对比度增强去雾

2023年2月23日 14:26

一/ 雾生成模型（雾退化模型）

$$I(x) = J(x) \cdot e^{-rd(x)} + A(1-e^{-rd(x)}) \quad (1)$$

x是图像像素的空间坐标，I是观察到的有雾图像，J是待恢复的无雾图像，
r表示大气散射系数，d代表景物深度，
A是全局大气光，通常情况下假设为全局常量，与空间坐标x无关

根据 $I(x)$，求解 $J(x)$ $\Longleftrightarrow$ 去雾.

$I(x)$ 已知，$e^{-r \cdot d(x)}$ 为 x处透射率 $t(x)$ 未知，A 未知但取定值

故(1) $\Longrightarrow$ $I(x) = J(x) \cdot t(x) + A \cdot (1 - t(x))$ (2)

应为定值

$\Downarrow$

$$t(x) = \frac{A - I(x)}{A - J(x)} \quad (3)$$

$t(x) \in [0,1]$，$I(x), J(x) \in [0,255]$

去雾要求 $\boxed{\text{对比度高}}$，$\boxed{\text{显失真度小}}$

二/ 大气光A估计的策略（四叉树递归）

传统：雾 → 图像变灰 → 灰度值高（往白偏，往255偏）

$\Longrightarrow$ 取全图灰度最高的点当 A.

× 有些无雾条件本身灰度值高的点会干扰 A取值

本文：雾霾区域内图像像素差异小

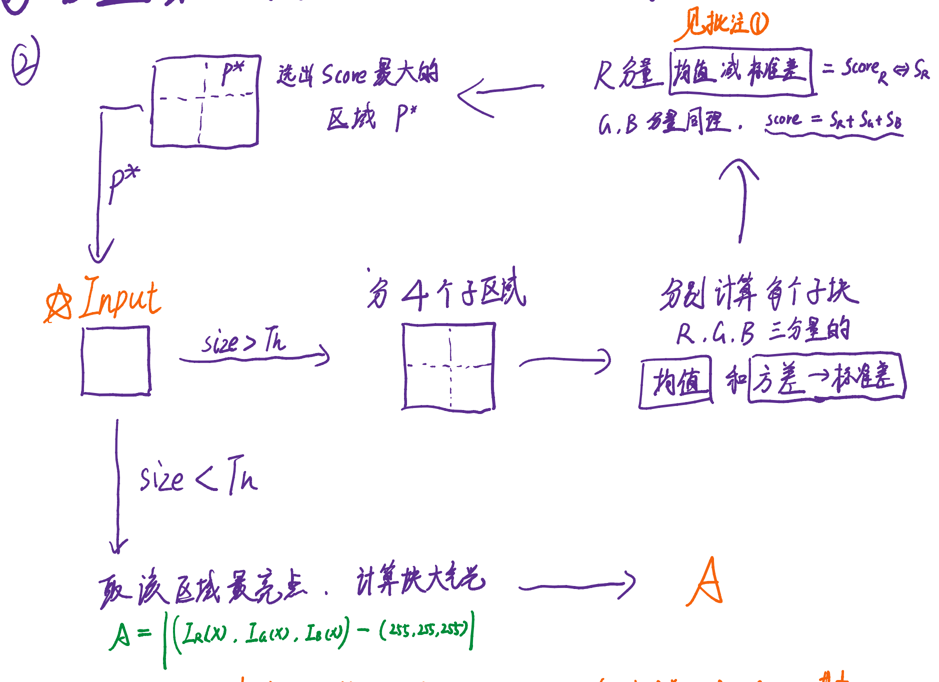
$\Downarrow$

区域像素方差值小

✓ 排除高亮点但有细节的区域，不会过补偿该区域

方法：① 设置最小搜索区域大小的阈值 Th

②



批注①：可以理解为 Score 为加权和得分，即 均值/权1 + (−标准差/权2) = Score，其中
权1为平均灰度值，越大越有可能是大气光的像素位置，故取正（加）
权2为标准差（方差），越小说明区域像素值变化越小，越可能是雾区域，故取负（减）

三/ 透射率 t(x) 估计的策略

变换 (2) 式 $I(x) = J(x) \cdot t(x) + A(1 - t(x))$

$$J(x) = \frac{I(x) - A(1 - t(x))}{t(x)}$$

$$\Rightarrow J(x) = \frac{1}{t(x)}\left[I(x) - A\right] + A \qquad (4)$$

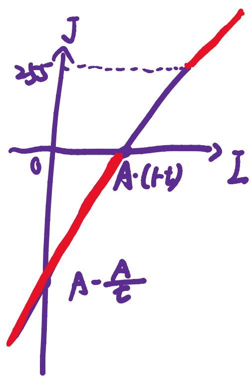
$$= \frac{1}{t(x)} \cdot I(x) - \frac{A}{t(x)} + A \qquad (5)$$

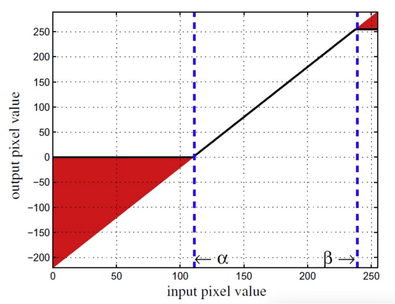
可见 $J(x)$ 与 $I(x)$ 是线性关系

斜率 $k = \frac{1}{t(x)} \geq 1$

与 x 轴交 $(A \cdot [1 - t(x)], 0)$

与 y 轴交 $(0, A - \frac{A}{t(x)})$





如右图，I在$[0, A(1-t)]$时，J会推理出负值（会被舍）

当A较大且t较小时，J会推理出超过255的值

使生成的J图失真（丢失信息），$A\in[0,255]$，$t\in[0,1]$

本文：设计一个代价函数cost，由对比度和失真度共同构成
contrast loss

① 衡量失真度：（单点）

$$E_{loss} = \sum_{c\in(r,g,b)} \left[\min(0, J_c(x))\right]^2 + \left[\max(0, J_c(x)-255)\right]^2$$

其中，c代表rgb通道的index，$\sum_c$即对rgb三通道都算一遍再求和

② 衡量对比度增强：（单点）

文中指出3种（MSE，Michelson，Weber）

但最后选用了MSE，

$$E_{contrast} = -\sum_{c\in(r,g,b)} \frac{(J_c(x)-\bar{J}_c)^2}{N_{all}}$$

$$= -\sum_{c\in(r,g,b)} \frac{(I_c(x)-\bar{I}_c)^2}{t^2 \cdot N_{all}}$$

其中，N_{all}指区域内的像素点总数，该式取负

由于 $J(x) = \frac{1}{t(x)} \cdot I(x) - \frac{A}{t(x)} + A \Leftarrow (5)$式

理论上求J(x)，应该算每个点的t(x)，但这样效率太低

故用x点附近的区域B内的优解代替B内所有x对应的t(x)

即 $\underset{x\in B}{t}(x) = t_B$，$t_B$由代价函数E来确认

$\Downarrow$

③ 计算一个区域B的代价，则将区域的每个像素的 E_{loss} 和 $E_{contrast}$ 求和，即 $\sum_{x\in B} E_{loss} = E_{Bloss}$

$\sum_{x\in B} E_{contrast} = E_{Bcontrast}$

$$\text{而}\quad E_{Bloss} = \sum_{c\in(r,g,b)}\sum_{x\in B}\left\{\left[\min\{0, J_c(x)\}\right]^2 + \left[\max\{0, J_c(x)-255\}\right]^2\right\}$$

$$= \sum_{c\in(r,g,b)}\left\{\sum_{I_c=0}^{\alpha_c}\left(\frac{I_c-A_c}{t}+A_c\right)^2\cdot h_c(I_c) + \sum_{I_c=\beta_c}^{255}\left(\frac{I_c-A_c}{t}+A_c-255\right)^2\cdot h_c(I_c)\right\} \qquad (6)$$

其中，α，β 如图，

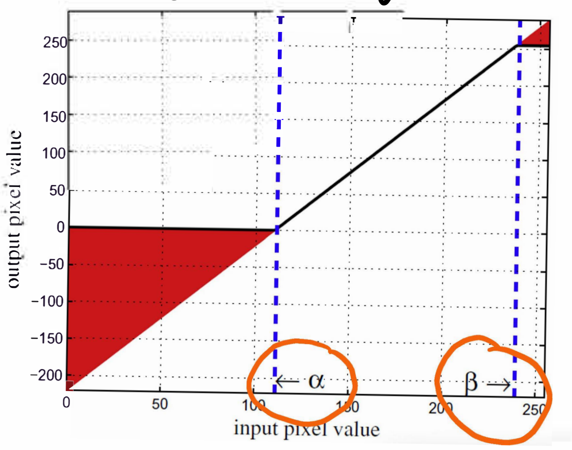
参考(5)式，即 $I\in[\alpha,\beta]$ 时，

J 的取值在 $[0,255]$，不会溢出

所以 E_{Bloss} 计算 $I\in(0,\alpha),(\beta,255)$ 时的损失

$h_c(I)$ 为当前通道内 I 的直方图值

$J(x)$ - $I(x)$ 线性↓



$$E_{Bcontrast} = -\sum_{c\in(r,g,b)}\sum_{x\in B}\left\{\frac{\left(J_c(x)-\bar{J}_c\right)^2}{N_B}\right\}$$

$$= -\sum_{c\in(r,g,b)}\sum_{x\in B}\left\{\frac{\left(I_c(x)-\bar{I}_c\right)^2}{t^2 N_B}\right\} \qquad (7)$$

☆ $E = E_{Bcontrast} + \lambda E_{Bloss}$ (8)

其中，λ 为权重因子，平衡失真和对比度代价

由于有 $\begin{cases} \min\limits_{c\in(r,g,b)}\min\limits_{x\in B} J_c(x) \geq 0 \\ \max\limits_{c\in(r,g,b)}\max\limits_{x\in B} J_c(x) \leq 255 \end{cases}$ ⇐ J 的值域

加上(3)式 $t_c(x)=\dfrac{A_c-I_c(x)}{A_c-J_c(x)}$

$$\Rightarrow \begin{cases} t \geq \min\limits_{c\in(r,g,b)} \min\limits_{x\in B}\left\{\dfrac{A_c-I_c(x)}{A_c}\right\} \\ t \geq \max\limits_{c\in(r,g,b)} \max\limits_{x\in B}\left\{\dfrac{A_c-I_c(x)}{A_c-255}\right\} \end{cases}, \quad A_c\in[0,255]$$

$$\Rightarrow t \geq \max\left\{ \min\limits_{c\in(r,g,b)} \min\limits_{x\in B}\left\{\dfrac{A_c-I_c(x)}{A_c}\right\}, \max\limits_{c\in(r,g,b)} \max\limits_{x\in B}\left\{\dfrac{A_c-I_c(x)}{A_c-255}\right\}\right\}$$

(7)式可知 $E_{B\,contrast}$ 是关于 t 的增函数，

所以 t 取等号(最小)，$E_{B\,Contrast}$ 最小，即 t 的下界取值 t^*

$$t^* = \max\left\{ \min\limits_{c\in(r,g,b)} \min\limits_{x\in B}\left\{\dfrac{A_c-I_c(x)}{A_c}\right\}, \max\limits_{c\in(r,g,b)} \max\limits_{x\in B}\left\{\dfrac{A_c-I_c(x)}{A_c-255}\right\}\right\}$$

而根据(6)式，$E_{B\,loss}$ 是关于 t 的减函数

故 t 越大，$E_{B\,loss}$ 越小

而 t 越小，$E_{B\,contrast}$ 越小

冲突！

则用 λ 权重来取舍，希望损失少 or 对比度高

当 λ 固定时，从 $t\in(t^*,1)$ 中找让 E 最小的 t_B

t_B 即所求 B 区域透射率，取代 $x\in B$ 内的 $t(x)$

四/ 透射率 t(x) 估计策略的优化 ?

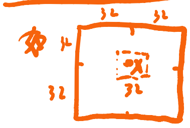
由于上述"以块代点"的 t_B 策略中，块内可能正好有较大的景深 d 值变化

导致 $t_B = t(x) = e^{-r\cdot d(x)}$ 中，当 t_B 确定，不同 x 的 d 表示有误

无法正确估计景深，导致块效应

故，以 x 位置为基础，块大小不变（如 32×32 pixel）

在包含 x 点的所有块区域内找一个像素方差最小（差异最小）的块



，视觉上就是围绕 x 点窗口移动

此外，使用导向滤波对 t 进行优化

$$\hat{t}(q) = S^T \cdot I(q) + \varphi \quad , q \in W$$

即假定过滤后的 $\hat{t}$ 是引导图 I 的仿射组合（线性）

$S^T = (S_r, S_g, S_b)^T$ ，是一个缩放向量(vector)

φ 是一个偏移量，q 是窗口 W 内的点

S^T, φ 都由选定的窗口决定：对于每个窗口 W，有最佳参数组 (S^*, φ^*)

通过 t_W 和 $\hat{t}_W$ 的差值最小化确定 (S^*, φ^*)

使用最小二乘法：$(S^*, \varphi^*) = \arg\min_t (S,\varphi) \sum_{q\in W} \left(t(q) - \hat{t}(q)\right)^2$

$\arg\min_t F(S,\varphi)$ 指当 $F(S,\varphi)$ 取最小时 S,φ 的值

即 $\sum_{q\in W}\left(t(q)-\hat{t}(q)\right)^2$ 最小时，取 S^*, φ^* 计算 $\hat{t}(q)$

五/ 视频去雾

图像去雾直接运用到视频单帧上，不具备时间相关性

为了减少复杂度，从 RGB → YUV，再仅对 Y 分量计算 t 透射率

U, V 不能用，因为对灰度不敏感，会破坏算法对雾的判断

假设一个场景点的原始辐射值在两帧间无变化

有 $J_Y^{k+1}(p) = J_Y^k(p)$

其中，J 为原图像辐射值，Y 为通道，k 为帧

可以假设整个视频中大气光 A 不变（也可以重新计算）

由于 $t_k(p) = \frac{I_Y^k(p) - A_Y}{J_Y^k(p) - A_Y} = t_{k-1}(p) = \frac{I_Y^{k-1}(p) - A_Y}{J_Y^{k-1}(p) - A_Y}$

则透射率有： $t_k(p) = \gamma_k(p) \cdot t_{k-1}(p)$

而 $\gamma_k(p) = \frac{I_Y^k(p) - A_Y}{I_Y^{k-1}(p) - A_Y}$

但这只是两帧同一位置的测算，而场景点会移动，
理论上要跟踪p点的移动才好计算，但太复杂！

给出一个概率模型用于快速计算 t_k

根据两帧的差异图像，有以下：

$w_k(p) = \exp\left(-\frac{[I_Y^k(p) - I_Y^{k-1}(p)]^2}{\sigma^2}\right)$，其中exp是以e为底的指数函数

σ用来控制衰减速的数量级， I^k和I^{k-1}越相似，$w_k(p)$越大

w_k为概率权重，即两帧越相似，该值越大

给 $\gamma_k(p)$ 计算乘以 $w_k(p)$ 权重，即 $\bar{\gamma}_k(p) = \gamma_k(p) \cdot w_k(p)$

根据 $t_k = \gamma_k \cdot t_{k-1}$ 的一致性假设，代入概率加权的 $\bar{\gamma}_k$

t_k与 $\bar{\gamma}_k \cdot t_{k-1}$ 的差异越小，时间一致性越高

但两帧变化较大时， $w_k(p)$的值过小，导致 $\bar{\gamma}_k$不准确，

所以用Block内的平均权重 $\bar{w}_k$ 代替 $w_k(p)$ 会更稳定

$\bar{w}_k = \frac{1}{N_B} \cdot \sum_{p \in B} w_k(p)$， N_B为Block内像素数

此时构建时间一致性代价函数

$$E_{temporal} = \bar{w}_k \cdot (t_k - \bar{\gamma}_k \cdot t_{k-1})^2$$

参考图像找 t_k 的代价函数，

$$E_V = E_{contrast} + \lambda_L \cdot E_{loss} + \lambda_T \cdot E_{temporal}$$

可以先用 $E_I = E_{contrast} + \lambda E_{loss}$ 找第1帧的t(1)，t(2)，t(3)用E_V去找。