

通过重影分析去除玻璃反光

吴耀波

计算机科学技术学院

13300200019@fudan.edu.cn

关键词 重影 玻璃反射 反光 算法

摘要 透过玻璃窗拍摄照片时，往往同时包含期望的场景和影响照片的反射。分离透射和反射层有着重要的审美和实际应用价值，但同时这也是一个不适定问题。来自 MIT 的 YiChang Shih 等人今日发表一项研究，利用反射层的重影这个线索，构建投射层和反射层的不对称性，从而减少问题的不适定。这些线索源于反射场景在玻璃表面的移位双重反射。即使人眼几乎难以察觉的重影，通过该算法仍然可以进行分层。在这项工作中，他们使用了双脉冲卷积核模拟反射的方法，并自动估计反射像的空间分离和相对衰减。核心是通过混合高斯模型来正规化，以达到分离图层的目的。其结果表明，不管是合成的图像还是自然拍摄的图像，他们都能去除大部分的玻璃反射。

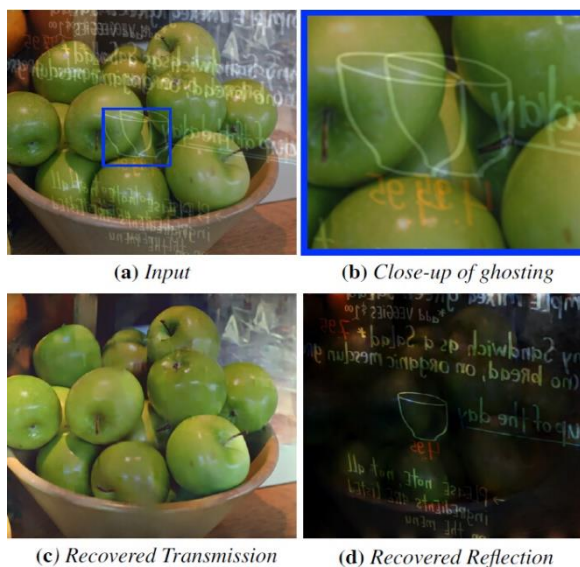


图 1

1. 介绍

透过窗户或玻璃窗拍照时，与相机同侧的场景在玻璃上的反射经常破坏图像。为了尽量减少反射，人们可以尝试改变相机位置，或者使用偏振镜，或者在相机周围围一块暗布，但往往效果不如人意。这就需要一个对照片的后期处理，以消除反射影像。分离透射层 T 和反射层 R 是一个不适定问题，因为 T 和 R 是自然图像，具有相似的特性，而传统的成像模型假设 T 和 R 是两个对称的角色，即最终图像 $I = T + R$ 。

在这项研究中，利用了“重影”效果——在玻璃上的多次反射来解决反射层的去除问题。一块具有一定厚度的薄玻璃板，在内侧（更接近相机）的玻璃面产生第一次反射，在外侧产生第二次反射，第二次是第一次反射的偏移和衰减版本（见图 3 c）。

为了统计重影出现的频率，该团队使用的关键字“玻璃反射的摄影问题”和“镜面反光”进行谷歌图片搜索，分析了返回的图像。去除不相关的结果，比如卡通形象和水中的倒影后，他们得到了 197 随机抽样的图像，并发现有 96 张图像有明显的重影效果（49%）。

重影提供了一个临界线索来分离反射层和透射层，因为它破坏了两层之间的对称性。我们的模型中，把重影看作反射层的 R 与核 k 的卷积。观察到的图像为 I ，透射层为 T ，则可建立

以下模型：

$$I = T + R \otimes k$$

其中，参数核 k 作为双脉冲的内核，以量化初级和次级反射之间的距离和相对强度。而高阶的反射携带很少的能源，可以忽略不计。对于输入图像 I ，我们的目标是恢复核 k 、透射层 T 和反射层 R 。在此之前大多数的工作都是以假设 $I = T + R$ 作为成像模型，这样的话需要非常有效的图像先验，或辅助数据如图像运动或偏振器，或用户输入的拍摄多个图像，这些解决方案有明显的缺点。

在图2中展示了使用重影线索的好处，该团队先生成一个圆圈作为透射层和一个矩形作为反射层，接着展示了正常的图层

分解（a）和另外两个“极端”的分解（全部作为透射（b）和全部作为反射（c））。然后测量在混合高斯模型（GMM）下这分解方案的可能性。直观上，第一种分解方案更为稀疏，因此更贴近“自然”。而在数据上，这种分解在GMM模型下也有着最高的可能性（ 3.26×10^4 ）。对于另外两个极端的分解，分解图层中包括了重影，而且不太稀疏，显然是不自然的，并且数据上它们的可能性也是较低的（ 1.81×10^4 和 1.55×10^4 ）。

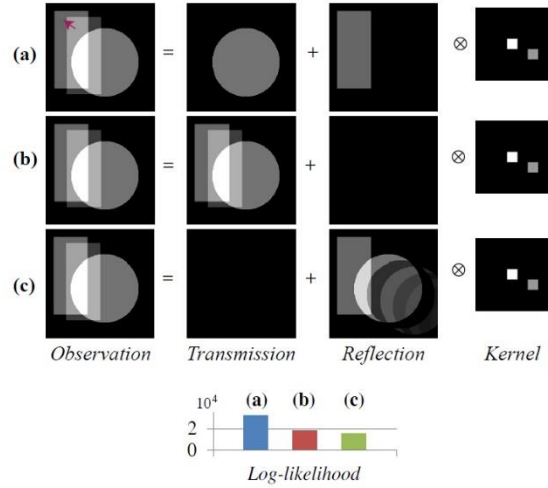


图 2

2.重影形成原理

该团队使用了有 Diamant 和 Schechner 提出的重影形成模型——他们量化了由传输层 T 和反射层 R 所形成的重影。该团队取其一个简化版本，只考虑 R 中的一阶反射，其模型示例于图3。

我们假设被摄对象直接通过玻璃形成透射层 T 。而被反射对象的光线（与相机同侧）先在初次接触玻璃面上发生第一次反射，得到一个原始的反射层，这里用 $R1$ 表示。由于玻璃是半反射的， $R1$ 中只包含入射光一部分，其余光线穿过玻璃介质并在另一侧发生第二次反射。这个特定部分的反射进入到相机里，形成了第二次反射，用 $R2$ 表示。 $R2$ 是 $R1$ 的一个位移和衰减副本，两者的叠最终形成重影反射层的 R ，如图3（b）和图3（c）。

我们再假定 $R1$ 和 $R2$ 之间的空间位移和相对衰减是不变的。根据菲涅耳方程，当反射层不具没有太大的深度变化且相机与玻璃法线之间的夹角不大时，这些假定基本上可以看作是成立。在这个简化模型中，我们忽略这 T 和 R 的高阶内反射（图3中的虚线箭头），因为典型的玻璃其折射率约为1.5，这些高阶反射的能量的不到1%，可以忽略。

在这些假设下，重影卷积核 k 由两个非零值构成：二维空间偏移量 d_k 和相对衰减因子 c_k 。对于图像 X ，给定核 k 得到一个卷积结果 Y ，在像素 i 为：

$$Y_i = X_i + c_k X_{i - d_k}$$

空间偏移 d_k 由几何光学决定，取决于玻璃厚度、玻璃与相机的相对位置、反射的物体以及相机的焦距。衰减因子 c_k 通过菲涅耳方程确定，取决于光线的入射角，反射光线的偏振。

在厚的玻璃上，重影效果更显著，因为图像偏移更大，或者增大相机和玻璃表面法线之间的夹角也可以得到明显的重影。

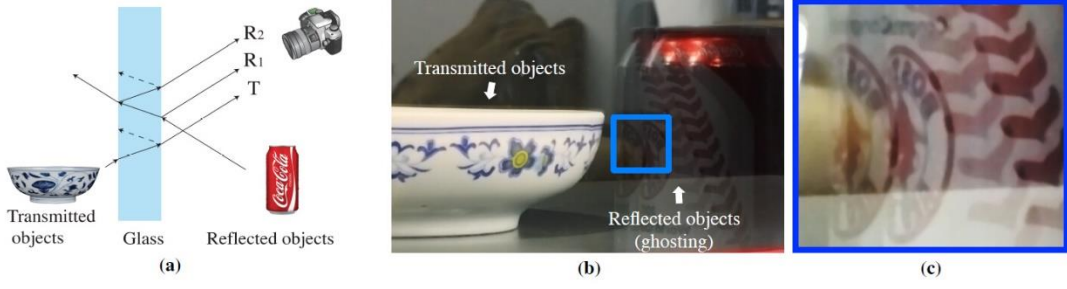


图 3

3. 图层分离算法

当给定透射层 T 、反射层 R 和重影核 k 时，我们所观察到的图像 I 可以表示为：

$$I = T + R \otimes k + n$$

其中 n 是附加的方差为 σ^2 的高斯噪声。我们先估计重影核 k ，然后对于给定的 k ，根据上述形成模型，可导出一个以重建 T 和 R 的数据项（相似度的对数）：

$$L(T, R) = \frac{1}{\sigma^2} \|I - T - R \otimes k\|_2^2$$

然而，对于未知的 T 和 R ，最小化 $L(T, R)$ 是不适定的。需要额外的先验条件去正规化这个推断。

经过一系列基于自然图像统计的尝试，该团队发现性能表现最佳的是最近提出的基于混合高斯模型（GMM）的单个方块先验方法。该先验方法在 8×8 的像素区域内捕获协方差结构和像素依赖性，从而构建出简单的基于梯度的过滤器，其中假定各像素的过滤响应有良好的独立性。根据该方法，我们的调整目标是最小化以下成本：

$$-\sum_i \log(GMM(P_i T)) - \sum_i \log(GMM(P_i R))$$

其中， $GMM(P_i X) = \sum_{j=1}^K \pi_j \mathcal{N}(\overline{P_i X}; 0, \Sigma_j)$ 。该成本统计了所有在 T 中的 $P_i T$ 和在 R 中的 $P_i R$ 重叠方块， P_i 是从 T 或 R 中提取的第 i 个方块的线性算子。我们使用预训练的零均值混合高斯模型模型，混合物组分为 200，方块尺寸为 8×8 。混合权重由 $\{\pi_j\}$ 给定，协方差矩阵由 $\{\Sigma_j\}$ 给定。本段的公式中， \mathcal{N} 是一个零均值的 64 维高斯分布， $\overline{P_i X}$ 是均值移除的方块 $P_i X$ 。

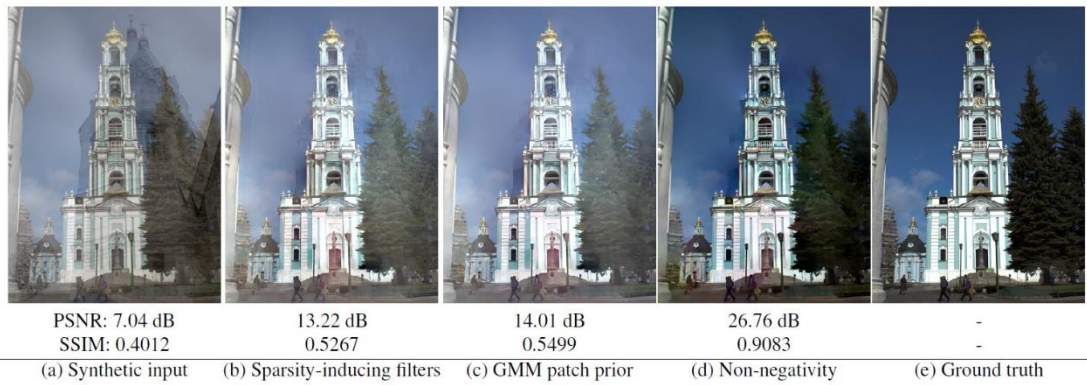


图 4

联合机上述两式，包括用于 T 和 R 的各像素的非负约束，我们得到最终的以重构 T 和 R 的成本函数：

$$\min_{T, R} \quad \frac{1}{\sigma^2} \|I - T - R \otimes k\|_2^2 - \sum_i \log(GMM(P_i T)) - \sum_i \log(GMM(P_i R))$$

$$, s. t. 0 \leq T, R \leq 1$$

对 T 和 R 的非负约束是在低频率的正规化中非常有用，这与在较高频率更为有用的 GMM 恰好互补。

图 4 (b) 和 4 (c) 表示该 GMM 在图层分离和去相关性能上明显优于稀疏诱导的滤波器。在图 4 (b)，可以看到 GMM 方法趋向于选取较长的边作为 T 和 R 的分界。

4. 估算 k

在这里解释一下重影卷积核 k ，它由空间移位向量 d_k 的和衰减因子 c_k 估计。我们先通过 I 的二维自相关图 $\nabla^2 I$ (I 的拉普拉斯变换) 来估计 d_k 的值。图 5 中显示了重影图像与 I 的二维自相关图在一定范围的空间变化。反射层的移位副本在自相关图上的 d_k 位置存在极大值。我们在每 5×5 相邻的方块中寻找极大值以检测 d_k 。为了保守估计，丢弃那些由于局部平坦或重复结构所造成的极大值。最后，选择剩余的局部最大值中最大的一个作为重影距离 d_k 。

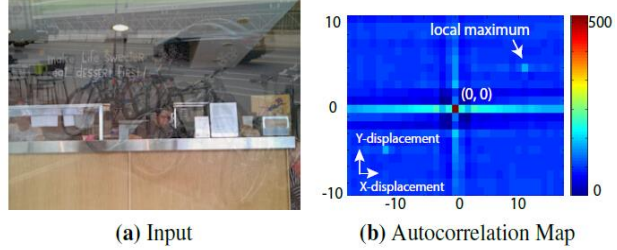


图 5

衰减因子 c_k 通过 d_k 来估计。我们首先通过 Harris 角度检测算法检测了一系列的点，我们发现一个局部方块的梯度由 $R1$ 或 $R2$ 或 T 的梯度主导。我们提取 5×5 的对比度归一化后的，且空间偏移为 d_k 的有较强相关性的方块，假设边缘是由于或者反射层 $R1$ 或 $R2$ 。接着，我们就可以估计每一对匹配的方块的相对衰减比率 $a_{ij} = \sqrt{\frac{\text{var}[p_i]}{\text{var}[p_j]}}$ ，其中 $\text{var}[p_i]$ 是方块 p_i 中像素的方差，且选择合适的顺序 (i, j) 使得 $a_{ij} < 1$ 。最后，我们统计所得数据以估计 c_k ：

$$c_k = \frac{1}{Z} \sum_{ij} w_{ij} a_{ij}$$

其中 $Z = \sum_{ij} w_{ij}$ 是归一化因子， $w_{ij} = e^{-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{2\theta^2}}$ ， $\theta = 0.2$ 。

实验证明，上述估算 k 的方法是有效的，具有很强的鲁棒性，但在具有较多全局的重复纹理的图像上会失败。

5. 结果

该团队通过合成图像和真实图像评估了该算法，证明重影线索的确对恢复透射层和反射层有帮助。同时该算法有很大的潜在应用空间，例如在恢复图像方面和能自动消除重影的摄影产品。

首先，他们从 MIT 的 Adobe FiveK 数据库中选取样本测试合成数据。他们随即选取 40 个样本作为 T 或 R ，得到 20 个输入，衰减系数 c_k 范围从 0.5 到 1.0，相对位移 d_k 范围从 4 像素到 40 像素。平均来说，他们的方法能实现相对于透射对象 0.84 的相似度以及 23.2dB 的信噪比。具体可见图 4。

图 1 和图 6 展示的是对真实世界图像输

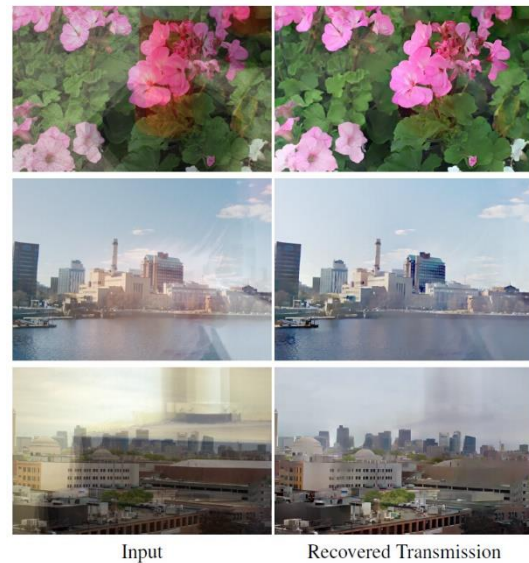


图 6

入去除反射层的结果。所有图像摄于距玻璃 0.3 到 1 米内，相机与玻璃表面法线的夹角在 10 至 35 度之间，玻璃厚度为 4 至 12 毫米。在图 1 中，可以看出水果和文本均被很好地分离开。

参考文献

Reflection Removal using Ghosting Cues. 2015, YiChang Shih, Dilip Krishnan, Fredo Durand, Willam T.Freeman