑空间 M 的一个拓扑基,$m \in \triangle S$ 为已知坐标点;三角形 S' 是对应的标准色标 AB 坐标构成,$\triangle S$ 与 $\triangle S'$ 的重心分别为 G 和 G';$m' \in \triangle S'$,m' 为需要求解的点 m 影射还原点.

(2) 判断坐标点 m 是哪一个 $\triangle GS_1S_2$、$\triangle GS_1S_3$、$\triangle GS_2S_3$ 的内点,并计算该三角形的重心 G_1,循环该步骤,直至点 m 所在的 $\triangle G_iS_jS_k$ 重心 G_i 与 m 点的距离小于 0.01 计算停止,即

$|G_i - m| < 0.01$, G_i 近似逼近点 m.

(3) 用同样的重心逼近方法,在 $\triangle S'$ 中求得 $\triangle G_iS_jS_k$ 的同胚影射 $\triangle G_i'S_j'S_k'$ 重心 G_i',G_i' 近似逼近点 m',由于坐标 AB 的值精度 < 0.01 时,已经接近无色差,因此,可以近似认为点 $m'(a', b')$ 等于 G_i 坐标 (aGi', bGi'),即最终求得 m 在影射空间 M_i 内的影射坐标点 m'.

由于本实验的 AB 坐标范围 a^*、b^* 值在 10 - 40,剖分的三角形边长尺度在 20 左右,所以三角形重心逼近的次数一般在 5 - 10 次即可完成,如图 2.



(a) 图像中已知三角形S内点m　(b) 标准色值三角形S′, m对应点m′

图2　三角形重心逼近法求a*、b*值

2.5　实验方法

实验的色标均从 SG 色标中选取,色标都取 D50 光源 10 角条件下 $L^*a^*b^*$ 的标准色值. 在剖分 AB 两维坐标空间时,剖分尺度主要以 SG 色卡中肤色色块为主要测试对象,选择了 $B9$、$G3$、$I9$ 三个色标的 AB 坐标值作为一个主要的剖分三角形的三个顶点,从 14 块肤色色标中选择落在该剖分三角形内的 13 个色标作为测试样本. 实验在室内自然光条件下,用 NIKON D70 在不同光照条件下拍摄 SG 色卡,得到 10 张图像,然后应用 TRM 模型对 13 个色标颜色校正还原,并将还原的结果与标准色值比较,评价颜色的校正还原效果. 同时,实验还与专业照片处理软件 NIKON CAPTURE 的自动白点平衡(WB)校正结果进行比较,标准白选用 SG 色卡中 $A1$ 色标.

LAB 色度空间中色值 (L_1, a_1, b_1) 与 (L_2, a_2, b_2) 之间的色差距离计算方法:

$$\Delta L = L_1 - L_2 \tag{3}$$

$$\Delta ab = \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \tag{4}$$

$$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \tag{5}$$

3　实验结果

3.1　L 值的校正结果

对 L 值的校正结果显示,校正前 130 个色标 $\triangle L$ 值的总体均值为 3.56 ±2.13,经过校正以后 $\triangle L$ 值的总体均值为 1.95 ±1.47,校正后 $\triangle L$ 值明显小于校正前,校正过的 L 值更加精确地接近标准值,而且校正后的 L 值离散度小,稳定性好.

3.2　a*、b*值的校正结果

在 AB 坐标中,色度值 a^*、b^* 共同确定了一个坐标点,$\triangle ab$ 则反映两坐标点间的欧氏距离. 以 SG 标准色值为校正依据,130 个总样本,在校正前 $\triangle ab$ 的平均值为 11.96 ±5.93,应用专业软件进行 WB 校正后 $\triangle ab$ 的均值为 4.68 ±2.29;而三角型重心逼近校正后 $\triangle ab$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

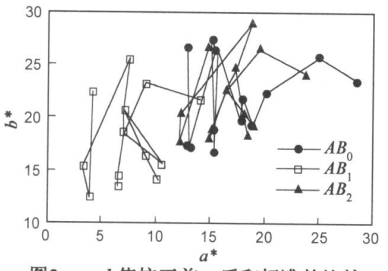


图3 a、b值校正前、后和标准的比较
(AB_0为标准值，AB_1为校正前值；AB_2为校正后值)

的均值2.94 ±1.57,距离SG提供的标准色点误差最小,离散度也最小.

3.3 色差 △E 校正前后的比较

130个总样本次数,与标准色值比较,未校正时平均色差 $\triangle E_0$ 为11.58 ±2.51,WB校正后平均色差 $\triangle E_{wb}$ 为11.65 ±2.46,TRM方法校正后平均色差 $\triangle E_{trm}$ 仅为3.77 ±1.68,TRM模型校正的色差和离散度都很小,最接近标准色.结果显示:该模型具有良好的颜色还原性和稳定性.

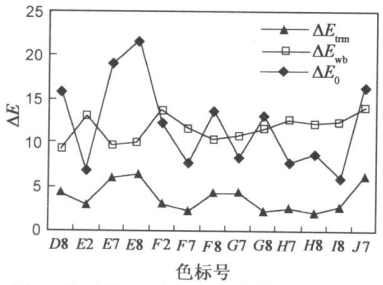


图4 校正前、后和白平衡校正ΔE的比较

4 结论

在医学图像采集分析中,颜色的准确还原具有更加精确的要求和更重要的意义.现有的颜色校正方法,往往仅针对RGB颜色空间中R、G、B进行不同系数的校正[7,8],由于RGB空间不是均匀色度空间,因此也很难实现稳定精确的颜色校准.本文提出了一种基于LAB均匀色空间的TRM颜色恒常性模型,建立了精确的颜色恒常还原模型,并通过对不同条件图像的颜色还原实验,验证了该模型具有良好的还原效果和还原稳定性.在特定色空间测试范围,选择适当的剖分尺度,TRM模型具有良好的颜色还原效果和稳定性.TRM模型主要依赖于标准色标特征和剖分精度,对光线测量、CCD硬件设备等依赖性小,有效地解决了医学临床图像分析应用时的颜色恒常性问题.实验显示,该模型颜色还原效果好、稳定性强.同时该模型具有良好的扩展性,也适用Luv,YCrCb等均匀颜色空间,并可以根据应用还原精度的需求,建立不同范围、不同尺度的TRM模型,可应用到颜色恒常性分析的各领域.

参考文献:

[1] N Oliver, A Pentland, et al. A real-time face and lips tracker with facial expression recognition [J]. Pattern Recognition, 2000, 33(8): 1369 - 1382.

[2] Gehler P V, Rother C, et al. Bayesian color constancy revisited [A]. Mauro Costa. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition 2008 [C]. Anchorage: IEEE Computer Society, 2008. 1 - 8.

[3] M Tsukada, J Tajima. Color matching algorithm based on computational 'color constancy' theory [A]. Yasuhiko Yasuda. International Conference on Image Processing 1999 [C]. Kobe, Japan: IEEE Signal Processing Society, 1999. 60 - 64.

[4] Xiao-zhao Xu, Xin-feng Zhang, et al. Research on the color reproduction based on the BP neural network algorithm [A]. Eliah. IEEE 2008 International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering [C]. Phuket, Thailand: IEEE Computer Society, 2008. 256 - 260.

[5] 林金坤. 拓扑学基础[M]. 北京:科技出版社, 2004. 45 - 51.

[6] Y C Connoll. A Study of Efficiency and Accuracy in the transformation from RGB to CIELAB color space [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 1046 - 1048.

[7] 蔡轶珩,沈兰荪,刘长江. 新型中医舌象分析仪关键技术研究[J]. 电子学报, 2006, 34(4): 713 - 716.
Cai Yi-heng, Shen Lan-sun, Liu Chang-jiang. Key technologies of the new-style instrument for tongue image analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(4): 713 - 716. (in Chinese)

[8] 刘关松,吕嘉雯,徐建国,等. 监督颜色校正方法研究[J]. 计算机学报, 2003, 26(4): 502 - 506.
Liu Guan-song, Lu Jia-wen, Xu Jian-guo, et al. The study of supervised color correction [J]. Chinese Jounal of Computers, 2003, 26(4): 502 - 506. (in Chinese)

作者简介:



许家佗 男,1972年出生于辽宁大连,医学博士,计算机信息科学与技术博士后,副教授、硕士生导师.主要从事中医诊疗技术的信息化、数字化研究与应用.
E-mail: xjt@fudan.edu.cn



屠立平 男,1981年出生于湖南常德,医学硕士,实习研究员.主要从事医学图象采集与分析研究.
E-mail: silong20000@163.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net