

## 基于 Kinect 传感器的红外场景增强

宋晓炜<sup>1</sup>, 刘清丽<sup>1</sup>, 杨 蕾<sup>1</sup>, 刘洲峰<sup>1</sup>, 王中元<sup>2</sup>

(1. 中原工学院电子信息学院, 河南 郑州 451191; 2. 武汉大学计算机学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:**针对 Kinect 红外图像噪声大、对比度低等问题, 通过对其进行特征分析提出了增强 Kinect 红外场景的方法。首先, 通过 OCTM 线性规划方法提高红外图像对比度; 其次, 结合 Kinect 红外场景的频域特征, 找到噪声频率; 最后运用频域带阻滤波器和双边滤波相结合的方法对图像进行图像增强, 进而达到去除噪声的同时保持边缘细节的效果。为验证方法的有效性和实用性, 对不同客观条件下的红外场景进行了实验, 并对多组实拍场景进行了主观和客观方面的测试。通过实验和测试, 证明此方法能有效增强 Kinect 红外场景, 且在去噪同时很好地保留了图像边缘信息。

**关键词:**Kinect; 红外场景; 图像增强; OCTM; 双边滤波; 带阻滤波

**中图分类号:**TN219; TP391 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2015.03.020

## Infrared scene enhancement based on Kinect sensor

SONG Xiao-wei<sup>1</sup>, LIU Qing-li<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>1</sup>, LIU Zhou-feng<sup>1</sup>, WANG Zhong-yuan<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China;  
2. Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of large noise and low contrast for Kinect infrared images, an enhancement method was proposed for the Kinect infrared scene through analyzing the characteristics. Firstly, the infrared image contrast was enhanced by the OCTM algorithm. Secondly, combined with the features of frequency domain for the Kinect infrared scene, the noise frequency band was found. Finally, in order to get rid of noise and preserve edge details of the infrared scene image, the images were enhanced with the band stop filter and bilateral filter. In order to prove the effectiveness and the practicability of the proposed method, the experiments of different infrared scenes were carried out, and multiple sets of real scenes were tested from subjective aspect and objective aspect. Experiments and the test results show that the proposed method is very effective to enhance Kinect infrared scenes.

**Key words:** Kinect; infrared scene; image enhancement; OCTM; bilateral filtering; band stop filter

### 1 引 言

Kinect 是微软公司 2010 年 10 月推出的游戏体感设备, 可进行骨骼跟踪、动作识别、人脸识别和语音识别等, 推出之后就引起了人们的极大关注, 国内外基于它做了很多研究, 主要集中在深度、骨骼跟踪

和三维重建等方面。Kinect 红外场景方面的研究较为欠缺, 尤其缺乏 Kinect 红外场景增强方面有效的研究成果。

Kinect 摄像部分包括一个 RGB 摄像头、一个红外摄像头和一个红外投影器。Kinect<sup>[1]</sup> 利用红外投

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 60902063, No. 61379113)、河南省基础与前沿技术研究计划项目(No. 092300410175)和河南省科技创新人才计划杰出青年项目(No. 124100510015)资助。

**作者简介:**宋晓炜(1978 - ), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为数字图像/视频处理。E-mail: sxw-tju@163.com

**通讯作者:**刘清丽(1990 - ), 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理和图像分析。E-mail: lgl1990my@163.com

**收稿日期:**2014-07-14; **修订日期:**2014-08-28

影器将激光均匀分布投射在测量空间中,再透过红外摄像头记录空间中的每个散斑<sup>[2]</sup>,从而得到红外图像。这些散斑具有高度的随机性,而且会随着距离的不同而改变图案,因此 Kinect 可以通过其红外图像在全黑夜间条件下获得景物图像。

随着科学技术的飞速发展,对于红外图像质量的要求也不断提高,提高红外图像的途径有两种:一种是研制更高性能的红外设备;另一种是对红外场景进行增强,提高红外图像质量。本文属于第二种研究方向,通过对 Kinect 红外场景进行增强处理,提高图像质量。

## 2 Kinect 红外场景

Kinect 红外场景有以下几个特点:整体灰度分布低且较集中;对比度较低;红外图像噪声显著,信噪比较低。Kinect 红外图像的噪声主要是散斑噪声,这些散斑噪声具有数量多,高度随机等特点。

通过对红外图像进行频域分析,可以发现图像散斑噪声主要集中在中高频区域,利用 MATLAB 对 Kinect 红外图像进行二维傅里叶变换得到其傅里叶频谱,频谱图整体看来在垂直方向呈现明暗噪声交替的特征。通过对距 Kinect 不同位置处平面白背景的红外图像的散斑特征的分析,可得到对 Kinect 红外图像噪声更加准确的空域和频域特征。图 1 是拍摄 1.5 m 处平面白背景下得到的 Kinect 红外图像及其频谱图,从 Kinect 红外图像中可看出虽然散斑噪声具有很大的随机性,但整体看来在其垂直方向呈现明暗噪声交替的特征,这种衍射特征随着距离的增加而愈加明显,和其频谱中央垂直线上两个较明亮突起对应。因此适合对其进行基于频域的滤波和增强。

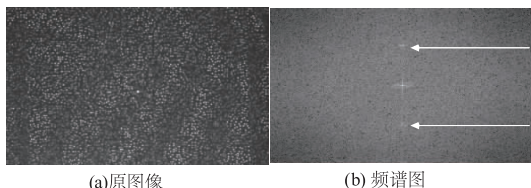


图 1 Kinect 红外图像及其频谱图(以 1.5 m 为例)

针对 Kinect 红外图像特点,单独一种图像增强方法<sup>[3-4]</sup>难以达到图像增强的理想效果,本文提出了一种多个图像处理算法相结合的方法对 Kinect 红外图像进行增强。

## 3 红外场景增强方法

图像增强技术作为图像处理领域一种重要的处理技术,它可以通过一定的局部增强或均衡化处理等技术使得难以辨认或模糊的图片提高清晰度,并增大局部对比度,以便从处理后的图像中提取大量有用的信息。

本文红外场景增强方法的流程如图 2 所示。



图 2 红外场景增强过程

### 3.1 OCTM 算法

在红外场景增强中,针对对比度低的特点,直方图均衡<sup>[5]</sup> (Histogram Equalization, HE) 是比较有效的处理方法。

传统均衡算法中变换函数的离散形式为:

$$T(i) = \sum_{0 \leq j \leq i} P_r(r_j), 0 \leq r_j \leq 1, 0 \leq i \leq L \quad (1)$$

其中,  $r$  为原图像的灰度值;  $P_r(r)$  为概率密度。

在传统的均衡算法中,由于一些灰度级别没有像素分布而出现另外一些灰度级数像素集中,从而造成图像的灰度级别减少和损失,出现灰度断层现象。而且这种动态范围的扩大是建立在合并相近灰度级图像元素的灰度级基础上的,因而部分灰度细节被过度压缩,造成图像细节丢失,会造成图像失真,从而影响图像效果。

针对传统的直方图均衡算法存在的缺陷,本文采用 OCTM (Optimal Contrast-tone Mapping) 线性规划方法<sup>[6]</sup>在对比度最大化的同时运用约束条件控制失真不好的影响。

变换函数的失真为:

$$D = \max_{1 \leq i, j \leq L} \{j - i \mid T(i) = T(j); p_i > 0, p_j > 0\} \quad (2)$$

设  $s'_j$  为原图像中  $r_j - r_{j-1}$  在输出图像中的映射,则:

$$\begin{aligned} T(i) &= \sum_{0 \leq j \leq i} P_r(r_j) \\ &= \sum_{0 \leq j \leq i} s'_j, 0 \leq r_j \leq 1, 0 \leq i \leq L \end{aligned} \quad (3)$$

线性约束条件为:

$$\begin{aligned} (a) \quad & \sum_{0 \leq j \leq L} s'_j < L \\ (b) \quad & s'_j \geq 0, 0 \leq j < L \\ (c) \quad & \sum_{j \leq i < j+d} s'_i \geq 1, 0 \leq j < L - d \end{aligned} \quad (4)$$

其中,约束条件(a)是限制输出的动态范围;约束条件(b)是确保转换函数  $T(i)$  是单调递增的;约束条件(c)是指定最大的失真,  $d$  是失真上界,即  $D(s) \leq d$ 。

变换函数为:

$$T(i) = \lfloor \sum_{0 \leq j \leq i} s'_j + 0.5 \rfloor, 0 \leq i < L \quad (5)$$

OCTM 线性规划算法弥补了传统的直方图均衡算法的缺陷,效果更佳,实用性广,可以根据不同图像改变和增加约束条件以达到期望效果,并且可以进行多次迭代得到最佳效果。

### 3.2 带阻滤波

#### 3.2.1 滤波器的选择

低通滤波器可使图像变得平滑,但会损失一些边缘细节信息;高通滤波器可使图像锐化,但在保留高频细节的同时也会保留一部分噪声<sup>[7]</sup>。

本文根据 Kinect 红外场景噪声频率点集中在中高频的频谱特征和大量实验选择了巴特沃斯带阻滤波器<sup>[8]</sup>,它结合了低通、高通滤波器在图像处理中的优势,避免了低通、高通滤波的局限性,在对 Kinect 红外场景滤波处理过程中,既保留了场景中高频部分的有用信息,又能滤除场景中的噪声,效果较佳。

#### 3.2.2 带阻滤波器的设计

$n$  阶巴特沃斯带阻滤波器的传递函数为:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left[ \frac{D(u, v)W}{D^2(u, v) - D_0^2} \right]^{2n}} \quad (6)$$

其中,  $D(u, v)$  是点  $(u, v)$  到傅里叶频率原点的距离;  $W$  是阻带宽度;  $D_0$  是阻带的中心半径。

图像去噪的关键是找到噪声对应的频率点,因此可以针对这些明亮突起对带阻滤波器进行参数确定。

在对 Kinect 红外图频谱分析的基础上,可根据频谱图的投影图来定位 Kinect 散斑噪声的频率点。由于这些明亮突起范围小、能量弱,因此采用在一定范围内行方向和列方向的累积分布函数来确定频率点。设 Kinect 频谱图像为  $F(u, v)$ , 其行方向和列方向的累积分布函数<sup>[9]</sup>分别为:

$$S(v) = \sum_{u=u_0}^{n_1} F(u, v), S(u) = \sum_{v=v_0}^{n_2} F(u, v) \quad (7)$$

其中,点  $(u_0, v_0)$  是 Kinect 红外图像频谱图的中心点;  $S(v)$  和  $S(u)$  分别对应垂直方向和水平方向上的频率分布。 $n_1, n_2$  的值取决于明亮突起的强弱和范围,由于明亮突起的范围较小、能量较弱,对明亮突起邻域进行累积计算,可以使其更加突出明显,以确定精确的频率点,本实验中  $n_1 = 8, n_2 = 8$ 。

以频谱图像中心位置(即 0 频)为原点,根据公式(6)得到累积分布函数图,如图 3 和图 4 所示。横轴分别对应垂直和水平方向上的频率,纵轴对应的是灰度累加值。

根据频谱图可知亮点的位置范围,结合累计分布函数图中能量突起位置即可得到亮点的精确位置  $(u, v)$ 。在图 3(a)中,箭头所指峰值横轴坐标为  $v$ ,图 3(b)中箭头所指的峰值横轴坐标为  $u$ ,  $(u, v)$  即为亮点位置。 $w_1$  为垂直方向从 0 频率开始第一

个谷底到箭头所指峰值的横轴距离,  $w_2$  为水平方向从 0 频开始第一个谷底到箭头所指峰值的横轴距离。

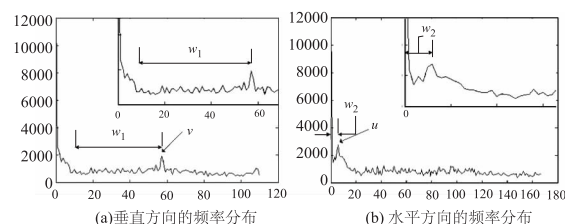


图 3 1.5 m 处 Kinect 红外图像频谱分布函数

当距离较近时, Kinect 红外图像频谱图上除了中央垂直线上有两个较明亮突起,在中央水平方向也有较弱的明亮突起,如图 4 所示。图 4 中实线箭头标示的位置对应中央垂直线上的亮点,此时亮点水平方向上频率为 0,其他参数的确定类似于图 3;虚线箭头标示的位置对应中央水平线上的亮点,图 4(a)图中  $v' = 0$ ,表示此亮点在频谱图中央水平线上,图 4(b)图中虚线箭头所指峰值横轴坐标为  $u'$ ,  $(u', v')$  即为频谱图中央水平线亮点位置。其中,  $w_1'$  是垂直方向从 0 频开始第一个谷底到虚线箭头所指峰值的横轴距离,  $w_2'$  是水平方向从 0 频开始第一个谷底到虚线箭头所指峰值的横轴距离。

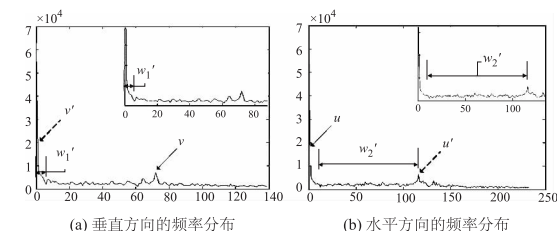


图 4 1.2 m 处 Kinect 红外图像频谱分布函数

出现两个亮点的原因是随着距离的减小,明暗交替的 Kinect 红外图像散斑噪声整体呈现一种随机的状态,中高频噪声点的能量增加,在垂直和水平方向上形成了两个较明显的噪声频率点。

由于中央水平线上的明亮突起比较弱且只有在很小的距离范围内有明显特征,在距离较远(距离大于 1.2 m)时可以仅通过中央垂直线上的明亮突起进行带阻滤波器参数确定。当距离较近(距离小于 1.2 m)时,水平方向上明亮突起能量增加,垂直方向上明亮突起能量减弱,此时阻带需要包括两个频率点。

a) 当距离较远时,带阻滤波器的中心半径  $D_0 = \sqrt{u^2 + v^2}$ ,阻带带宽取  $w_1$  和  $w_2$  之间较大的值。

b) 当距离较近时,需考虑两个频率点,此时令:

$$D_1 = \sqrt{u^2 + v^2}, D_2 = \sqrt{u'^2 + v'^2} \quad (8)$$

设总频带为  $\bar{W}$ ,由数据分析和实验验证可知  $D_1$

$< D_2$  且  $D_2 < \frac{\bar{W}}{2}$ 。

设带阻滤波器的阻带宽度为  $W$ ,  $D_0$  为阻带中心半径。

$$w = \max(w_1, w_2), w' = \max(w_1', w_2')$$

则带阻滤波器的参数为:

$$\begin{cases} w > |D_1 - D_2|, D_0 = D_1, W = w \\ w < |D_1 - D_2|, D_0 = D_2, W = w' \end{cases} \quad (9)$$

当  $w < |D_1 - D_2|$  时,为保证两个频率点都在阻带内,需要以中央水平线上的明亮突起进行带阻滤波器参数的确定,这样就保证了带阻滤波器能够同时滤除这两个频率点的噪声。实验证明此方法对于确定 Kinect 红外图像带阻滤波器参数是有效的。

一般而言, Kinect 红外图像频谱中低频高能量部分非常集中且范围很小,所以阻带的下截止频率的选取较低,通过实验得到了较佳阻带范围:下截止频率为总频带的 0.15 至 0.3,上截止频率为 0.6 至 0.8,具体范围可根据图像特点及频谱特征进行精确调整。

### 3.3 双边滤波

C. Tomasi 于 1998 年提出双边滤波<sup>[10]</sup>的概念。双边滤波<sup>[11-12]</sup>方法是基于高斯滤波方法提出的,其改进在于在采样时不仅考虑像素在空间距离上的关系,同时加入了像素间的相似程度考虑,因而可以在滤波的同时保持边缘。

对于数字图像,双边滤波器的公式如下:

$$\bar{f}(x) = \frac{\sum_{\Omega} w(x, y) \phi[f(x), f(y)] f(y)}{\sum_{\Omega} w(x, y) \phi[f(x), f(y)]} \quad (10)$$

设邻域内的像素点表示为  $y(k, l)$ , 则:

$$w(x, y) = \exp\left[-\frac{(i-k)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_d^2}\right] \quad (11)$$

$$\phi[f(x), f(y)] = \exp\left[-\frac{\|f(x) - f(y)\|^2}{2\sigma_r^2}\right] \quad (12)$$

其中,  $\Omega$  表示中心点的  $(2N+1) \times (2N+1)$  大小的邻域;定义域核  $w(x, y)$  度量了邻域中心点  $x$  和邻域点  $y$  的几何邻近度;值域核  $\phi[f(x), f(y)]$  度量了点  $x$  与点  $y$  的像素亮度相似性。双边滤波器的权系数是由高斯权系数和图像的亮度信息所构成的,滤波器半宽  $N$  越大,平滑作用越强。

本文通过实验对比得出适用于本实验的滤波器参数的取值范围: $\sigma_d$  和  $\sigma_r$  的最佳取值范围在 10 至 40 之间,过大则会过度滤波,图像细节丢失严重,过小则会保留过多噪声,增强效果不佳。 $\sigma_d$  和  $\sigma_r$  的精确数值可根据不同图像的情况而调整。

## 4 实验分析

### 4.1 图像对比度增强

由于没有原始基准图像, Kinect 红外图像的增强效果本来无法衡量,本文采用同场景灰度图像作为基准图像进行客观测试。

目前对于红外图像增强还没有客观评价标准,为了更全面地判断算法的有效性,本文采用了应用广泛的 PSNR 客观评价方法对算法进行客观测试。

图 5 和图 6 是运用 OCTM 算法对图像进行不同次数迭代处理后的输出图像及其以同场景灰度图像作为基准图像而得到的 PSNR 值(传统均衡算法得到的 PSNR 值为 10.11 dB, OCTM 算法得到的值为 11.77 dB)。

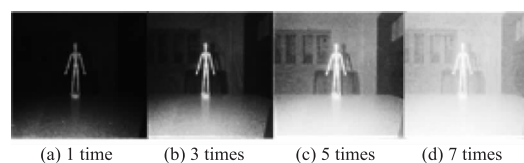


图 5 OCTM 算法不同迭代次数的输出图像

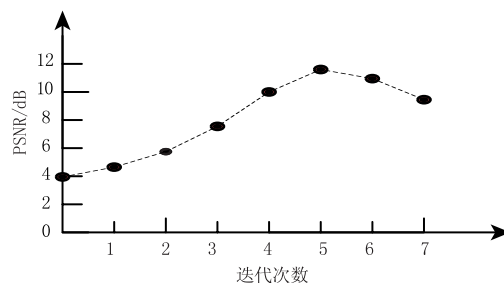


图 6 OCTM 算法的客观评价

由图 5、6 可知, OCTM 算法可根据不同图像的特点进行不同次数的迭代, 达到一个最优对比度。

对同一场景、不同距离、不同目标图像进行实验, 通过多组实验验证, 同一场景不同距离所需 OCTM 次数是一样的, 可以统一, 如图 5、6, 图像的 OCTM 最优迭代次数为 5, 在同场景下, 不同图像的 OCTM 迭代次数均可采用 5。因此对于同一场景不同目标、距离的图像均可采用已确定的最优迭代次数来进行对比度增强处理。

图 7 和表 1 分别对 OCTM 算法和传统直方图均衡(HE)算法从主观和客观上进行了对比。

从表 1 中可看出 OCTM 算法明显优于传统 HE 算法。图 7 中, 传统 HE 算法的输出图像整体偏暗, 视觉效果, 对比度还有待进一步提高, 图 7 中房门上的随机噪声和背景对比不太明显, OCTM 算法的输出图像中噪声和背景目标对比更加清晰, 门上的随机噪声等清晰地显现出来, 能够很好地区分场景内各物体, 视觉效果较好。因此可以看出, 在红外图像处理中, 相比传统的直方图均衡(HE)算法, OCTM



算法可以获得更好的处理效果。

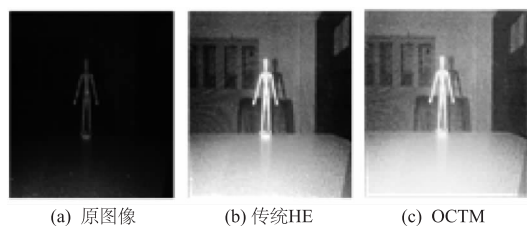


图7 红外图像和不同均衡算法的输出图像

表1 不同均衡算法的输出图像的 PSNR 值

| 场景   | 传统 HE/dB | OCTM/dB |
|------|----------|---------|
| 场景 1 | 5.35     | 5.78    |
| 场景 2 | 8.35     | 11.55   |
| 场景 3 | 9.68     | 12.74   |
| 场景 4 | 10.78    | 13.28   |

#### 4.2 滤波方法比较

针对几组不同的 Kinect 红外图像,分别用传统 HE 方法和带阻滤波器、双边滤波器结合的方法与本文方法处理图像,得到的结果如图 8 所示,图 (a)、(b)、(c)、(d) 中的四个小图分别为原图像和用各个方法处理后的输出图像。

其中带阻滤波器方法和本文方法中带阻滤波器的阻带下截止频率均约为总频带的 0.2,上截止频率均约为总频带的 0.7。双边滤波器方法和本文方法中双边滤波器的半宽约为  $\frac{1}{2}\sigma_d$  (当  $\sigma_d$  为奇数时为  $\frac{1}{2}(\sigma_d + 1)$ ),  $\sigma_d$  和  $\sigma_r$  参数的值如表 2 所示。

Kinect 红外图像中,由于 Kinect 本身成像原理的局限性,不可避免在红外图像中会出现一些阴影区域,外界光照环境和不同材料也会对成像质量带来一定的影响。

由于太阳辐射因素对红外图像具有一定的影响,而且白天景物对太阳发出的红外辐射有反射作用,因此白天 Kinect 红外图像的效果要略好于黑暗环境下 Kinect 红外图像,细节更加明显,滤波效果更好。

对比以上四组图像可看出,对图像进行对比度增强后,利用带阻滤波器滤除噪声,虽然很好地保留了图像细节,但在保留细节的同时也保留了不少噪声;而双边滤波器的特点是在去除噪声的同时可以做边缘保存,但由于对高频信息保留过多,所以图像中的高频噪声不能很好地滤除。本文方法滤波后图像整体平滑,主要细节保留,平坦区域效果很好,边缘附近有少量残余噪声。可以看出,相对于另外两种方法,本文方法在去除了噪声的同时保留了图像的边缘细节,总体效果较好。

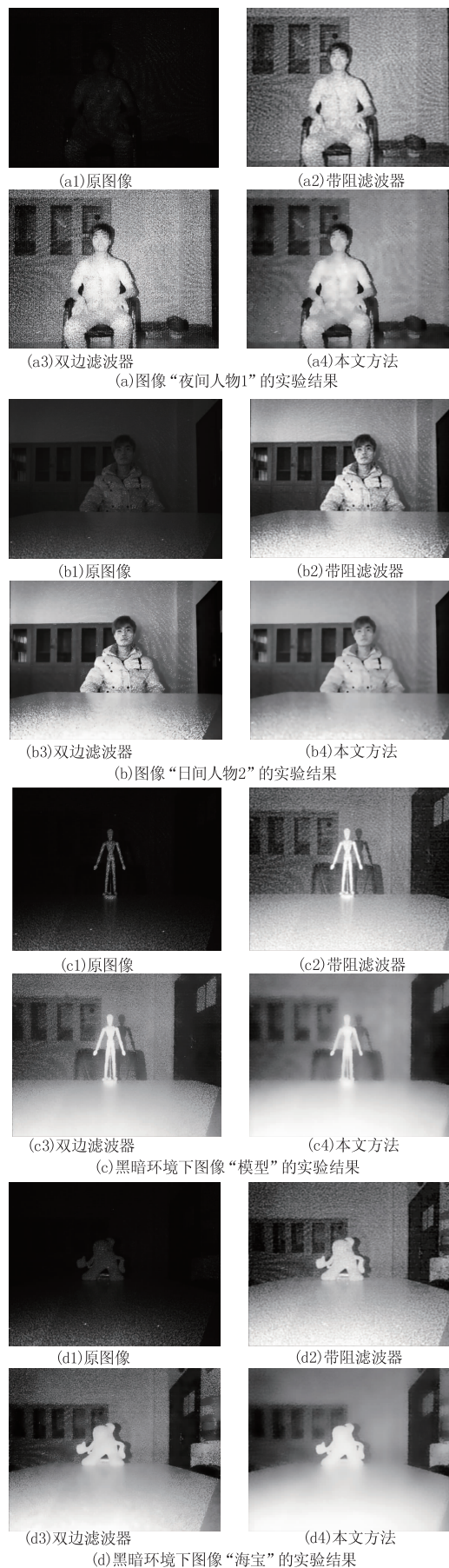


图8 不同图像的实验结果

表2  $\sigma_d$  和  $\sigma_r$  参数的设置

| 图 像    | 双边滤波器      |            | 本文方法       |            |
|--------|------------|------------|------------|------------|
|        | $\sigma_d$ | $\sigma_r$ | $\sigma_d$ | $\sigma_r$ |
| 夜间人物 1 | 30         | 30         | 20         | 20         |
| 日间人物 2 | 10         | 20         | 10         | 25         |
| 模 型    | 30         | 30         | 30         | 40         |
| 海 宝    | 20         | 30         | 30         | 30         |

对传统 HE 算法分别结合带阻滤波器,双边滤波器方法和本文方法进行客观评价,得到的 PSNR 值如表 3 所示。

表3 不同算法的 PSNR 值 dB

|        | 带阻滤波器 | 双边滤波器 | 本文方法  |
|--------|-------|-------|-------|
| 夜间人物 1 | 10.31 | 9.42  | 11.59 |
| 日间人物 2 | 8.52  | 8.45  | 11.57 |
| 模 型    | 10.62 | 10.47 | 12.85 |
| 海 宝    | 11.26 | 11.14 | 14.58 |

由于 Kinect 本身局限性,本文方法对不同距离目标的处理效果有所差异,由于 Kinect 本身光源的局限性,目标物体距离 Kinect 传感器过近将会造成图像效果很差,细节丢失;而距离过远则会丢失目标物体细节,因此为了更好地感知前景目标,目标物体与 Kinect 的距离应保持在 1 m 至 4 m 之间为佳。

## 5 结 论

本文针对红外图像的特点,提出多种算法相结合的方法对红外场景进行增强。分析了 Kinect 的局限性以及其造成的结果,得到了本方法的适用范围;验证了同一场景下不同距离不同目标其最优迭代次数相同,缩短了计算时间;总结了在 Kinect 有效视距内,外界的光照、目标物体的远近对图像的处理效果的影响;通过主客观评价证明了其有效性。但对于质量较差的图像的处理效果和图像的细节保留方面有一定的局限性,仍需改进。

实验结果表明,本文增强方法对不同类型的 Kinect 红外场景进行处理效果较为理想,对于黑暗环境下的 Kinect 红外场景增强效果明显;在去除图像噪声的同时,最大程度保留了图像的细节信息,对弱照明场景下的图像监控等实际应用有很好的适用性。同时该方法也为 Kinect 红外场景的进一步研究提供了新思路。

## 参考文献:

- [1] YU Tao. The application development and practice of kinect[M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 56 - 59. (in Chinese)  
余涛. Kinect 应用开发实战[M]. 北京:机械工业出版社, 2013: 56 - 59.

社, 2013: 56 - 59.

- [2] Javier Garcia, Zeev Zalevsky. Range mapping using speckle decorrelation [P]. US: US 7433024 B2, NO. 7, Oct, 2008.
- [3] HE Hai-ming, QI Dong-lian, ZHANG Guo-yue, et al. Fast and efficient mean filtering algorithm for removing the salt and pepper noise [J]. Laser & Infrared, 2014, 44 (4): 469 - 472. (in Chinese)  
何海明, 齐冬莲, 张国月, 等. 快速高效去除图像椒盐噪声的均值滤波算法 [J]. 激光与红外, 2014, 44 (4): 469 - 472.
- [4] DENG Yue, WANG Yanjie, LI Jingyu, et al. Improvement of enhancement algorithm for aerial image [J]. Laser & Infrared, 2012, 42 (9): 1080 - 1085. (in Chinese)  
邓玥, 王延杰, 李静宇等. 天空区域图像的增强算法的改进 [J]. 激光与红外, 2012, 42 (9): 1080 - 1085.
- [5] E Reinhard, G Ward, S Pattanaik, P Debevec. High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting [M]. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 2005.
- [6] Xiaolin Wu. A Linear programming approach for optimal contrast-tone mapping [J]. IEEE transactions on image processing, 2011, 20 (5): 1262 - 1272.
- [7] ZHANG Qiang, WANG Zhenglin. Proficient in MATLAB image processing [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 135 - 174. (in Chinese)  
张强, 王正林. 精通 MATLAB 图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 135 - 174.
- [8] CHANG Jiang, GUO Lei, SHEN Dahai. Fourier translate-based band-hinder filter of fingerprint image preprocessing [J]. Application Research of Computers, 2007, 24 (3): 300 - 305. (in Chinese)  
常江, 郭雷, 陈大海. 基于傅里叶变换的指纹带阻滤波方法 [J]. 计算机应用研究, 2007, 24 (3): 300 - 305.
- [9] ZOU Yuanyuan, GE Qingping, HAN Yu, et al. Stripe noise of THz image processing based on frequency filtering [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45 (17): 241 - 243. (in Chinese)  
邹园园, 葛庆平, 韩煜, 等. 基于频域滤波的 THz 图像条纹噪声处理 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (17): 241 - 243.
- [10] C Tomasi, R Manduchi. Bilateral filtering for gray and color images [J]. IEEE International Conference on Computer Vision, 1998: 839 - 846.
- [11] Kunal Narayan Chaudhury, Daniel Sage, Michael Unser. Fast O(1) Bilateral Filtering Using Trigonometric Range Kernels [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20 (12): 3376 - 3382.
- [12] Kunal N. Chaudhury. Acceleration of the Shiftable O(1) Algorithm for Bilateral Filtering and Nonlocal Means [J]. IEEE transactions on image processing, 2013, 22 (4): 1291 - 1300.