

# 海底云台自动清洁系统的设计

武越<sup>1,2</sup>, 李智刚<sup>1</sup>, 王国峰<sup>2</sup>, 冯迎宾<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 大连海事大学信息科学与技术学院, 辽宁大连 116026)

**摘要:** 针对海底观测网中摄像机防护罩易受污染问题, 设计了一套以控制器 MSP430 为核心, 配以电机驱动、行程限位、角度检测、清洁刷等外围模块的海底云台自动清洁系统; 系统选用梯度结构相似度 (GSSIM) 的图像质量评价方法对防护罩污染程度进行判断, 当污染程度超出阈值时, 通过串口命令单片机驱动清洁刷, 实现对污染物的自动清洁; 实验表明, 系统根据图像实时质量评价结果自动清洁防护罩, 克服了手工清洁困难、定时清洁耗能等缺点, 快速高效, 保证摄像机的正常工作。

**关键词:** MSP430; 海底云台; 自动清洁; 图像质量评价; GSSIM

## Design of Undersea Pan-tilt Auto-Cleaning System

Wu Yue<sup>1,2</sup>, Li Zhigang<sup>1</sup>, Wang Guofeng<sup>2</sup>, Feng Yingbin<sup>1</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** Appointing to the issue that the lens of the video camera is easy to be contaminated, an undersea pan-tilt auto-clean system was designed. This system is based on MSP430 controller and assembles with the peripheral, such as motor driver, travel limitation, angle detection and cleaning brush. The system uses the method of image quality assessment that is called gradient-magnitude-based structure similarity (GSSIM) to judge the contamination of the lens. When contamination exceeds the threshold value, the MCU drives the cleaning brush through the serial port to clean the contamination automatically. Experiment shows that the system cleans the lens automatically according to the outcome of the assessment of real-time image quality, which overcomes the disadvantage of the difficulty of the manual cleaning and the power consume of the regular cleaning. Therefore, the system is fast and efficient, and can guarantee the normal operation of the video camera.

**Keywords:** MSP430; undersea pan-tilt; auto clean; image quality assessment; GSSIM

## 0 引言

海洋占地球表面积的 71%, 蕴藏着巨大的能量和资源, 并且与人类生存、发展息息相关, 因此对于海洋的开发与利用具有深远意义。进入 21 世纪, 各国加强了对海洋的开发与利用, 其中海底观测网作为一种有效方式, 备受青睐。我国也先后建立东海小衢山实验站、南海海底观测示范网。

然而, 沿海的生物种类繁多, 常见的有蔓足类、被囊动物、苔藓动物以及众多的藻类和菌类等<sup>[1]</sup>。这些生物会对长期投放运行的海底摄像系统造成污染, 致使拍摄图像质量降低, 甚至有些藻类植物会长满防护罩, 导致系统无法进行观测。由于摄像系统固定于海底, 打捞清洁困难, 费用昂贵。如果派遣潜水员进行清洁, 由于海水压力的作用, 可能危及潜水员的生命。为解决海底观测网摄像系统遭受污染并且清洁困难的问题, 设计了一种能够清除防护罩污染物的云台。该云台能够根据防护罩污染的程度, 自动清洁, 保证摄像系统正常运行。

## 1 系统组成

系统由位于陆地基站的工控机与位于海底的云台两部分

组成。

工控机负责辨别图像的质量、发送云台控制命令以及显示云台实时状态。首先工控机采用基于 TCP/IP 协议的光以太网技术<sup>[2]</sup>, 通过光电复合缆将命令传送给主接驳盒。主接驳盒通过光电分离仓完成光电分离后, 将光信号通过以太网控制器, 转换成以太网协议形式的信号, 传送至次级接驳盒, 次级接驳盒 PLC 控制器再利用其 RS485 模块, 遵循云台控制协议 Pelco\_D 将信号通过 RS485 通讯接口发送给摄像系统。同时, 工控机将视频服务器传送上来的视频转换成静态图片的形式, 对实时图像质量进行辨别, 如有需求, 发送清洁命令。

云台上集成了水下灯和水下摄像机。云台内部控制器选用低功耗的单片机。单片机负责根据接收到的工控机命令完成相应的操作。具体分为 RS485 通讯、行程限位、摄像机控制、角度采集、过流检测、电机驱动、照明 7 个模块。电机驱动模块通过驱动水平运动与竖直电机实现控制云台的二维运动, 同时驱动清洁刷电机完成镜头清洁工作。摄像机控制模块通过 RS232 串口发送命令, 完成对摄像机焦距、光圈的调节。角度采集模块通过电位器对云台所处的水平及竖直角度进行检测。过流检测模块采集与电机串联的电阻两端的电压值, 并对采集信号进行隔离放大, 传给单片机的 A/D 转换模块, 当转换值大于预设值, 则停止电机运行, 实现对电机的保护。行程限位模块运用霍尔元件的磁效应, 当其遇到限位处的磁铁时发出低信号触发单片机中断, 在中断中停止电机, 从而避免电机损坏。系统结构如图 1 所示。

收稿日期: 2014-05-30; 修回日期: 2014-07-09;

作者简介: 武越(1989-), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事计算机控制技术方向的研究。

李智刚(1970-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事水下机器人技术方向的研究。

王国峰(1957-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事检测技术与自动化装置方向的研究。

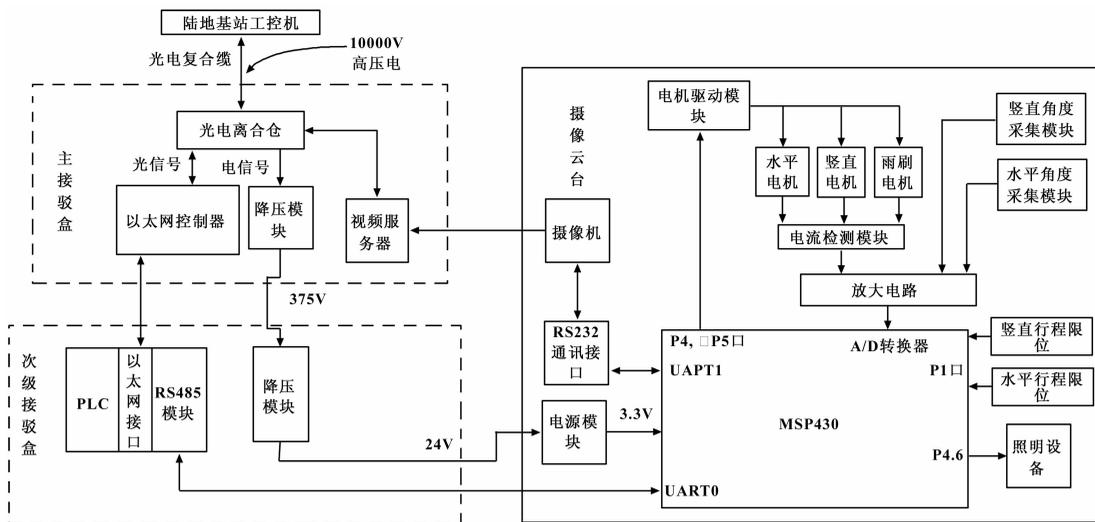


图 1 系统结构图

## 2 硬件设计

### 2.1 单片机单元

为了降低功耗, 系统选用 MSP430 单片机作为控制器。MSP430 单片机在 1 MHz 的时钟运行下, 耗电电流在 0~400  $\mu\text{A}$  之间<sup>[3]</sup>, 节能优势明显。它还具有 5 种低功耗模式, 当系统处于空闲时, 可关闭 CPU 进入低功耗模式, 需处理数据时, 利用中断唤醒 CPU, 执行指令。

### 2.2 晶振的选取

由于充满高压硅油, 云台设备内部压力很高。传统石英晶振的金属外壳会被压力挤压变形, 导致无法起振。选用高强度的陶瓷晶振, 能够抵抗内部高压, 保证系统正常工作。

### 2.3 电源模块

为保证角度数值采集的准确性, 系统采用芯片 REF191 作为片外电压基准源, 该芯片输出电压不随温度变化波动, 稳定性好, 输出平均电压为 2.048 V, 内部精度为  $\pm 2\text{ mV}$ , 温度系数为 5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

海底摄像系统通过接驳盒获得 24V 电压, 再经由 LM2576 转换成 5 V 和 3.3 V 电压对控制系统进行供电, 为防止在输入端出现大的瞬态电压, 在输入端和地之间要加至少 100  $\mu\text{F}$  的旁路电容, 输出端接一个 82~820  $\mu\text{F}$  的电容用于滤波和提高环路的稳定性<sup>[4]</sup>。

### 2.4 电机驱动模块

系统采用 SGS 公司的 L298n 作为运动电机及清洁刷电机的驱动芯片。L298n 内部包含两个 H 桥驱动器, 可以驱动两台电机, 最大驱动电流可达 2A。将单片机 P4 口接在引脚 IN1, IN2 上, 以控制方向, 将单片机定时器 B 的 TBCCR1、2、3 产生 PWM 信号接在三组电机 ENA/B 端, 调节占空比实现电机调速。

为防止因电机堵转及短路而产生的过电流现象, 系统会对电流进行采样。将芯片提供的 SEN 电流检测端接上电流采样电阻, 采样电阻与电机串联。如果阻值过大, 则分压过大, 会导致下桥臂关断, 影响系统运行。通常电阻电压小于 2 V, 按电机最大 (堵转) 电流为 0.6 A 算, 电阻应小于 4  $\Omega$ 。由于 1206 封装的电阻功率为 1/4 W, 若只用一个 2  $\Omega$  电阻, 会严重超过电阻功率。因此, 采用 5 个 10  $\Omega$  电阻并联的方式进行采样, 每个电阻的功率为 0.144 W, 符合功率及电压要求。

## 3 软件设计

系统采用流行的云台控制协议 Pelco\_D。该协议采用一个数据包的格式传输, 所有数据均采用十六进制, 一个命令数据包由 7 个字节组成, 完成对指定地址云台的控制。程序流程图如图 3 所示。

在主程序中, 进行系统时钟配置、串口、I/O 引脚、定时器以及 A/D 转换模块初始化。然后系统进入低功耗模式, CPU 停止运行。当数据接收转换完毕后, 会在中断程序中激活 CPU, 主程序根据命令字的内容进行电机、照明设备驱动, 云台调速, 控制摄像机等操作, 之后再次进入低功耗模式, 等待下次激活。

接收中断程序用来接收命令数据包、校验数据包, 如果符合 Pelco\_D 协议, 激活 CPU, 进入主程序。

定时中断程序与 A/D 中断程序配合使用。在定时器中断中喂看门狗, 并在电机运行的状态下启动 A/D 转换, 以降低功耗。A/D 转换结束后, 进入 A/D 中断程序, 将电机电流和云台角度发给上位机。然后判断电机电流值, 如果过大, 则进行过流保护, 停止电机转动。将云台实时角度值与设定值相比

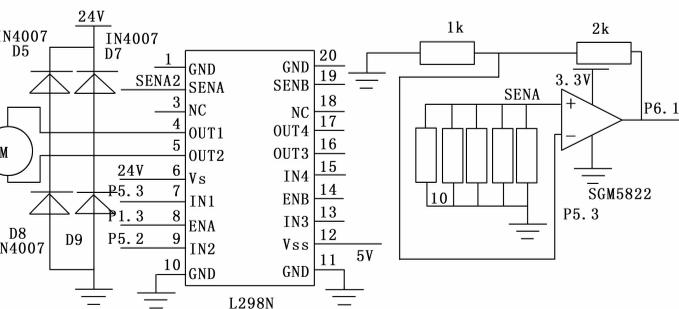


图 2 电机驱动图

较, 若未在指定位置, 先将云台移动到水平指定位置再运动到到垂直指定位置。通过多次 A/D 中断来实现云台定位, 从而确保参考图像与实时图像的拍摄位置相一致。

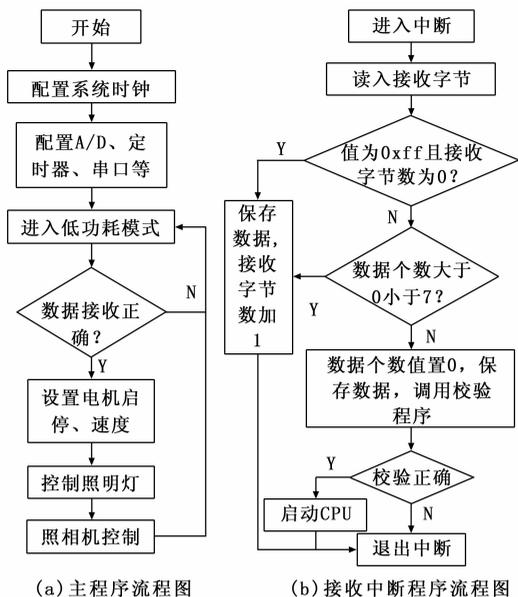


图 3 软件流程图

## 4 图像质量评价方法与实现

### 4.1 方法介绍

通过长时间观测, 造成图像质量下降的原因有三种情况: 镜头附近浮游生物较多; 海底的淤泥附着在镜头表面; 生物长满防护罩。对于这些因模糊引起的质量下降的情况, 最常用的辨别方法是峰值信噪比 (PSNR) 和均方误差 (MSE) 法。

$$MSE = \frac{\sum_{0 \leq i < M} \sum_{0 \leq j < N} (f_{ij}(x, y) - f'_{ij}(x, y))^2}{M \times N} \quad (1)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255 \times 255}{MSE} \quad (2)$$

其中:  $M$ 、 $N$  为图像的高与宽,  $f_{ij}(x, y)$  和  $f'_{ij}(x, y)$  分别表示参考图像和待测图像中点  $(x, y)$  的像素值。该算法有计算简单、物理意义明确等优点, 然而其仅仅是对像素点之间绝对误差的纯数学统计, 把图像中所有像素点做同等对待, 没有考虑到像素点间的相关性, 不符合人眼视觉系统的感知特性<sup>[5]</sup>。

Zhou Wang 等<sup>[6]</sup> 提出了结构相似性理论和结构相似度 (SSIM) 指数, 该理论认为人眼在观察一幅图像的时候, 首先提取的是图像的结构信息。人眼对一幅图像质量好坏的判断, 更多的是对结构信息失真的判断。从高层次上模拟人眼视觉系统的功能, 把结构信息分为亮度  $l(x, y)$ , 对比度  $c(x, y)$ , 结构相似度  $s(x, y)$  三部分,

计算公式如式 (3-5)<sup>[7]</sup>。

$$l(x, y) = \frac{2u_x u_y + C_1}{u_x^2 + u_y^2 + C_1} \quad (3)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x \sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (4)$$

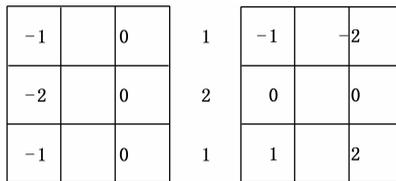
$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha * [c(x, y)]^\beta * [s(x, y)]^\gamma$$

上式中  $u_x$ 、 $\sigma_x$  为参考图像的均值和方差,  $u_y$ 、 $\sigma_y$  为实时

图像的均值和方差,  $\sigma_{xy}$  为参考与实时图像的协方差。SSIM 算法考虑了像素之间的关联性, 更符合人眼视觉特性。但是在研究中发现 SSIM 不能很好的评价严重模糊的图像<sup>[8]</sup>。这是因为, 边缘和纹理是图像结构信息的最重要的部分, 而作为 SSIM 最为重要的第三部分结构信息的比较,  $s(x, y)$  实质上求取的仅仅是原图像子块和降质图像子块之间像素值的相关系数, 不能很好地反映图像的边缘和纹理结构信息<sup>[9]</sup>, 因此对于模糊类型辨别能力低。而表示灰度最大变化率方向的梯度能反映出图像中微小细节反差和纹理特征变化, 可以用来评价图像的清晰程度。因此, 为了更好地辨别观测系统中各种模糊图像, 选用梯度与结构相似度相结合的方法 (GSSIM)<sup>[9]</sup>, 该方法在保留比较图像结构的基础上, 增加了对两幅图像梯度的比较, 实现对图像整体以及细节差别的辨认。为便于线性计算, 用绝对值来近似梯度向量的幅度值<sup>[10]</sup>。

$$G_x(i, j) = \left| \frac{\partial x(i, j)}{\partial i} \right| + \left| \frac{\partial x(i, j)}{\partial j} \right| \quad (6)$$

利用 Sobel 算子进行梯度计算,  $\frac{\partial x(i, j)}{\partial j}$ ,  $\frac{\partial x(i, j)}{\partial i}$ 、是由水平边缘算子和垂直边缘算子计算得到, 再利用式 (7) 求取梯度相似度, 最后利用式 (8) 求出梯度相似度。



(a) 垂直算子

(b) 水平算子

图 4 Sobel 算子

$$g(i, j) = \frac{2 \sum_j \sum_i G_x(i, j) G_y(i, j) + C_3}{\sum_j \sum_i [G_x(i, j)]^2 + \sum_j \sum_i [G_y(i, j)]^2 + C_3} \quad (7)$$

其中:  $G_x(i, j)$ ,  $G_y(i, j)$  分别为原图像块  $x$  和降质图像块  $y$  在  $(i, j)$  处的梯度幅值。该方法只是将式 (4) 中结构信息比较  $s(x, y)$  用梯度相似度  $g(x, y)$  代替<sup>[11]</sup>, 得到基于梯度的结构相似度:

$$GSSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [g(x, y)]^\gamma \quad (8)$$

### 4.2 GSSIM 的实现

采用 C# 编写图像质量评价算法程序, 流程图如图 5 所示。首先利用控件 VPOR SDK 中的 SaveSnapshot 方法对当前图像进行截取, 再用内存法对参考与实时图像的像素值进行读取, 将像素阵列值赋给数组变量。Sobel 水平、垂直算子的 9 个元素值分别赋给两个数组。求取某点梯度值时, 以该点为中心, 加上其周围的 8 个元素, 与存有 Sobel 水平、垂直算子的数组元素分别对应相乘, 再将两个算子的运算结果相加。将整个图像分为若干个不重叠、大小相同的子块, 在每个子块上求像素与梯度的方差、均值、协方差, 利用式 (7)、(8) 求取 GSSIM 值, 再将各子块的 GSSIM 值求和取平均得到系统 GSSIM 值。如果 GSSIM 值低于阈值, 说明图像与参考图像的相似度过低, 则认为图像模糊, 通过串口发出清洁命令。

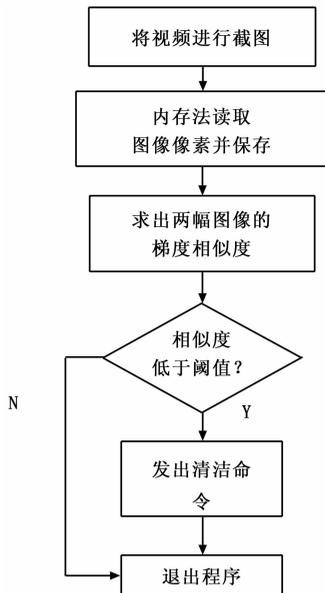


图 5 图像质量判别流程图

### 5 方法评价效果验证

为了验证上述方法的有效性, 我们截取三种污染类型的图像与一幅清晰参考图像, 如图 6 (a), (b), (c), (d) 所示。利用 PSNR、GSSIM、SSIM 分别对 3 幅污染图像质量进行评价, 评价结果如表 1 所示。利用 C# 提供的 stopwatch 类 start 方法对 GSSIM 程序运行时间监控, 图 6 (a)、(b)、(c) 运行时间分别为 1.537 s、1.596 s、1.633 s。

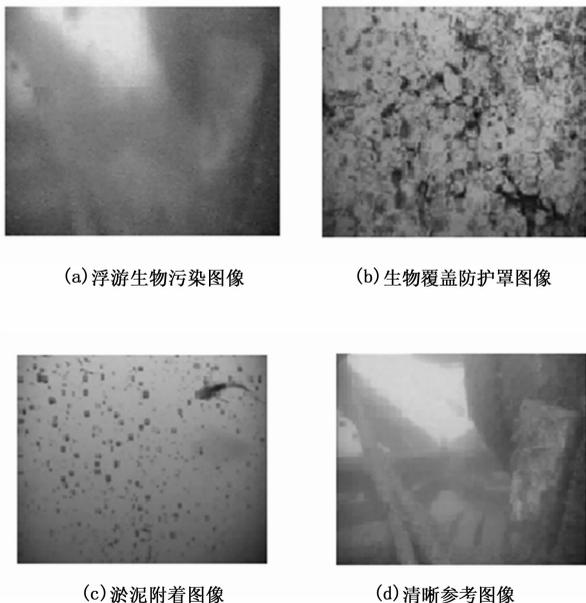


图 6 海底实例图像

由表 1 可知, 浮游生物污染图像保留了参考图像的大致结构, 但存在模糊, 因此 GSSIM 与 PSNR 给出了中等的评价值 0.651 和 30.285, 而 SSIM 给出了评价较高的值 0.784, 与视觉主观感受不符, 说明 SSIM 对模糊失真的评价效果不好。对

于生物覆盖防护罩的图像, 几乎无法辨认拍摄的内容, GSSIM 与 PSNR 给出了最低的评价值 0.299、16.430, 而 SSIM 给出了 0.397 相对较高。说明 GSSIM 与 PSNR 对于海底拍摄图像质量具有较好的评价能力。而表示结构相似程度的 GSSIM 具有更直观的物理意义, 因此选用其作为本系统的评价方法。污染较小的是浮游生物污染, 其相似度为 0.651, 相似度阈值设定为 0.75。这样只要相似度低于此值的图像就可判定为防护罩污损, 进而对防护罩清洁, 清洁效果如图 6 (d) 所示。

表 1 实验结果

	GSSIM	PSNR	SSIM
参考图像	1	无穷大	1
淤泥附着图像	0.432	19.075	0.553
生物覆盖图像	0.299	16.430	0.397
浮游污染图像	0.651	30.285	0.784

### 6 结束语

通过对几种质量评价方法的比较, 选择一种较适合本系统的方法—GSSIM 方法, 该方法可以很好地评价海底实时图像质量, 同时运算速度快, 保证清洁的快速性。硬件设计采用 RS485 隔离通讯, 电机过流保护, 看门狗等技术保证了安全性, 选用电压基准芯片 REF191 提高了角度检测与云台定位的精确性。软件设计采用了最通用的 Pelco\_D 协议, 加强了程序的可开发性, 开发者可以根据需求, 遵循该协议对程序进行改进和扩展。系统可以长期应用在海底, 实现对海洋的观测。

#### 参考文献:

- [1] 蔡成翔, 尹艳镇, 焦淑菲, 等. 牡蛎附着腐蚀研究进展 [J]. 广州化工, 2012, 40 (5): 28-30.
- [2] 卢汉良, 李德骏, 杨灿军, 等. 深海海底观测网络水下接驳盒原型系统设计与实现 [J]. 浙江大学学报 (自然科学版), 2010, 44 (1): 8-13.
- [3] 杨勃锋, 张效民, 祖翔宇. 低功耗水下通信系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (1): 234-335.
- [4] 徐丽萍, 李党婴. 基于 LM2576 的 Buck 型直流变换器设计 [J]. 电气应用, 2010, 29 (4): 42-44.
- [5] 段影影, 马建华, 陈武凡, 等. 改进的结构相似医学图像质量评价方法 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46 (2): 145-149.
- [6] Bovik Z W, Sheikh A C, Simoncelli H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE transactions on image processing, 2004, 13 (4): 600-612.
- [7] 刘光杰, 戴跃伟, 孙金生, 等. 用于 JPEG 图像的高容量信息隐藏算法 [J]. 信息与控制, 2007, 36 (1): 102-107.
- [8] 李航, 路羊, 崔慧娟, 等. 基于频域的结构相似度的图像质量评价方法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2009, 49 (4): 559-562.
- [9] 杨春玲, 旷开智, 陈冠豪, 等. 基于梯度的结构相似度的图像质量评价方法 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2006, 34 (9): 22-25.
- [10] Rafael C. Gonzalez. 数字图像处理 [M]. 阮秋琦译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [11] 杨春玲, 陈冠豪, 谢胜利. 基于梯度信息的图像质量评判方法的研究 [J]. 电子学报, 2007, 35 (7): 1313-1317.