

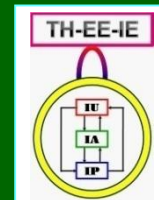
图象工程（上）

图 象 处 理

（第4版）

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京

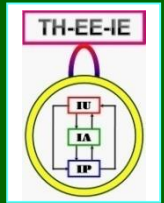


第2单元 图象恢复

- 第5章 图象消噪和恢复
- 第6章 图象校正和修补
- 第7章 图象去雾
- 第8章 图象投影重建

图象恢复认为图象（质量）在某种情况/条件下退化或恶化了，现在需要根据相应的退化模型和知识重建或恢复原始的图象

即将图象退化的过程模型化，并根据确定的图象退化模型对原始图象进行复原

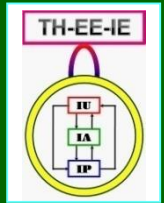


第7章 图象去雾

图象在采集时，会受到各种环境因素的影响而发生质量退化

雾霾会使大气的能见度下降，导致户外拍摄的图象质量变差，如清晰度降低、画面模糊、颜色偏移失真、景物难以辨别等。

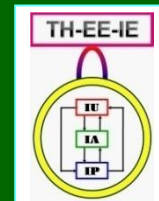
图象去雾技术就是要提升图象的质量，如增加对比度、减少模糊，改善图象的视觉效果，并去除或降低雾霾对图象质量的退化影响，以有效地获取图象中的信息



第7章 图象去雾

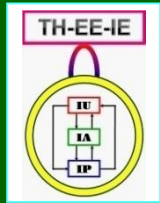
- 1、 图象去雾方法根据其作用机理可分为两大类：
 - 基于图象增强的方法
 - 基于图象恢复的方法
- 2、 在基于图象恢复的方法中，常用的是基于大气散射模型去雾的方法。它们又可分为两大类：
 - 多幅图象去雾的方法
 - 单幅图象去雾的方法

本章：基于单幅图象和大气散射模型恢复



第7章 图象去雾

- 7.1 暗通道先验去雾算法及改进
- 7.2 改善失真的综合算法
- 7.3 去雾效果评价



7.1 暗通道先验去雾算法及改进

7.1.1 基本方法

7.1.2 尺度自适应

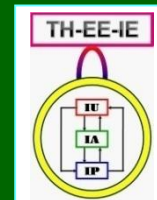
7.1.3 透射率估计

7.1.4 大气光区域确定

7.1.5 大气光值校正

7.1.6 浓雾图象去雾

改进



7.1.1 基本方法

1. 大气散射模型

$$I(\mathbf{x}) = I_{\infty} r(\mathbf{x}) e^{-kd(\mathbf{x})} + I_{\infty} (1 - e^{-kd(\mathbf{x})})$$

\mathbf{x} 表示空间位置 ($\mathbf{x} = [x \ y]^T$)

$I(\mathbf{x})$ 代表雾霾图象

I_{∞} 表示无穷远处的天空辐射强度

$r(\mathbf{x})$ 代表反射率

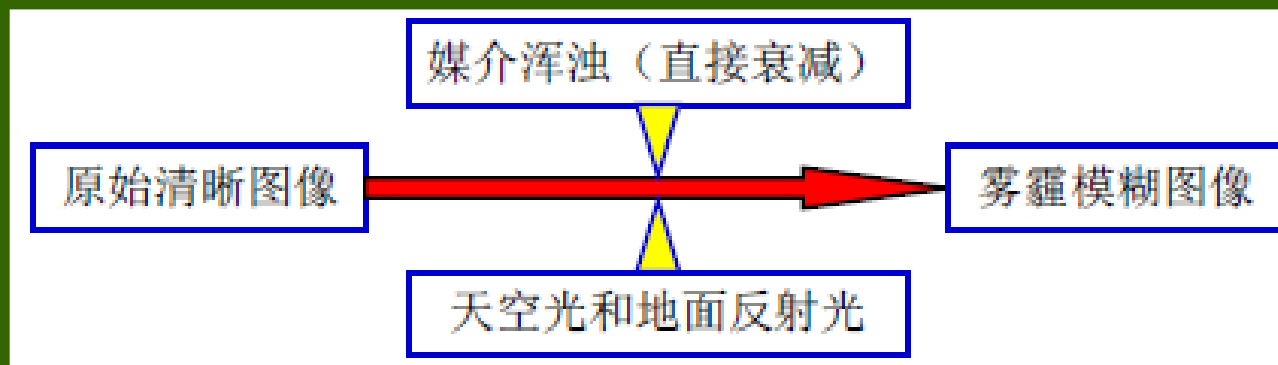
$e^{-kd(\mathbf{x})}$ 代表大气透射率

k 表示散射系数 (雾浓度影响系数)

$d(\mathbf{x})$ 代表 \mathbf{x} 处的场景深度 (景深)

7.1.1 基本方法

雾霾图像退化模型

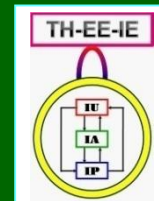


大气散射模型

$$I(\mathbf{x}) = J(\mathbf{x})t(\mathbf{x}) + A[1 - t(\mathbf{x})]$$

$J(\mathbf{x})$ 代表无雾图像/对应场景辐射； A 代表整体环境光，简称大气光/天空光； $t(\mathbf{x})$ 为大气透射率

$$t(\mathbf{x}) = e^{-kd(\mathbf{x})}, \quad 0 \leq t(\mathbf{x}) \leq 1$$



7.1.1 基本方法

2. 暗通道先验

局部区域 一个颜色通道 亮度值很低

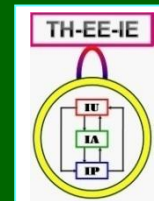
$$J_{\text{dark}}(\mathbf{x}) = \min_{y \in N(\mathbf{x})} \left[\min_{C \in \{R, G, B\}} J_C(y) \right] \rightarrow 0$$

代入大气散射模型

$$\min_{y \in N(\mathbf{x})} \left[\min_{C \in \{R, G, B\}} \frac{I_C(y)}{A_C} \right] = [1 - t^N(\mathbf{x})] + \min_{y \in N(\mathbf{x})} \left[\min_{C \in \{R, G, B\}} \frac{J_C(y)}{A_C} \right] t^N(\mathbf{x})$$

如果大气光值A为已知常量，取 $J_C(y) = 0$

$$t^N(\mathbf{x}) = 1 - \min_{y \in N(\mathbf{x})} \left[\min_{C \in \{R, G, B\}} \frac{I_C(y)}{A_C} \right]$$



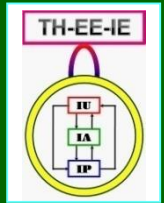
7.1.1 基本方法

3. 基本方法的不足

? 选取暗通道图里最亮的前0.1%个像素所对应的原图中最亮的点作为大气光的估计点（即 A 的值为最亮的前0.1%个像素灰度的平均值）。但这种方式并不能保证选出真正的最亮点，尤其是当场景中有灯光等出现时常会受到干扰

? 直接将式(7.1.7)代入式(7.1.2)进行反演去雾，去雾图象会出现明显的光晕效应，影响图象的分辨率和信噪比

? 假设大气透射率在局部窗口内为常量，但当窗口跨越景深边界时，也会产生“光晕”现象。如将图象按景深进行分块，并假设每个块内景深不变来求解透射率会产生块效应，后续还须对透射率进行优化调整

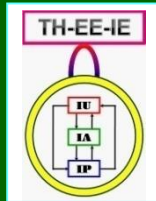


7.1.2 尺度自适应

仅使用单尺度（固定 r ）不能同时兼顾好的色彩复原效果和小的“光晕”失真效果

需采用尺度自适应的方法，以根据图象的颜色及边缘特征来得到像素级的暗通道求解尺度

- 在亮度较低或饱和度较高的区域，采用较小尺度；在亮度较高且饱和度较低的区域，采用较大尺度
- 在景深突变处，采用较小尺度；在平滑区域，采用较大尺度



7.1.2 尺度自适应

1. 由颜色特征求解初始尺度

(1) 雾霾图像的彩色通道最小值 $\text{Dark}_C(\mathbf{x})$:

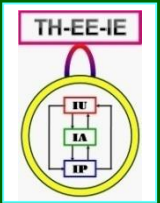
$$\text{Dark}_C(\mathbf{x}) = \min_{C \in \{R, G, B\}} [I_C(\mathbf{x})]$$

(2) 雾霾图像中最小值处的亮度分量 $I_{\text{int}}(\mathbf{x})$:

$$I_{\text{int}}(\mathbf{x}) = \frac{I_R(\mathbf{x}) + I_G(\mathbf{x}) + I_B(\mathbf{x})}{3}$$

(3) 雾霾图像中最小值处的饱和度分量 $I_{\text{sat}}(\mathbf{x})$:

$$I_{\text{sat}}(\mathbf{x}) = 1 - \frac{\text{Dark}_C(\mathbf{x})}{I_{\text{int}}(\mathbf{x})}$$



7.1.2 尺度自适应

1. 由颜色特征求解初始尺度

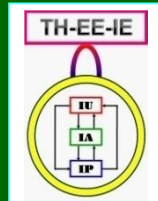
对天空区域无需特殊处理，可将其视作亮度较高且饱和度较低的区域，采用较大的尺度来求解暗通道

根据雾霾图象中最小值处的颜色特征可以得到像素级的初始尺度 $r_0(\mathbf{x})$

尺度与通道最小值是正相关的 {P.152}

$r_0(\mathbf{x}) = k \times \text{Dark}_C(\mathbf{x})$ （像素级的初始尺度）

$$r_0(\mathbf{x}) = \max\{1, \text{round}[k \cdot \text{Dark}_C(\mathbf{x})]\}$$



7.1.2 尺度自适应

2. 由边缘特征对尺度进行修正 P.153

(1) 边缘检测：得到二值化边缘图 I_{canny}

(2) 前景分离：得到图象的前景区域

(3) 获取初始尺度： $r_s(\mathbf{x}) = I_{\text{close}}(\mathbf{x})r_0(\mathbf{x})$

(4) 利用边缘特征对尺度进行修正：使求解窗口 $N_r(\mathbf{x})$ 不跨越景深边界，减小“光晕”现象出现

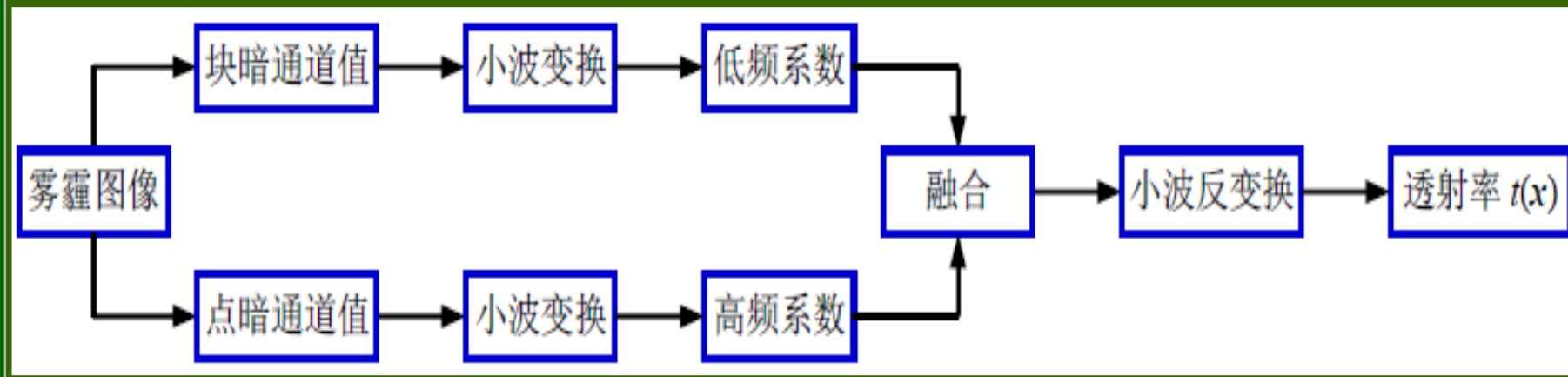
暗通道：
$$\text{Dark}_C(\mathbf{x}) = \min_{y \in N_r(\mathbf{x})} \left[\min_{c \in \{R, G, B\}} I_C(y) \right]$$

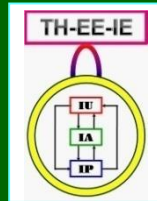
7.1.3 透射率估计

1. 融合暗通道值估计透射率

实际图象中块内的透射率并不总是恒定不变

(较大) 块的暗通道信息的低频部分接近真实透射率的低频部分, 而 (较小) 块的暗通道信息的高频部分接近真实透射率的高频部分





7.1.3 透射率估计

2. 基于局部自适应维纳滤波细化透射率

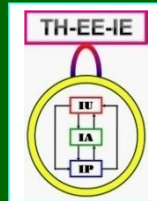
对块和点暗通道值的融合会不可避免地引入一些错误的细节信息

融合后得到的暗通道值 $J_d(\mathbf{x})$ 可看做是大气光 $g(\mathbf{x}) = A[1-t(\mathbf{x})]$ 和错误细节信息 $n(\mathbf{x})$ 之和:

$$J_d(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x}) + n(\mathbf{x})$$

估计采样窗口 $N_r(\mathbf{x})$ 内的 $g(\mathbf{x})$, 设为 $g^E(\mathbf{x})$:

$$g^E(\mathbf{x}) = \mu_g(\mathbf{x}) + \frac{\sigma_g^2(\mathbf{x})}{\sigma_g^2(\mathbf{x}) + \sigma_n^2} [J_d(\mathbf{x}) - \mu_d(\mathbf{x})]$$



7.1.3 透射率估计

2. 基于局部自适应维纳滤波细化透射率

$J_d(\mathbf{x})$ 在采样窗口内的方差 $\sigma_d^2(\mathbf{x})$ 为两部分之和

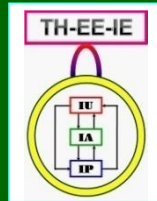
$$\sigma_d^2(\mathbf{x}) = \sigma_g^2(\mathbf{x}) + \sigma_n^2$$

用暗通道值方差的全局平均估计细节方差

$$(\sigma_n^2)^E = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} \sigma_d^2(\mathbf{x})$$

大气透射率为

$$t(\mathbf{x}) = 1 - k \frac{g^E(\mathbf{x})}{A}$$



7.1.4 大气光区域确定

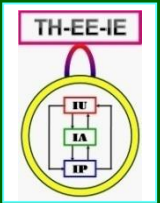
1. 根据物理意义确定大气光估计点

- (1) 大气光为环境光，应该具有较高的亮度
- (2) 对大气光的估计点应落入背景区域

约束 $\begin{cases} \text{Mask}_1 = (I_{\text{int}} \geq I_{\text{th}}) \\ \text{Mask}_2 = (I_{\text{close}} = 0) \end{cases}$ 原图象亮度分量
闭运算操作填充背景

暗通道图 $\text{Dark}_C(\mathbf{x})$ 滤波后得到的非零点即是最有可能成为对大气光估计的点

$$\text{Dark}_{Cp}(\mathbf{x}) = \text{Mask}_1(\mathbf{x})\text{Mask}_2(\mathbf{x})\text{Dark}_C(\mathbf{x})$$



7.1.4 大气光区域确定

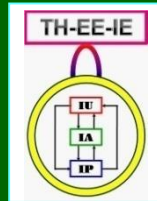
2. 借助四叉树计算浓雾区域

在雾浓度越高的区域，像素值越高，且像素之间的差异越小，而均值与标准差的差值越大

$$S(i) = |M(i) - C(i)|$$

$M(i)$ 和 $C(i)$ 分别为该区域的均值和标准差

借助对图象表达的四叉树结构，可先将图象递归式地划分成4个相同大小的矩形区域，分别计算4个区域的差值 $S(i)$ ， $i = 1, 2, 3, 4$ 。重复该过程直到选取出雾浓度最高的区域 $R(x)$ 以估计A



7.1.5 大气光值校正

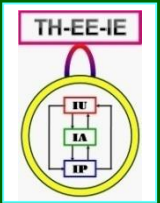
1. 大气光值加权校正

将 $R(x)$ 中所有的像素点分为2个区域：所有灰度值大于均值的点属于亮区，所有灰度值小于均值的点属于暗区

设亮区和暗区的像素点个数分别为 N_b 和 N_d ，分别计算亮区和暗区中暗通道值的最大值 M_b 和 M_d

$$A = W_b R(y) + W_d R(z)$$

$W_b = N_b / S_R$, $W_d = N_d / S_R$, 且满足 $W_b + W_d = 1$
 S_R 为 $R(x)$ 的尺寸 (即 $N_b + N_d$)

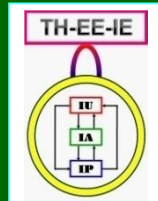


7.1.5 大气光值校正

1. 大气光值加权校正

M_b 和 M_d 分别在点 $R(y)$ 和 $R(z)$ 处取得， $R(y)$ 和 $R(z)$ 在估计大气光值 A 时共同发挥作用，具体步骤

- (1) 分别计算4个区域的差值 $S(i)$
- (2) 选取差值最大的区域，重复步骤(1)，直到满足预先设定的阈值，获得雾浓度最高区域 $R(x)$
- (3) 将区域 $R(x)$ 内的像素点分为暗区和亮区，分别获取两个区域内暗原色的最大值；
- (4) 确定两个最大值在图象中的位置，加权



7.1.5 大气光值校正

2. 大气光颜色值校正

蓝天是由于大气散射对波长的选择性而形成的，并非大气光本来的颜色

一种修正大气光颜色的方法是减小饱和度

- (1) 求得 A 的估计值在HSI空间的3个分量：色调 A_H 、饱和度 A_S 和亮度 A_I
- (2) 设置饱和度阈值 S_{th} （较小但维持色彩氛围）

$$S_{th} = \min \{ \text{Gaussian}(x) \otimes I_{sat}(x) \}$$

- (3) 保持 A_H 和 A_I 不变，更新 A_S

7.1.6 浓雾图象去雾

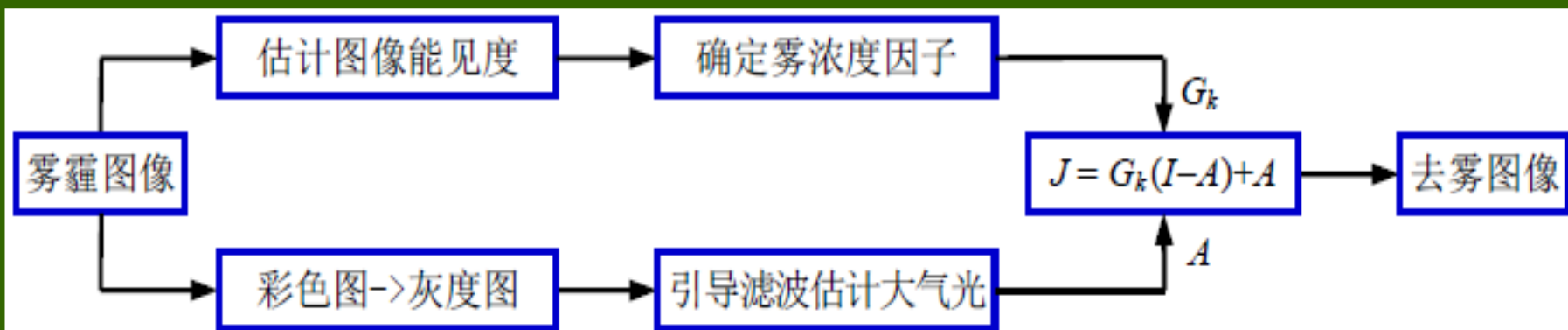
1. 算法流程

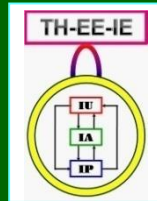
浓雾条件下场景深度变化微小，用 G_k 代替 $e^{kd(x)}$

建立能见度与雾浓度因子联系

雾浓度因子

$$J(\mathbf{x}) = G_k(I(\mathbf{x}) - A) + A$$





7.1.6 浓雾图象去雾

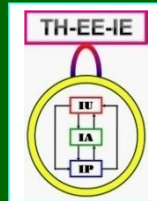
2. 雾浓度因子估计

大气能见度指具有正常视力的人在当时的天气条件下能够看清楚目标轮廓的最大距离

能见度大表示雾浓度小，反之表示雾浓度大

在能见度 L 对应不同的范围内给定雾浓度因子 G_k 不同的取值范围：

$$G_k = \begin{cases} G_k = 8 & L < 50 \\ 1 \leq G_k \leq 8 & 50 \leq L \leq 1000 \\ G_k = 1 & L > 1000 \end{cases}$$



7.1.6 浓雾图象去雾

2. 雾浓度因子估计

大气能见度 L 和大气消光系数 e 有如下关系：

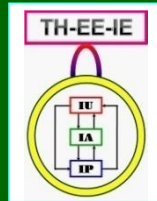
$$L \equiv -\frac{\ln T}{e}$$

T 为人的视觉对比阈值

浓雾条件下： $T = 0.05$ ，所以： $L = 2.99/e$

根据散射理论，大气消光系数 e 与消光效率因子 Q_e （ $=2$ ）、雾粒子浓度 n 、雾粒子半径 r 之间存在如下关系：

$$e = \pi n r^2 Q_e$$



7.1.6 浓雾图象去雾

2. 雾浓度因子估计

大气消光系数 e 与雾粒子浓度 n 、雾粒子半径 r 都是正相关的:

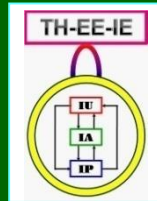
$$G_L = G_a n_a r_a^2$$

能见度与大气消光系数成反比

能见度 L 时的雾浓度因子 G_L 为:

$$G_L = \frac{2.99 G_a}{2\pi L}$$

系数 G_a 对给定的尺度特征 a 是常数



7.1.6 浓雾图象去雾

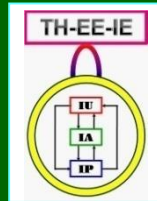
2. 雾浓度因子估计

以能见度在1000 m以内作为有雾天气

$$G_L = \frac{1000G_{1000}}{L}$$

雾浓度因子 G_k 与能见度 L 的关系式:

$$G_k = \begin{cases} 8 & L < 50 \\ 0.36 \times 1000 / L + 0.64 & 50 \leq L \leq 1000 \\ 1 & L > 1000 \end{cases}$$



7.1.6 浓雾图象去雾

3. 基于引导滤波的大气光估计

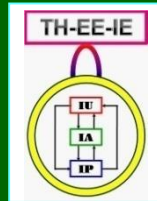
记输入图象为 P ，引导图象为 I ，滤波输出图象为 Q ，则在第 k 个半径为 r 的方形窗口 W_k 中

$$Q_i = a_k I_i + b_k \quad \forall i \in W_k$$

使得输出的图象 Q 与输入的图象 P 之间的差异最小的代价函数 $E(a_k, b_k)$ 满足：

$$E(a_k, b_k) = \min \sum_{i \in W_k} [(Q_i - P_i)^2 - \varepsilon a_k^2]$$

最小二乘法



7.1.6 浓雾图象去雾

3. 基于引导滤波的大气光估计

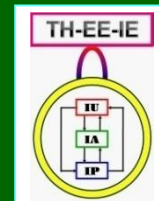
为得到 $E(a_k, b_k)$ 的最小值，可利用最小二乘法的思想求解线性系数 a_k 与 b_k ：

$$a_k = \frac{\text{cov}_k(I, P)}{\text{var}_k(I) + \varepsilon}$$

$$b_k = p'_k - a_k I'_k$$

基于 a_k 与 b_k ，大气光 A 可以表示为：

$$A = F \left[\left(\frac{1}{|W|} \sum_{k \in W_i} a_k \right) P_i + \frac{1}{|W|} \sum_{k \in W_i} b_k \right]$$



7.2 改善失真的综合算法

7.2.1 改进算法流程

7.2.2 T 空间转换

7.2.3 透射率空间的大气散射图

7.2.4 天空区域检测

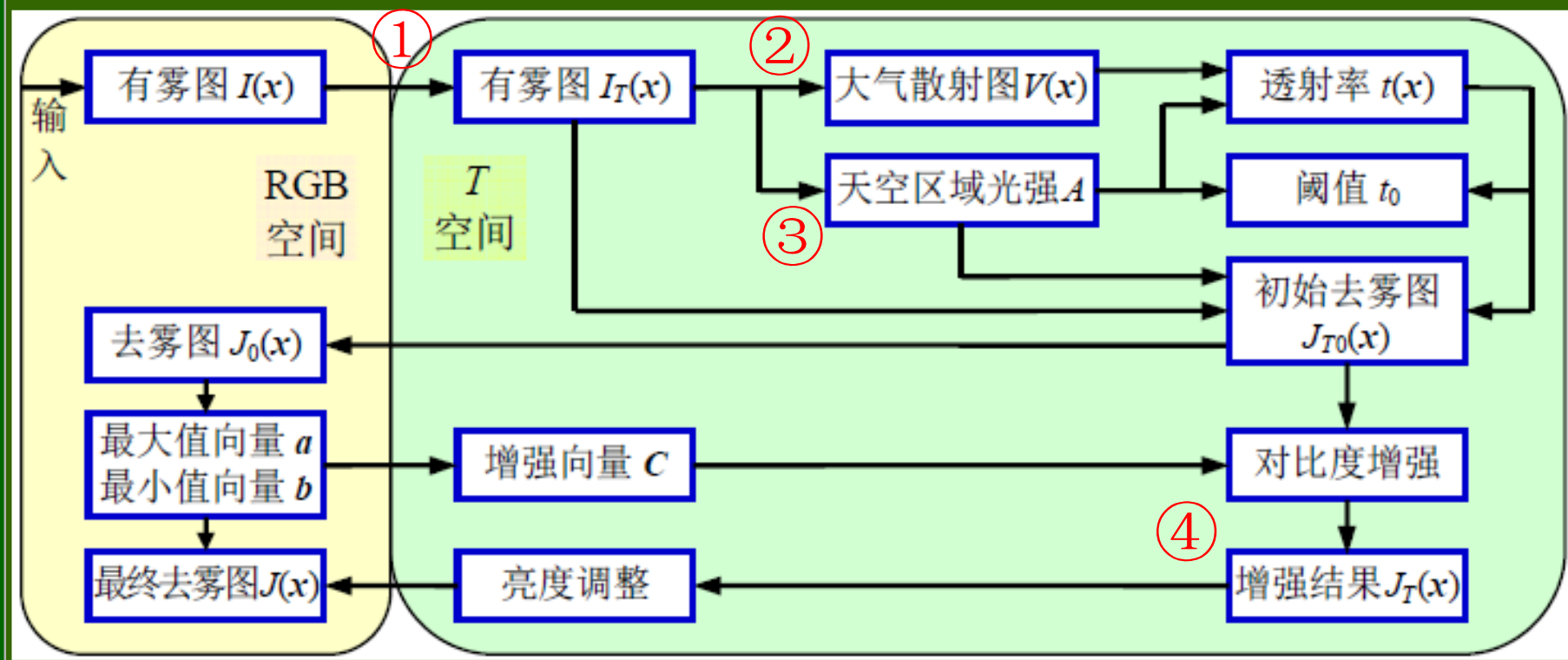
7.2.5 对比度增强

7.2.1 改进算法流程

将 $J(x)$ 的恢复公式表示为:

在透射率空间计算大气散射图

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), t_0]} + A$$



7.2.2 T 空间转换

对彩色图象，其RGB三个通道之间有一定的相关性，或者说三个通道中的彩色之间存在着耦合。如果能削弱各通道之间的耦合，会使暗通道先验模型更容易得到满足

透射率空间，即 T 空间（暗通道先验模型更易满足）

$$T = MC$$

$$M = \begin{bmatrix} 0.0255 & -0.1275 & 1.0965 \\ -0.3315 & 1.5045 & -0.1785 \\ 0.5610 & 0.3825 & 0.0510 \end{bmatrix}$$

7.2.3 透射率空间的大气散射图

大气散射图 $V(\mathbf{x}) = A[1-t(\mathbf{x})]$

$$V(\mathbf{x}) = \max \{ \min[p \times V_m(\mathbf{x}), W(\mathbf{x})], 0 \}$$



有雾原图



$p = 0.9$



$p = 0.75$

7.2.4 天空区域检测

- (b) $t_0 = 0.1$, 由于 t_0 过小, 有明显的颜色失真
- (c) $t(\mathbf{x}) \geq e^{-k} = e^{-1.5} = 0.2231$, 抑制部分失真
- (d) 暗通道值 \geq 阈值 T_v 且邻域内边缘数 $\leq T_p$
- (e) 采用动态 t_0 , 放松 T_v 来扩大天空区域



(b)

(c)

(d)

(e)

7.2.5 对比度增强

T 空间的增强向量

用去雾结果图除以 C

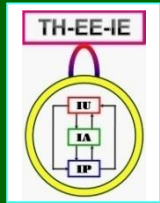
$$C = \frac{M(a - b)}{M[255 \ 255 \ 255]^T}$$

有雾原图

增强前 (偏红)

增强后 (7.2.8)

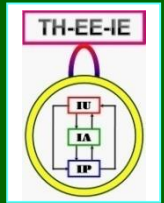




7.3 去雾效果评价

对去雾效果的评价与一般对图象质量的评价或对图象恢复效果的评价有所不同。实际中，与有雾图象场景完全相同的清晰参考图象常常很难获得，所以常没有理想图象作为评价参考

针对图象去雾效果评价的客观评价方法主要分为两类：一类仅从图象对比度角度进行衡量，但这类方法无法正确评价存在过度增强的图象；另一类是从图象对比度和颜色两方面综合考虑，但组合两方面的因素比较复杂

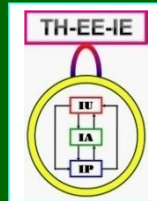


7.3 去雾效果评价

7.3.1 可见边缘梯度法

7.3.2 基于视觉感知的评价

7.3.3 主客观结合的评价实例



7.3.1 可见边缘梯度法

一种去雾领域常用的盲评价方法

借助能见度（VL），也称可视度来评价去雾图象的视觉质量

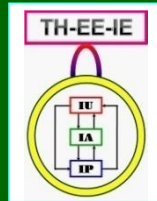
能见度与目标与背景间的亮度差异有关，是一个相对的概念

相关对比度系数 R

$$R = \frac{\Delta VL_J}{\Delta VL_I} = \frac{\Delta J}{\Delta I}$$

去雾图象 J 中属于可见边缘的像素的梯度

有雾图象 I 中属于可见边缘的像素的梯度



7.3.1 可见边缘梯度法

(1) 去雾后新增可见边缘之比 E :

$$E = \frac{N_J - N_I}{N_J}$$

值越大, 表明去雾图象中可见边缘的数量越多

(2) 可见边缘的梯度均值 G :

$$G = \exp \left[\frac{1}{N_J} \sum_{p_i \in Q_J} \log G_i \right]$$

值越大, 表明去雾图象中可见边缘的强度越大

(3) 饱和黑色或白色像素的百分比 S :

$$S = \frac{N_s}{N}$$

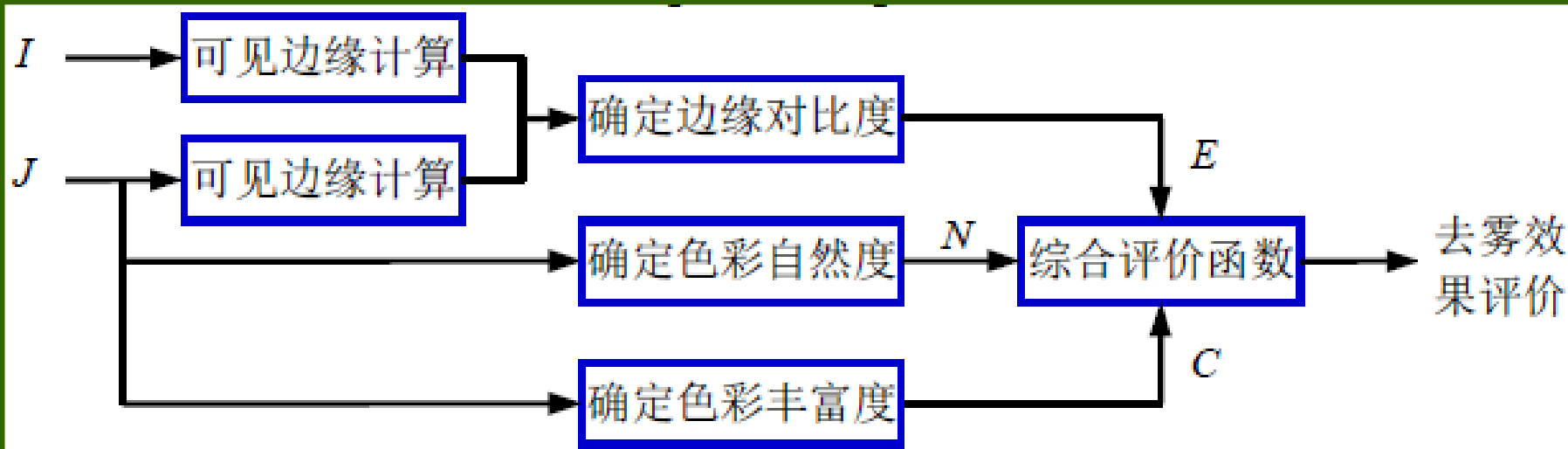
值越小, 表明去雾图象的对比度越高

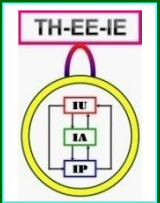
7.3.2 基于视觉感知的评价

考虑去雾图象的色彩质量

色彩自然度指标 (CNI) N 是人类视觉度量图象场景是否真实自然的指标

色彩丰富度指标 (CCI) C 是衡量色彩鲜艳生动程度的指标





7.3.3 主客观结合的评价实例

客观评价指标便于定量计算

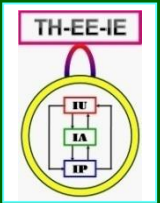
主观评价指标反映视觉质量更直接

选用比较符合主观质量的客观评价指标

1. 指标和计算

结构相似度借助了图象中的协方差等信息，
对图象中的（客观）结构有一定的描述作用

人眼对结构信息比较敏感，所以结构相似度
应反映一定的主观视觉感受



7.3.3 主客观结合的评价实例

结构相似度衡量的是两幅（灰度）图象之间的相似度，其值可归一化到 $[0 \quad 1]$ 区间，两幅图象相同时，有 $SSIM = 1$

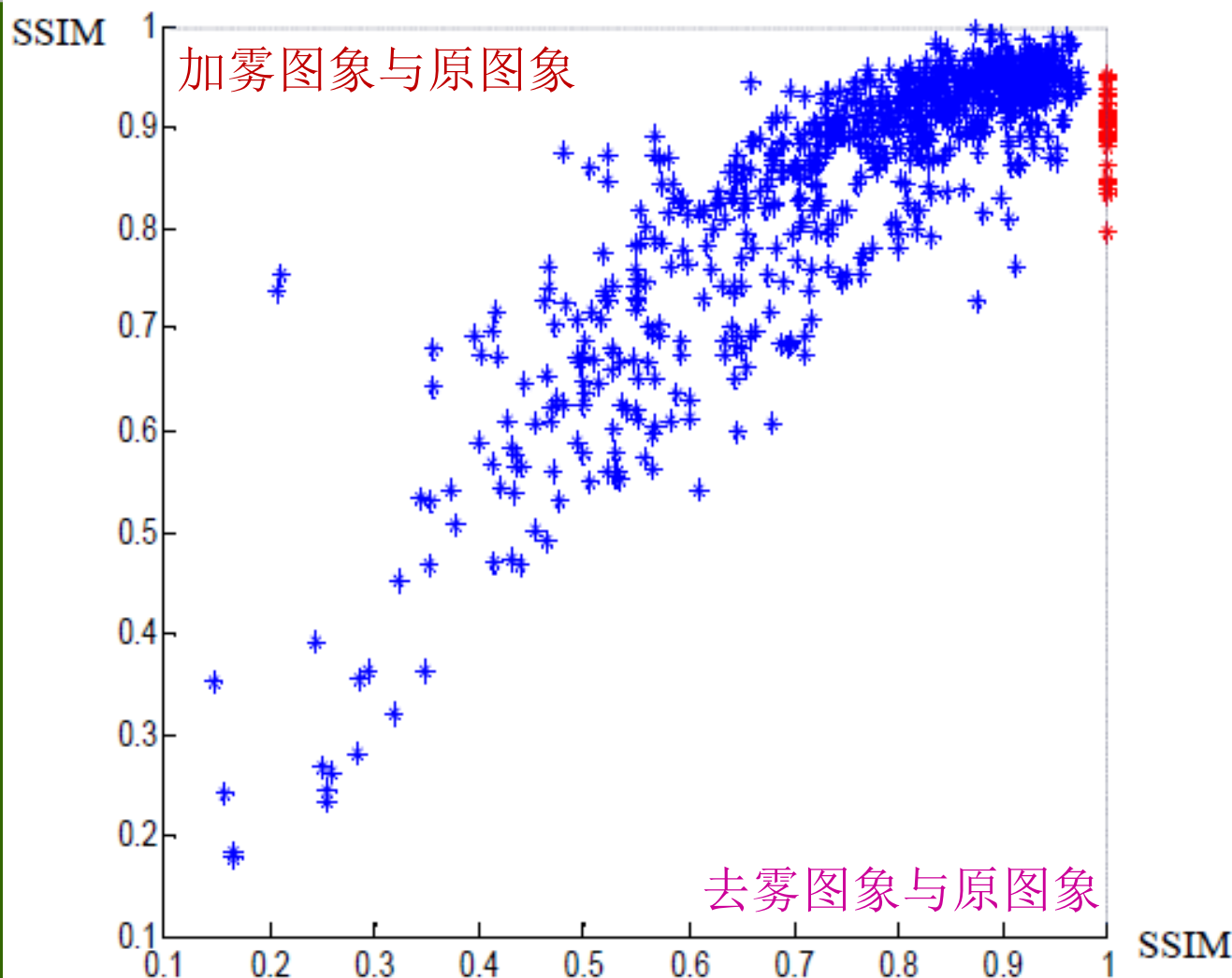
将图象转换到Lab空间，计算L通道的SSIM

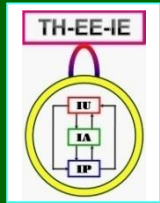
为衡量结构相似度与图象主观视觉质量之间的相关性，可考虑对原始图象采取加雾的方法来获得不同的加雾图象作为参考，从而计算各种情况下的结构相似度

具体可使用蓝色通道加雾

7.3.3 主客观结合的评价实例

去雾结果与原图之间的SSIM越大，
加雾结果与原图之间的SSIM也越大





7.3.3 主客观结合的评价实例

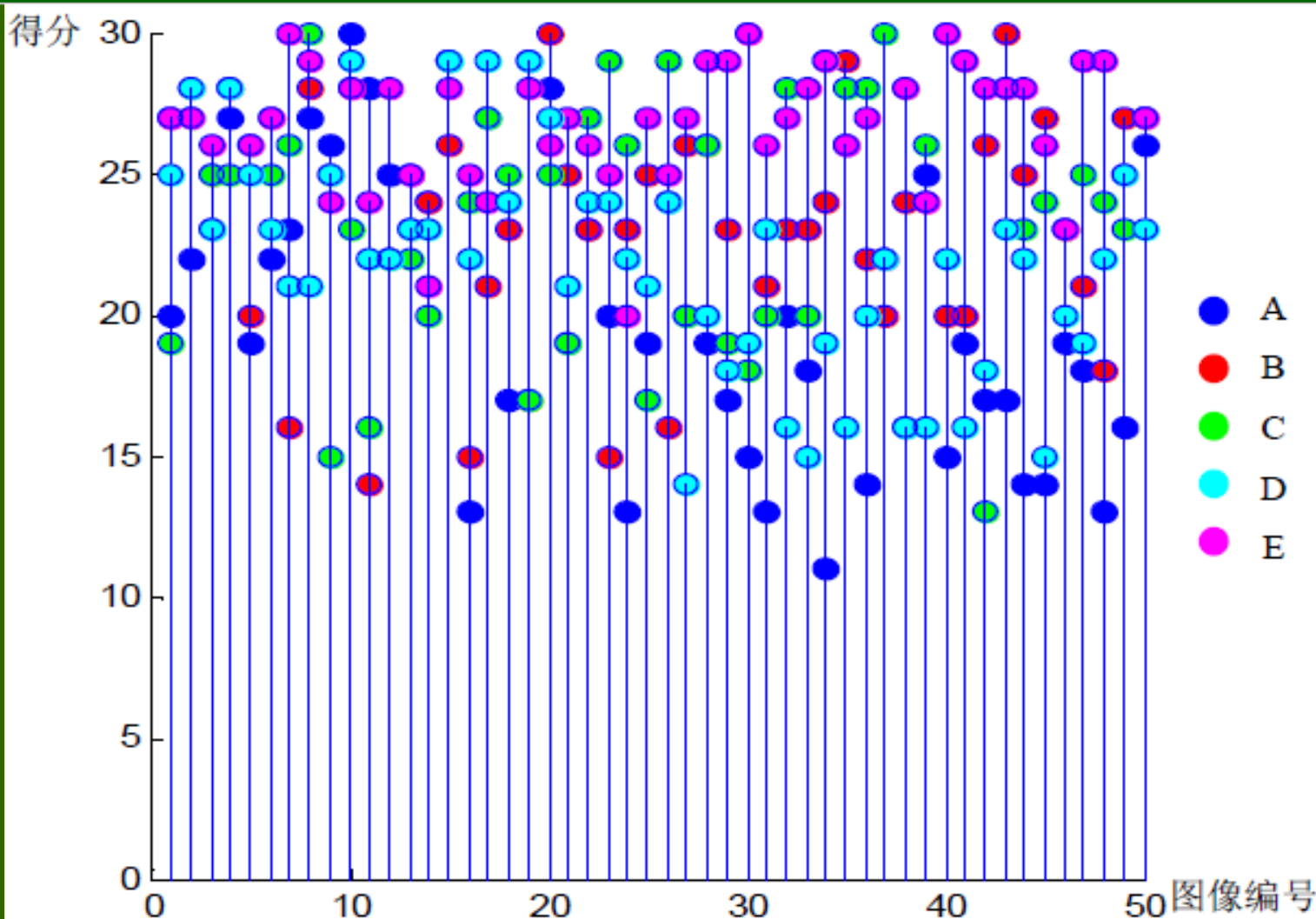
2. 实验和结果

取50幅有雾原图作为参照，使用5个算法分别进行去雾，一共得到了250幅结果图

对每幅结果图，均分别根据对失真和去雾两个方面的评判进行打分。每个打分标准都分为低、中、高3档。失真越低越好，去雾越高越好。为拉开3档之间的差距，将低中高失真项的权重分别设为3，2，1；低中高去雾项的权重分别设为1，2，3。两项的得分都是越高越好。失真总分和去雾总分的权重均为1

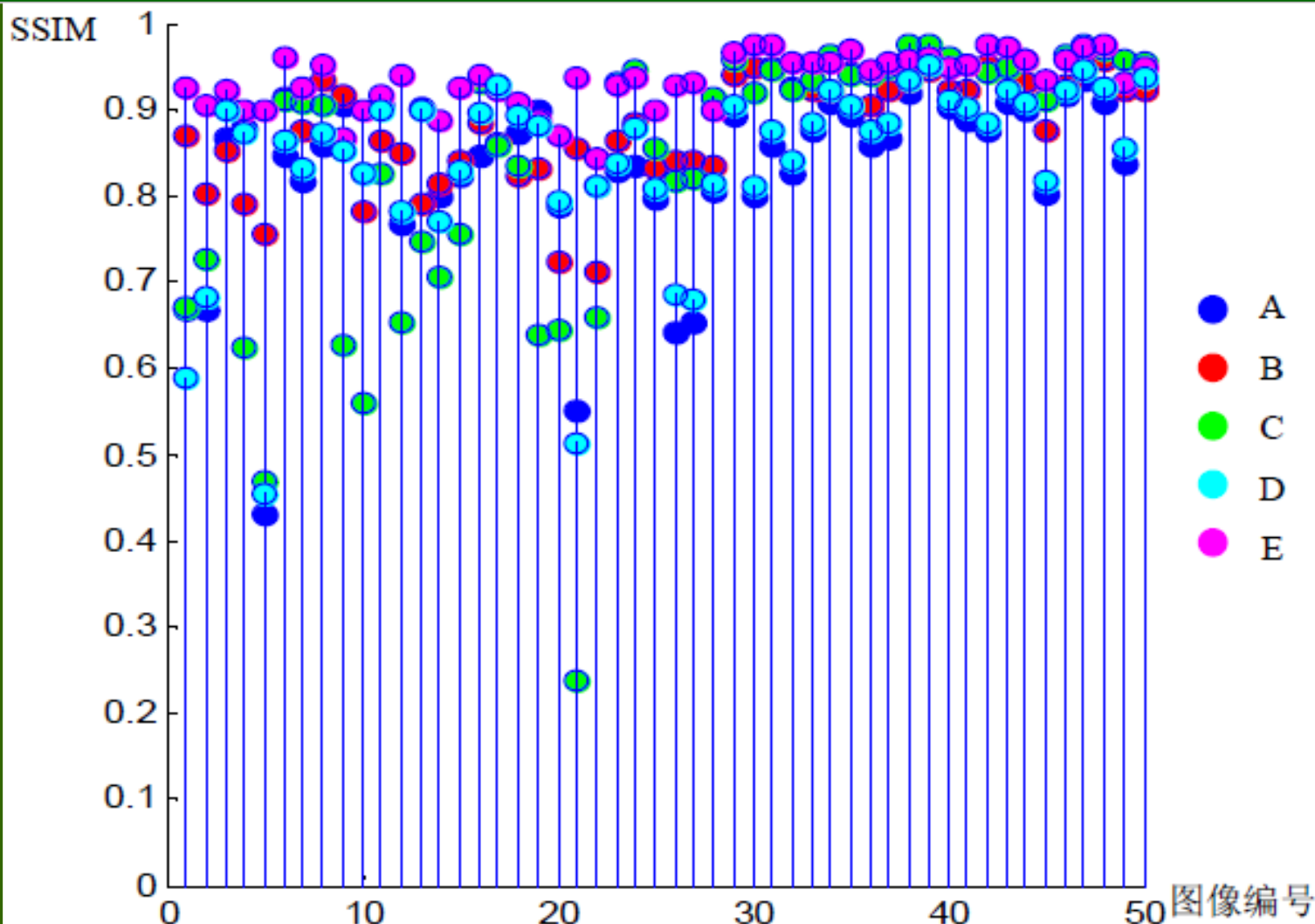
7.3.3 主客观结合的评价实例

失真
评分



7.3.3 主客观结合的评价实例

SSIM
值
↕
(去雾
效果)





联系信息

- ✎ 通信地址：北京清华大学电子工程系
- ✎ 邮政编码：100084
- ✎ 办公地址：清华大学，罗姆楼，6层305室
- ✎ 办公电话：(010) 62798540
- ✎ 传真号码：(010) 62770317
- ✎ 电子邮件：zhang-yj@tsinghua.edu.cn
- ✎ 个人主页：oa.ee.tsinghua.edu.cn/~zhangyujin/