

一种基于物理反射模型颜色不变性的阈值分割算法

蔡 珣 孟祥旭 郝兴伟 连 莉 姜 龙

(山东大学计算机科学与技术学院人机交互与虚拟现实实验室 济南 250061)

摘 要 提出了一种适用于视频监控场景的基于物理反射模型的阈值分割算法,该算法主要解决背景颜色识别受光强非均匀分布、高光效应影响的问题.算法步骤主要包括:首先基于 Phong 反射模型推导出漫反射分量颜色不变性并根据这一判定条件计算得到漫反射分量系数;其次,利用微分法则实现对模型镜面反射分量系数和镜面反射强度指数的估计;最后,根据建立的物理反射模型实现背景阈值分割.大量实验分析结果表明,文中提出的算法利用视频监控的物理反射模型和大量统计信息,能够更好地解决受光强非均匀分布和高光效应影响的颜色识别问题.

关键词 颜色不变性;阈值分割;计算机视觉;视频监控;Phong 物理反射模型

中图法分类号 TP391

DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2009.00282

An Image Segment Method Based on Color Invariance of Physical Reflection Model

CAI Xun MENG Xiang-Xu HAO Xing-Wei LIAN Li JIANG Long

(Human-Interaction & Virtual-Reality Research Department, School of Computer Science and Technology,
Shandong University, Jinan 250061)

Abstract This paper proposes a new background segmentation method based on Phong reflection model for video surveillance system. The main goal of this method is to reduce the affections of the non-uniform illumination and specular reflection. The steps of this method include: First, the colour invariance of diffuse reflection was deduced and the diffuse component of the model was estimated; second, the specular factors and specular exponent of the specular component was calculated by following differential rules; third, based on the established model, the background segment is accomplished. The experimental results and the evaluation show that this method can not only be robust to the non-uniform lighting and the specular reflection of background surface, but also be applicable for real-time video surveillance system.

Keywords color invariance; threshold segmentation; computer vision, video surveillance; Phong illumination model

1 引 言

在视频监控系统中,颜色是目标识别和跟踪的

重要特征.由于受光源光强分布不均以及表面反射性的影响,物体表面颜色常常会因为光照在空间分布上的非均匀性或高光效应而发生程度不同的变化,因此如何实现颜色识别的光照不变性是保证视

收稿日期:2006-11-10;最终修改稿收到日期:2008-04-20.本课题得到山东省自然科学基金(Y2006G28)资助.蔡珣,女,1971年生,博士,副教授,研究兴趣包括计算机视觉、图像/视频识别、人机交互与虚拟现实、图像/视频检索等. E-mail: caixunzh@sdu.edu.cn.孟祥旭,男,1962年生,博士,教授,博士生导师,研究领域包括计算机图形学、计算机软件与理论、人机交互与虚拟现实、CIMS、CAD/CAM等.郝兴伟,男,1966年生,博士,副教授,研究方向包括 E-learning、虚拟现实、内容管理等.连莉,女,1970年生,博士研究生,讲师,研究方向包括 Web 信息检索、知识管理、人机交互技术等.姜龙,男,1985年生,硕士研究生,研究方向包括计算机视觉、图像/视频检索等.

频监控系统鲁棒性的关键问题。

针对光强非均匀分布问题,比较常用的方法是 RGB 颜色空间变换到其它色彩空间,如 rg、HSV 等通过建立颜色的混合高斯模型和 Kernel 函数进行颜色密度估计,最后根据 Bayes 规则进行图像分割^[1-2]。再就是采用多阈值分割算法,即根据目标对象在边界范围的灰度梯度较大而其他区域灰度梯度较小的特点,采用 Shen-Castan 边界检测来定位对象边界,并通过建立阈值分割面实现背景分割^[3-4]。类似的方法还有 LUT 分类法^[5],通过建立物体表面的颜色查找表来实现光照非均匀的目标对象识别。上述方法能够不同程度地解决漫反射表面的光强非均匀变化问题,但没有对高光效应的处理。

另一种采用基于物理反射模型的算法是最好的解决高光附近颜色识别的方法。其中最常用的是基于双色调反射模型的颜色恒常性 (physical-based color constancy) 算法^[6-10],它通过对镜面反射光的估计来实现当光照色彩改变时的颜色校正。但该方法大多不是为了消除高光效应,而是为了实现未知光源下的整体图像颜色的恢复。Geusebroek^[11]采用更广义的 Kubelka-Munk 的反射模型,提出了适用于不同光照条件下的颜色不变性集合,并利用这些颜色不变性集合实现对阴影、光照变化、高光和噪声等鲁棒的边界检测。但该算法主要解决光照影响下的物体边缘的检测问题而不是为了背景分割。

本文主要是针对视频监控场景的特点,提出了一种新的基于 Phong 反射模型的颜色不变性阈值分割算法。该算法不仅可以精确处理光照非均匀变化的影响,而且对镜面反射效应具有鲁棒性。此外,算法在建立了背景的颜色估计后,只需简单的颜色比较就可实现阈值分割,因而能够保证视频监控的实时性。

Phong 反射模型是由 Phong Bui-Tuong 在 1975 年提出的一种主要用于计算机图形学领域绘制三维物体明暗效果的反射模型^[12]。采用 Phong 模型的原因是 Phong 模型更形式化了非导体材料的镜面反射分量和漫反射分量与视角位置的关系,这对于场景参数固定的视频监控环境尤为适合。视频监控场景的 Phong 反射模型可以描述如下:

假定一个如图 1 所示的镜面反射场景, θ 为入射角, α 为反射光方向和视点方向的夹角, n 为反射强度指数的倍数,则在忽略泛光的情况下,Phong 反射模型可以简化为

$$I_\lambda = I_{L\lambda} \cos \theta + I_{S\lambda} \cos^n \alpha \quad (1)$$

其中, $I_{L\lambda} \cos \theta$ 和 $I_{S\lambda} \cos^n \alpha$ 分别代表了图像采集到的像素颜色值的漫反射分量和镜面反射分量。

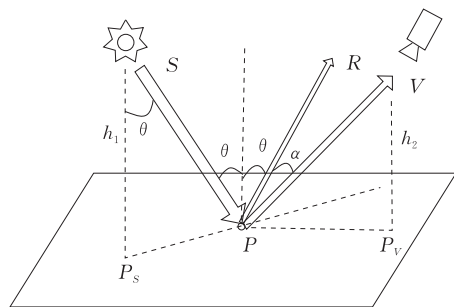


图 1 视频监控场景的物理反射模型示意图

本文第 2 节为漫反射不变性判定;第 3 节为 Phong 反射模型建模;第 4 节为阈值分割算法流程;第 5 节为实验结果分析和阈值分割效果;第 6 节为结论。

2 漫反射颜色不变性判定

2.1 漫反射不变性判定推导

根据镜面反射物理特性,镜面反射效应只有高光区域范围内才最明显,因此对于非高光的区域,镜面反射分量可以忽略不计,这样式(1)可以简化为如下形式:

$$I_\lambda = I_{L\lambda} \cos \theta \quad (2)$$

通过对式(2)两边分别对入射角 θ 求一阶和二阶导数后,式(2)就转换为漫反射表面颜色不变性判定,即

$$I_\lambda + I'_\lambda|_\theta = 0 \quad (3)$$

2.2 漫反射不变性判定求解

由于图像本身是二维 $x-y$ 坐标下的函数,在颜色不变性的求解过程中不能直接得到 $I'_\lambda|_\theta$ 、 $I''_\lambda|_\theta$ 。但是,又因为点 P 处的图像颜色值 I_λ 和入射角 θ 均可以表示为 P 的连续函数,这样根据参数化微分求导法则, P 点对 θ 的一阶导数 $I'_\lambda|_\theta$ 可以表示为

$$I'_\lambda|_\theta = \frac{dI_\lambda}{d\theta} = \frac{I'_\lambda|_P}{\theta'|_P} \quad (4)$$

其中,

$$\theta = \arctg\left(\frac{|P - P_s|}{h_1}\right) \quad (5)$$

通过对式(5)求 P 的微分,得到

$$\theta'|_P = \frac{\frac{1}{h_1}}{1 + \left(\frac{|P - P_s|}{h_1}\right)^2} \quad (6)$$

从式(6)可以看出, $\theta'|_P \neq 0$, 因此式(4)可解. 这样, 将 P 点的一阶灰度差分 $I'_\lambda|_P$ 和 $\theta'|_P$ 代入式(4)后, 即可计算出 $I''_\lambda|_\theta$ 的值. $I''_\lambda|_\theta$ 的具体求解过程如下:

首先, 根据微分求导公式, 将 $I''_\lambda|_\theta$ 和 $\theta''|_P$ 表示为

$$I''_\lambda|_\theta = \frac{I''_\lambda|_P \cdot \theta'|_P - I'_\lambda|_P \cdot \theta''|_P}{(\theta'|_P)^2} \quad (7)$$

$$\theta''|_P = -\frac{1}{h_1^2} \cdot \frac{2 \cdot |P - P_S|}{\left[1 + \left(\frac{|P - P_S|}{h_1}\right)^2\right]^2} \quad (8)$$

其次, 将 $\theta'|_P$ 、 $\theta''|_P$ 和 P 点的二阶差分 $I''_\lambda|_P$ 的值代入式(7)即可得到 $I''_\lambda|_\theta$ 的值.

3 物理反射模型建模

对于每个满足漫反射不变性判定条件(即式(3))的像素点, 其所对应的漫反射系数为 $I_{L\lambda} = I_\lambda / \cos \theta$.

由于镜面反射分量参数估计只有在 $I_\lambda + I''_\lambda|_\theta \neq 0$ 的区域内才有效, 因此对于 $I_\lambda + I''_\lambda|_\theta \neq 0$ 的区域内的每个像素点, 本文对式(1)两边作变换并求对数导数, 从而得到一个独立于镜面反射系数 $I_{S\lambda}$ 的强度指数 n_λ , 即

$$n_\lambda = \frac{I'_\lambda|_\theta + I_{L\lambda} \sin \theta}{(I_\lambda - I_{L\lambda} \cos \theta)} \cdot \frac{\cos \alpha}{(-\sin \alpha)} \cdot \frac{1}{\alpha'|_\theta} \quad (9)$$

根据计算得到的 n_λ 和 $I_{L\lambda}$, 反射模型的镜面反射系数 $I_{S\lambda}$ 可计算为

$$I_{S\lambda} = \frac{I_\lambda - I_{L\lambda} \cos \theta}{\cos^{n_\lambda} \alpha} \quad (10)$$

与 $\theta'|_P$ 类似, α 也可以表示成点 P 的函数并根据参数化微分法则, α' 可以表示为

$$\alpha'|_\theta = \frac{d\alpha}{d\theta} = \frac{\alpha'|_P}{\theta'|_P} \quad (11)$$

根据图 1 所示的 R 、 V 分别为从点 P 处的反射方向和视角方向, 将 R 、 V 规格化为 R_e 和 V_e 后, α 可以表示为

$$\alpha = \arccos(R_e \cdot V_e) \quad (12)$$

其中,

$$\begin{cases} R_e = \mathbf{A} \left(\frac{P_S - P}{|P_S - P|} \right) = \mathbf{A}(P_{SR_e} - P_{R_e}) \\ V_e = \frac{P_V - P}{|P_V - P|} = P_{V_{V_e}} - P_{V_e} \end{cases} \quad (13)$$

\mathbf{A} 为入射角和反射角的变换矩阵, 即

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据三角函数的求导法则, $\alpha'|_P$ 可通过式(12)求导后得到为

$$\alpha'|_P = \frac{-(R_e \cdot V_e)'|_P}{\sqrt{1 - (R_e \cdot V_e)^2}} \quad (15)$$

其中,

$$(R_e \cdot V_e)'|_P = R'_e|_P \cdot V_e + V'_e|_P \cdot R_e \quad (16)$$

$$\begin{cases} R'_e|_P = \mathbf{A}'(P_{SR_e} - P_{R_e}) + \mathbf{A}(P_{SR_e} - P_{R_e})' \\ = \begin{bmatrix} -2\sin 2\theta & -2\cos 2\theta & 0 \\ 2\cos 2\theta & -2\sin 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (P_{SR_e} - P_{R_e}) + \\ \begin{bmatrix} \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{|P_S - P|^2} \\ V'_e|_P = \frac{1}{|P_V - P|^2} \end{cases} \quad (17)$$

这样, 通过上述计算公式, $\alpha'|_P$ 、 $\alpha'|_\theta$ 可解.

4 阈值分割算法流程

综上所述, Phong 反射模型颜色不变性阈值分割算法的流程可分为以下几步:

1. 对于每个满足漫反射不变性判定条件的各像素点, 计算出其所对应的漫反射系数 $I_{L\lambda} = I_\lambda / \cos \theta$, 这样就可以得到一个漫反射系数候选集合 $\{I_{i,L\lambda}\}$. 其中, i 为集合中各个元素的序号.

2. 在平面上选取一背景参考点 P_f , 假定其颜色值为 $I_{f\lambda}$ 而入射角为 θ_f . 这样, 以各个 $I_{i,L\lambda}$ 和参考点的入射角 θ_f 为参数计算得到一个参考点 P_f 的颜色估计值的集合 $\{\hat{I}_{i,f\lambda}\}$.

3. 将各个估计值 $\hat{I}_{i,f\lambda}$ 和 $I_{f\lambda}$ 进行比较后, 选择出和参考点 P_f 最相关的漫反射系数集合 $\{I_{i,L\lambda}\}$. 该集合的均值将作为漫反射表面的反射系数 $I_{L\lambda}$.

4. 对 $I_\lambda + I''_\lambda|_\theta \neq 0$ 区域的每一点通过式(9)和(10)计算出镜面反射系数和强度指数的候选集合 $\{(I_{i,S\lambda}, n_{i,\lambda})\}$.

5. 将该候选集合 $\{(I_{i,S\lambda}, n_{i,\lambda})\}$ 的每个 $(I_{i,S\lambda}, n_{i,\lambda})$ 以背景参考点的 θ_f 和 α_f 为参数代入 Phong 反射模型, 计算出背景参考点 P_f 的颜色估计值集合 $\{\hat{I}_{i,f\lambda}\}$.

6. 根据各个背景参考点估计值 $\hat{I}_{i,f\lambda}$ 和实际参考点颜色值 $I_{f\lambda}$ 的误差大小判断出和背景参考点 P_f 最相关的镜面反射系数和强度指数集合 $\{(I_{i,S\lambda}, n_{i,\lambda})\}$, 并将该集合的均值作为 Phong 反射模型镜面反射系数和强度指数 $(I_{S\lambda}, n_\lambda)$.

7. 采用以 $(I_{L\lambda}, I_{S\lambda}, n_\lambda)$ 为参数估计值的 Phong 反射模型计算出图像上各背景颜色的估计值, 从而实现背景颜色的估计, 并根据差异大小实现对背景颜色的阈值分割.

5 实验结果

在漫反射不变性求解中,由于噪声、阴影等外在因素的影响,绝对理想的 $\mathbf{I}_\lambda + \mathbf{I}_\lambda''|_\theta = 0$ 的漫反射判定是不存在的. 因此,本文采用一近似比 r_L 作为接近 0 的近似,从而得到若干候选漫反射点.

5.1 漫反射表面颜色估计

为了测试 RGB 3 个分量的漫反射系数 $\mathbf{I}_{L\lambda}$ 的计算稳定性,在图 2(a)所示的 512×384 漫反射表面背景图像上分别在行列等间隔取得 50 个点,形成一个 50×50 的参考点集合 $\{P_k\} (k=1, \dots, 50 \times 50)$. 该集合第 R 个颜色通道的灰度分布如图 2(b)所示.

在漫反射不变性相似比 $r_L = 0.90$ 的情况下,计算得到的漫反射系数集合 $\{I_{Lk}\}$ 的分布如图 2(c),从图中可以看出,尽管集合 $\{P_k\}$ 的灰度从 110 到 160,但 $\{I_{Lk}\}$ 的各点基本上稳定在 140~160 范围之间. 所得到的颜色估计误差均值集合 $\{erro_mu_k\}$ 和偏差集合 $\{erro_sigma_k\}$ 分布趋势图如图 2(d)和(e)所示. 实验结果表明了该算法对漫反射系数求解的稳定性. 从图中可以看出,尽管集合 $\{P_k\}$ 的各点灰度差异值为 50,但各个颜色估计误差均值仅为 6~10 之间,而偏差在 1~2 之间. 实验结果表明漫反射不变性对漫反射背景颜色估计的准确性和稳定性. 根据漫反射不变性所得到的背景分割结果如图 2(f)所示.

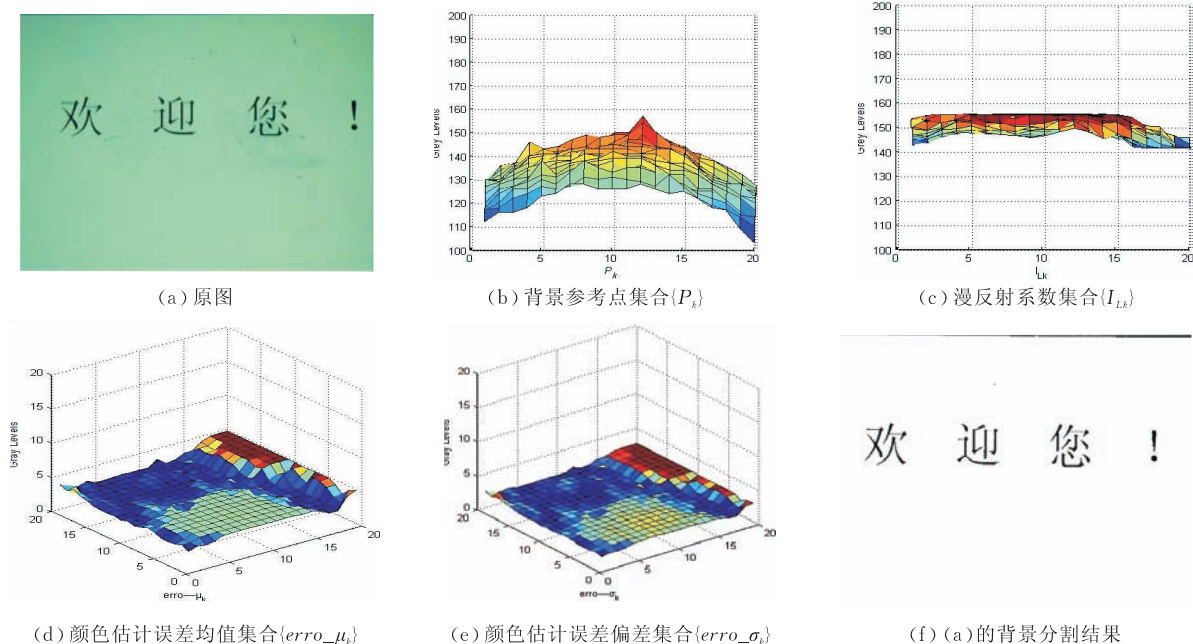


图 2 漫反射表面光照非均匀分布的颜色估计实验结果($r_L = 0.90$)

5.2 镜面反射表面颜色估计

为了估计对镜面反射表面估计的稳定性和准确性,本文采集了一幅普通白炽光照射到瓷砖地板的镜面反射图像,如图 3(a)所示. 图 3(b)为高光附近 20×20 参考点的第 R 颜色通道的灰度分布图,从图中可以很明显看出,镜面反射背景不仅存在光源非均匀变化的影响,而且还存在强烈的镜面反射效应.

为了测试出镜面反射效应的强度,对镜面反射表面的参考点选取不可能是任意的,只有在靠近镜面反射的高光区域周围进行选取才会有效. 因此,在这一约束条件下,本文在高光区域附近随机选择了 12 个参考点作为参考点集合 $\{P_k\} (k=1, 2, \dots, 12)$. 根据该参考点集合计算出 Phong 反射模型的系数

估计集合 $\{(I_{Lk}, I_{Sk}, n_k)\}$ 和背景颜色估计误差的均值和方差集合 $\{(erro_mu_k, erro_sigma_k)\}$,这些序列所形成的双轴折线图如图 3(c)所示. 图中左坐标轴用于标记参考点 P_k 、漫反射系数估计值 I_{Lk} 、镜面反射系数 I_{Sk} 、估计误差均值和偏差 $erro_mu_k, erro_sigma_k$ 的灰度大小;而右坐标轴代表了镜面反射强度指数 n_k 的大小测量. 从图 3(c)可以看出,当参考点 P_k 的灰度在 180~240 之间浮动时,计算出的漫反射系数 I_{Lk} 最稳定,大约在 135 范围内;而镜面反射系数 I_{Sk} 和强度指数 n_k 略有波动. 其中, I_{Sk} 大约在 50~65 范围内,而 n_k 大约为 13~13.5. 另一方面,尽管原图中存在强镜面效应,算法对背景颜色的估计误差均值 $erro_mu_k$ 稳定在 21~23 之间,而方差 $erro_sigma_k$ 稳定在

3 个灰度范围内. 当漫反射不变性近似比 $r_L=0.96$ 时,其阈值分割结果见图 3(d).

为了进一步研究该算法对大目标图像的分割效果,本文又采集了一幅具有镜面反射(瓷砖地面)和 大面积目标物图像,如图 3(e)所示. 在分割过程中,我们发现由于 RGB 颜色空间三分量间对光照的敏感性以及目标颜色在图像中所占比重较大等原因,直接利用 RGB 空间高斯模型的阈值分割结果虽然

能够去除背景颜色,但也丢失了大目标对象内的有效颜色. 为了提高分割效果,本文将 RGB 校正后的颜色转换到 rg 色彩空间再进行比较,最终得到的阈值分割结果如图 3(f)所示. 实验结果表明,不管目标区域相对背景区域的大小,Phong 反射模型颜色不变性阈值分割算法都能有效消除镜面反射效应和光源非均匀分布对背景颜色识别的影响.

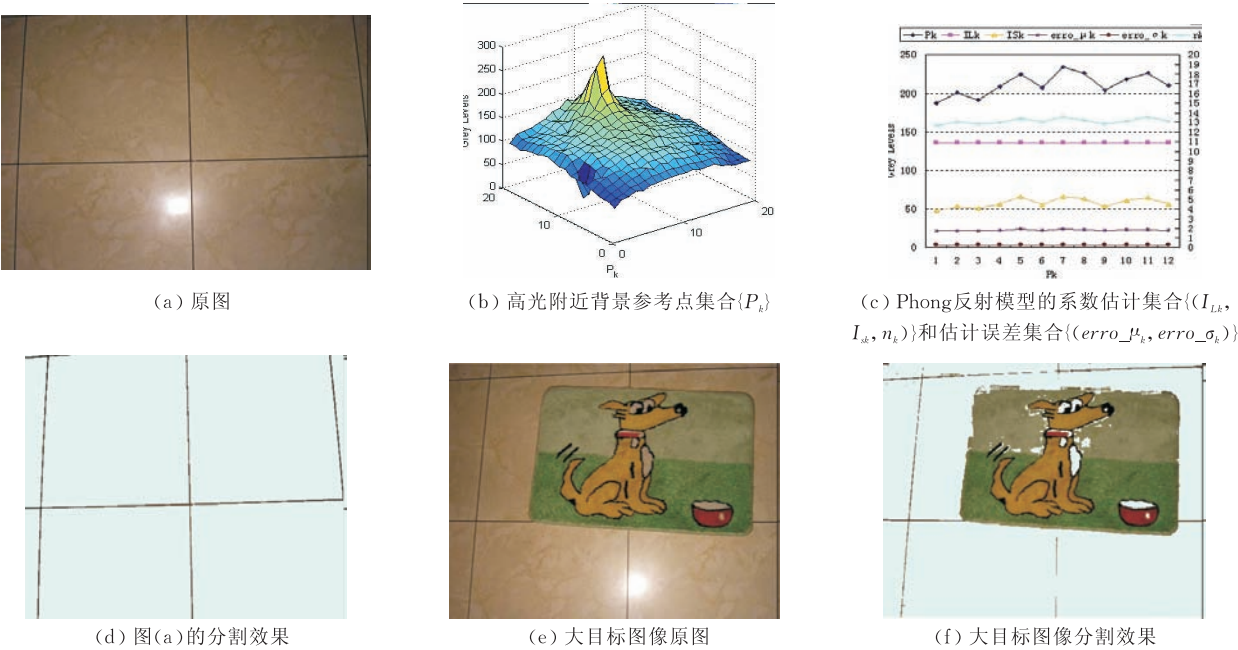


图 3 镜面反射表面颜色估计实验结果($r_L=0.96$)

6 结 论

本文主要介绍了一种适用于视频监控场景的基于物理反射背景颜色不变性的颜色估计算法. 该算法首先根据 Phong 物理反射模型推导出漫反射颜色不变性;其次,根据漫反射不变性判定条件得到 Phong 模型的漫反射系数;然后,再利用微分法则求得 Phong 模型的镜面反射强度指数和镜面反射系数;最后,在 Phong 反射模型的基础上实现背景阈值分割.

大量实验分析结果表明了该算法对光照非均匀变化和镜面反射效应影响的稳定性和适应性. 该算法在背景阈值面建立后对目标对象的识别将是简单的匹配,因此该算法可以满足视频监控系统的实时性要求.

由于物体表面反射和光照环境的复杂性,视频监控环境下的图像阈值分割还需结合其他光照不变性算法做进一步的研究.

参 考 文 献

[1] Gevers Theo, Aldershoff Frank. Color invariant density estimation for image segmentation and object tracking//Proceedings of the 2004 International Conference on Image Processing (ICIP 2004). Singapore, 2004: 3029-3032

[2] Lu Xiaohu. Adaptive colour classification for robocup with gaussian mixture model[Master Dissertation]. University of Alberta, 2005

[3] Parker J R, Jennings C, Salkauskas A G. Thresholding using an illumination model//Proceedings of the 2nd International Conference on Document Analysis and Recognition. Tsukuba, Japan, 1993: 270-273

[4] Shen J, Castan S. An optimal linear operator for step edge detection. CGVIP: Graphical Models and Image Process, 1992, 54(2): 112-133

[5] McNaughton M, Hong Zhang. Color vision for robocup with fast lookup tables//Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing. Changsha, Hunan, China, 2003, 1: 399-404

- [6] Shafer Steven A. Using color to separate reflection components. *Color Research and Application*, 2003, 10(4): 210-218
- [7] Tan Robby T, Nishino Ko, Ikeuchi Katsushi. Illumination chromaticity estimation using inverse-intensity chromaticity space//*Proceedings of the 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'03)*. Madison, WI, United States, 2003: 673-680
- [8] Tan Robby T, Nishino Ko, Ikeuchi Katsushi. Illumination chromaticity estimation using inverse-intensity chromaticity space//*Proceedings of the 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'03)*. Madison, WI, United States, 2003, 1(1): 673-680
- [9] Yoon Kuk Jin, Chofi Yoo Jin, Kweon In So. Dichromatic-based color constancy using dichromatic slope and dichromatic line space//*Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing 2005*. Genova, Italy, 2005: 960-963
- [10] Schaefer G, Hordley S, Finlayson G. A combined physical and statistical approach to colour constancy//*Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2005)*. San Diego, CA, 2005, 1(1): 148-153
- [11] Geusebroek J M, Van den Boomgaard R, Smeulders A W M, Geerts H. Color invariance. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(12): 1338-1350
- [12] Phong Bui-Tuong. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*, 1975, 18(6): 311-317



CAI Xun, born in 1971, Ph. D., associate professor. Her research interests include computer vision, virtual reality & human-computer interaction.

MENG Xiang-Xu, born in 1962, Ph. D., professor and Ph. D. supervisor. His main research interests include computer software and theory, human-computer interaction &

virtual reality, computer graphics, CIMS, CAD/CAM.

HAO Xing-Wei, born in 1966, Ph. D., professor. His research interests include E-learning, virtual-reality, knowledge management, etc.

LIAN Li, born in 1970, Ph. D. candidate, lecturer. Her research interests include information retrieve, knowledge representation.

JIANG Long, born in 1985, M. S. candidate. His research interests include image processing, pattern recognition.

Background

The study in this paper is based on my researches of Ph.D. dissertation and the project of Shandong Natural & Science Foundation. In video surveillance system, color is one of the most important features for object recognition. However, color is often affected by illumination change, so how to reduce the illumination change has become a very important problem in computer vision. During the study, the authors find Phong illumination model which often be used in computer graphic is a good physical model to simulate the

illumination of single light source. So they begin to study a new method to reduce the non-uniform illumination and specular effects. Compared with most methods which use HSV space or other chromatic spaces to reduce the effects of small illumination change, our method which combined the physical illumination model with the statistics method can not only be robust to the non-uniform lighting and the specular reflection of background surface, but also be applicable for real-time video surveillance system.