

一种适用于低照度的三基色动态采集方法研究

陶声祥, 吴海兵

(陆军军官学院, 合肥 230031)

摘要: 由于光照度不足, 现有白天彩色成像技术在夜间无法成彩色图像。提出一种适用于低照度条件下的三基色动态采集方法, 采用滤色轮对物体反射光过滤, 利用像增强器对过滤后的单色光放大, 使用图像传感器耦合像增强器上的单色光图像, 实现低照度条件下目标三基色图像的采集。采用直接映射方法将三基色图像融合成彩色图像, 利用无参考图像的评价方法对彩色图像质量进行了评价。实验和评价结果表明, 在低照度条件下, 采用“分离—放大—融合”的方案获取彩色图像在理论和实践上都是可行的, 且在单色采集时可以通过增长曝光时间的手段来提升最终彩色图像的亮度和对比度。对低照度条件下彩色成像系统的设计和研发具有一定的借鉴意义。

关键词: 三基色; 动态采集; 低照度; 像增强器; 滤光片; 图像质量评价

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)06-0091-05

A Dynamic Method for Three-Primary-Color Image Acquisition Under Low-Light-Level Condition

TAO Sheng-xiang, WU Hai-bing

(Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: The typical daytime color imaging technology can not acquire color images at night due to low illumination. Thus a three-primary-color image dynamic acquisition method adaptive for Low-Light-Level (LLL) condition is proposed. A filter wheel is used for filtering the reflected light, an image intensifier amplifies the monochrome light, the image sensor captures the monochrome images on image intensifier, thus to implement dynamic acquisition of three-primary-color images under LLL condition. Direct mapping method is adopted so as to fuse the three-primary-color image into a color image, and the objective non-reference assessment method is used to assess the quality of the fusion color images. Experimental results show that: 1) Under LLL condition, the “separation-amplification-fusion” scheme is feasible for acquiring a color image both in theory and practice; and 2) The brightness and contrast of color images can be enhanced by lengthening the exposure time. This research can be used as a reference for the design and development of color imaging system under LLL condition.

Key words: tricolor; dynamic acquisition; Low-Light-Level (LLL); image intensifier; filter; image quality assessment

0 引言

人类获取的80%以上信息来自视觉, 但人眼视觉只能响应390~780 nm的可见光波段。在夜晚微弱光照(低照度)条件下, 受限于生理上固有的缺陷, 人眼不仅逐渐失去颜色分辨能力, 甚至会因灵敏度下降而

无法获得场景的图像。随着科学技术的进步, 20世纪发明的微光夜视仪和红外热像仪等夜视仪器, 拓展了人类的光谱响应范围和黑暗中观察景物的能力, 但现阶段夜视仪器所成图像多为单色图像。与彩色图像相比, 单色图像缺乏视觉上的深度感, 特别是在军事侦察领域, 深度感的缺失会影响到对目标的探测和判别。随着夜视技术的发展, 迫切希望人眼在低照度条件下可以像在白天一样获取彩色图像。近年来, 彩色夜视技术受到西方发达国家的重视^[1]。

Retinex色彩理论指出^[2], 图像由两部分组成: 一

收稿日期: 2016-04-12 修回日期: 2016-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(61272333)

作者简介: 陶声祥(1967—), 男, 安徽芜湖人, 博士, 教授, 研究方向为全天时成像。

部分是场景中物体的照射光分量,也称为照射光图像,对应图像的低频部分;另一部分是场景中物体的反射光分量,也称为反射光图像,对应图像的高频部分。低照度条件下,由于光照度不够,导致获取的图像偏暗,而获取图像中物体呈现的颜色则由物体反射光部分决定。由此,可以设计光学过滤仪器,对物体反射光进行过滤,根据 RGB 彩色模型,如果获取了物体的 R、G 和 B 三基色图像,通过融合就能得到反映物体真实颜色的彩色图像。

1 低照度条件下彩色成像方法

要在低照度条件下获取彩色图像,三基色的采集是关键。依据三基色的获取方法不同,现阶段的彩色成像方法可以归纳为以下 4 种。

1.1 滤色轮过滤

常见的滤色轮,也被称为圆孔型滤色轮,主要通过圆面上部署若干个圆形滤色片而制成。如要实现三基色的过滤,则滤色轮上至少需要部署红、绿和蓝 3 个圆形滤色片。美国 NASA 好奇号火星探测器上装有 17 台相机,两台桅杆主照相机 M-34 和 M-100 装有 8 个滤镜的转盘,这些滤镜使得相机可以拍摄真彩色、单色和近红外照片,还能直接对着太阳拍照,估测火星大气中的尘埃密度。

现阶段的滤色轮过滤法主要用于白天成像,其优点是成本低,可以动态获取目标的三基色图像以形成彩色图像;缺点是容易受振动等因素影响导致套色不准。

1.2 三棱镜分光

多数专业摄像机采用 3CCD 或 3CMOS 系统,其核心是采用三棱镜将经物镜进入的光分为 R、G 和 B 3 部分,由 3CCD 或 3CMOS 图像传感器同时采集后同时输出 R、G 和 B 三基色图像,最后合成一幅色彩精确的图像,这是现阶段在白天获取三基色效果最好的彩色成像方案。

三棱镜分光彩色成像方案使用了 3 个传感器导致成本偏高,且光学系统与传感器位置排列需要进行严格校准,限制了其使用范围。

1.3 彩色滤波阵列

目前,通用的彩色成像设备都使用单板的图像传感器,在光电二极管和镜头之间利用彩色滤光片阵列(CFA)获取三基色图像数据,实际上,图像传感器输出的是每个像素点只含有红、绿或蓝中一种颜色分量的马赛克图像。为了获得全彩色图像,需要用其邻域像素的信号近似计算出被滤掉的另外两种颜色分量,该过程称为颜色插值。CFA 的排列方式主要有 Bayer、Mosaic 和

Stripe 等,其中,应用最广泛的排列方式由 BAYER 博士发明,称为 Bayer 模板^[3],已被现阶段绝大部分的彩色图像传感器所采用。

与其他彩色成像方案相比,彩色滤波阵列只需要一片图像传感器,成本低,且厂家已将彩色滤波阵列集成在传感器上,通过算法进行颜色插值即可还原彩色图像,简化了成像系统的设计。因此,现在大多数数码相机、单反相机均采用该方式拍摄彩色图像。

1.4 多波段图像融合

低照度条件下,光照度不够导致现有的滤色轮过滤、三棱镜分光和彩色滤波阵列等方法均无法有效地采集到三基色图像,进而导致在低照度条件下无法获取彩色图像。

现阶段,在低照度条件下的彩色成像主要采用微光、红外等图像融合而成,如美国海军研究室 NRL 方法中,以红外热像仪获取的图像作为 R 通道,G 通道和 B 通道均采用微光夜视仪获取图像,融合出夜视条件下的彩色图像。此外,国外还有诸如 MIT、TNO 以及色彩传递等伪彩色算法^[4-7]。与此同时,国内很多学者对双谱、三谱的单双通道微光彩色融合夜视技术进行研究,如微光与红外热像融合彩色夜视技术、微光与长波红外融合彩色夜视技术、紫外与微光图像融合彩色夜视技术、微光与中波长波红外的三谱彩色融合夜视技术等^[8-10]。

但这些彩色融合夜视技术,实际上融合出来的图像是一种“假彩色”,并不能反映物体的真实颜色,融合的彩色图像与真实目标的颜色通常有很大色差。

2 低照度条件下三基色动态采集方法

2.1 三基色动态采集原理

要在低照度条件下获取目标的真彩色图像,首先需要解决的是低照度条件下的三基色动态采集。现有的图像传感器在低照度(野外有月亮无照明条件下照度约为 10^{-1} lx 数量级)条件下,由于进入成像系统的光子数较少,会出现曝光不足,只能形成单色图像,在照度更低(野外无月光无照明的星光条件下照度约为 10^{-3} lx 数量级)的条件下,甚至无法成像。微光夜视仪成像的关键是利用像增强器进行“光放大”,而且随着像增强器性能的提升,其亮度增益越来越大,使得在照度更低的情况下微光夜视仪也可成像。

据此,本文提出的低照度条件下的三基色动态采集方法,采用滤色轮对物体反射光进行过滤,利用像增强器对过滤后的单色光进行放大,然后利用图像传感器耦合像增强器上的单色光图像,进而融合出彩色图像,其原理如图 1 所示。

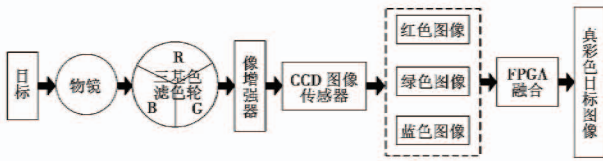


图 1 低照度条件下的三基色动态采集原理
Fig. 1 Principle of tri-color dynamic acquisition under LLL condition

2.2 三基色滤光片设计

国际照明委员会对三基色光的波长和中心波长做了规定^[11],红光波长范围为 622 ~ 760 nm,中心波长 $\lambda_r = 700$ nm;绿光波长范围为 492 ~ 577 nm,中心波长 $\lambda_g = 546.1$ nm;蓝光波长范围为 435 ~ 450 nm,中心波长 $\lambda_b = 435.8$ nm。

三基色滤光片采用了 Febry-Perot (F-P) 滤光片,F-P 过滤片是目前最常用的窄带干涉滤光片。通过调节 F-P 滤光片的相关参量,使其透射峰的中心波长为三基色中心波长之一,同时,在另外两个三基色波长处的反射率足够大,最后将它们叠加在一起,即可获得满足设计要求的三基色滤光片。

三基色 F-P 滤光片的结构为^[12]

$$air | (\alpha L \beta H)^n C (\beta H \alpha L)^n | sub \quad (1)$$

式中: α 和 β 为薄膜光学厚度的系数, $nd = x \frac{\lambda_0}{4}$, x 取值为 α 或 β , λ_0 表示参考波长;设计中滤光片选取的材料是对可见光透明的常用薄膜材料, L 为 SiO_2 薄膜(折射率为 1.458); H 为 Ta_2O_5 薄膜(折射率为 2.05); C 表示腔体,取腔体材料为熔融石英固体(折射率为 1.458);基底材料为玻璃(折射率为 1.52)。

通过改变 α 与 β 的值与腔体厚度,可以得到透射峰中心波长在红光中心波长、绿光中心波长或蓝光中心波长,并在另外两个三基色的波长处有较高反射率的 F-P 滤光片,它们在可见光区的透射谱如图 2 所示。

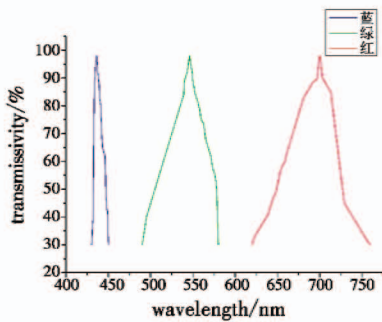


图 2 滤光片的光谱透过率
Fig. 2 The spectrum transmittance of filter

2.3 扇形滤色轮设计

目前使用最广泛的基于 Bayer CFA 的彩色图像传感器在低照度条件之所以难以形成彩色图像,除了光照

度不足以外,曝光时间不够也是一个非常重要的原因。

根据光学系统像面照度公式可知,在 CCD 上某处的辐照度为^[13]

$$E_s = \frac{\pi(D/2)^2 \tau_0 \cos^4 \theta}{f^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_e(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中: θ 为该处所对应的视场角; $L_e(\lambda)$ 为目标辐射的光谱亮度; τ_0 为光学系统的总透过率; f 为成像镜的焦距; D 为成像镜的孔径; λ_1 和 λ_2 为波长。

设 CCD 图像传感器的积分时间为 T_{exp} ,则该像元处在积分时间内接收到的光子数为

$$S_s = \frac{\pi D^2 \tau_0 s_d T_{exp} \cos^4 \theta}{4 f^2 h c} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_e(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

式中: s_d 为 CCD 像元面积; h 为普朗克常量; c 为光速。

由式(3)可知,在其他成像条件确定的情况下,CCD 像元上接收到的光子数与积分时间成正比。在低照度情况下,可以通过增加积分时间来增加接收的光子数。此外,在 CCD 前增加像增强器后,光子透过率还会受影响。因此,在设计三基色滤色轮时,应该尽可能延长滤色轮在每个基色色块的曝光时间。

在参考现有圆孔型滤色轮的基础上,为了增加图像传感器在采集单色图像时的曝光时间,将滤色轮设计成扇形结构,即圆形玻璃轮片等分为 3 份,然后在 3 块扇形玻璃片上镀三基色滤光片,制作完成的扇形滤色轮外观如图 3 所示。

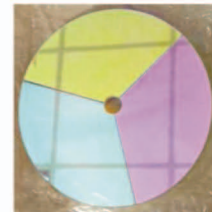


图 3 扇形滤色轮外观图

Fig. 3 Schematic diagram of fanshaped filter wheel

2.4 扇形滤色轮单色曝光时间分析

为了将本文设计的扇形滤色轮与传统圆孔型滤色轮过滤效果进行对比分析,做出如下假设:

- 1) 2 个滤色轮的圆形半径一样,假设半径为 R ;
- 2) 2 个滤色轮旋转一周所需的时间一样,假设均为时间 T (单位为 ms);
- 3) 圆孔型滤色轮上圆形滤色片半径为 r ,圆形滤色片中心与滤色轮中心之间的距离为固定值,设为 d 。

如采用圆孔型滤色轮,则在圆上至少需要部署 3 块圆形三基色过滤片,实际上留给 CCD 的有效积分时间就是滤色轮上每块小滤色片旋转到 CCD 前面的间隔时间。目标反射光经过旋转的圆孔型滤色轮单个滤色片到达 CCD 图像传感器的积分时间,可以简化为过滤轮旋转 θ 角度的时间,如图 4 所示。

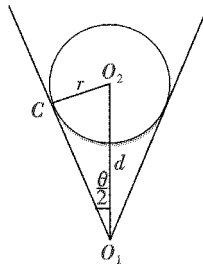


图4 圆孔型滤色轮积分角度

Fig. 4 Integral angle of circular hole shaped filter wheel

由于 O_1C 外切圆 O_2 , 线段 O_1O_2 等分 $\angle\theta$, 且易知 $O_2C \perp O_1C$, 则

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{r}{d} \Rightarrow \theta = 2 \arcsin \frac{r}{d} \quad (4)$$

由此, 圆孔型滤色轮旋转后 CCD 在单色滤色片的积分时间为

$$\frac{\theta}{360} \times T = \frac{T}{180} \times \arcsin \frac{r}{d} \quad (5)$$

而本文设计的扇形滤色轮在获取单色图像时的积分时间, 可记为单色块滤光片经过 CCD 的时间, 即 $\frac{T}{3}$ 。

使用圆孔型滤色轮与扇形滤色轮时, CCD 获取单色图像的积分时间之比为 $\left(\frac{T}{180} \times \arcsin \frac{r}{d}\right) / \left(\frac{T}{3}\right) = \frac{1}{60} \times \arcsin \frac{r}{d}$ 。

3 实验结果与评价

3.1 三基色动态采集实验

在微光实验室进行了三基色动态采集实验, 为了比较成像效果, 使用相同的滤色片制作了圆孔型滤色轮和扇形滤色轮, 实验基本参数如下。

1) 实验室内放置了绿色色球、红色瓶体的灭火器、绿色热水瓶、军绿色大衣、白色背景墙和黑色凳子等物体。

2) 实验使用国产超二代像增强器 1XZ18/18WHS-PD, 其光阴极灵敏度典型值为 $650 \mu\text{A} \cdot \text{lm}^{-1}$, 中心分辨力典型值为 $55 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$, 亮度增益为 $8000 \sim 12000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$, 信噪比为 20。

3) 滤色轮基本参数: 扇形和圆孔型滤色轮半径均为 30 mm; 圆孔型滤色轮上部部署的圆型三基色滤光片直径为 15 mm, 滤光片中心和滤色轮中心距离为 15 mm, 由式(4)可知, 圆孔型滤色轮积分角度为 60° 。

4) 借助 FPGA 上编写的 VHDL 控制逻辑实现对滤色轮速度和 CCD 的曝光时间的精确控制, 两个滤色轮旋转速度均为 25 转/s (即每秒产生 75 帧单色图像)。由式(5)可计算出圆孔型滤色轮单色图像积分时间为

6.67 ms, 扇形滤色轮单色图像积分时间为 13.33 ms。在程序控制下, 当滤色轮的单色滤光片进入像增强器范围时, 启动 CCD 开始曝光, 经过积分时间后, 输出该单色图像。

5) 实验时光照度为 $1 \times 10^{-3} \text{ lx}$, 通过 8.472 m 的平行光管观察。

经多次实验, 选取其中一组经过两个滤色轮所成的三基色图像, 如图 5 和图 6 所示。

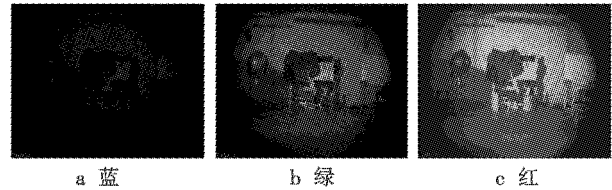


图5 圆孔型滤色轮动态采集效果

Fig. 5 Dynamic acquisition effects of circular hole shaped filter wheel

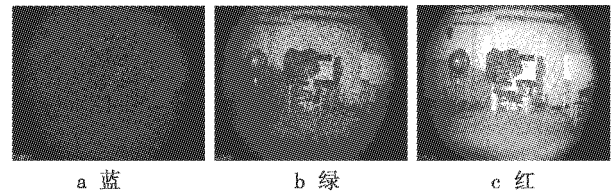


图6 扇形滤色轮动态采集效果

Fig. 6 Dynamic acquisition effects of fanshaped filter wheel

从人眼直接观测来看, 扇形滤色轮过滤后的三基色图像与圆孔型滤色轮过滤后的三基色图像相比, 在亮度上有很大提升, 图像中物体更易分辨。

3.2 彩色图像融合实验

本文设计的低照度条件下的三基色动态采集方法, 采集目标三基色图像的最终目的是获得低照度条件下的目标彩色图像。为此, 将采集的三基色图像融合成彩色图像, 融合方法采用直接映射法, 即 RGB 每个通道分别对应三基色图像, 融合后的图像如图 7 所示。

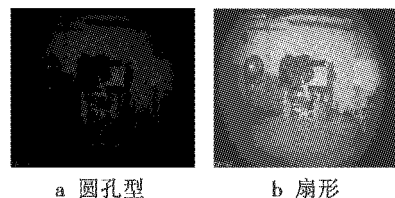


图7 圆孔型滤色轮和扇形滤色轮融合后彩色图像
Fig. 7 Fused color images of circular hole shaped and fanshaped filter wheel

3.3 实验结果分析

为更好地对实验结果进行分析, 采用了图像质量评价的方法, 现有的图像质量评价方法包括主观评价方法和客观评价方法。通常提到的图像质量评价算法是指客观评价算法。客观评价算法根据其参考图像

的依赖程度,可分成3类^[14]:1)全参考,需要和参考图像上的像素点做一一对应的比较;2)半参考,只需要和参考图像上的部分统计特征做比较;3)无参考,不需要具体的参考图像。

由于本文设计的三基色动态采集方法,其最终目的是获得低照度条件下目标的彩色图像。而彩色图像是由三基色图像融合而成,本身并不存在参考图像,不能使用客观评价中的全参考和半参考方法,为此,只能选用经典的客观评价方法中的灰度均值、灰度方差和信息熵等指标。限于篇幅,灰度均值、灰度方差和图像信息熵^[15]的计算公式不再赘述。

表1给出了对圆孔型滤色轮和扇形滤色轮采集的三基色图像融合后的彩色图像质量评价结果。

表1 两种滤色轮获取的彩色图像质量评价结果

Table 1 Image quality assessment results

光照度/lx	图像源	均值	方差	信息熵
1×10^{-3}	圆孔型滤色轮融合后彩色图像	27.87	235.04	4.92
	扇形滤色轮融合后彩色图像	103.19	1865.53	6.93

从表1结果可以看出,在照度为 10^{-3} lx时,扇形滤色轮过滤后融合的图像在均值、方差和熵3项指标上均优于圆孔型滤色轮过滤后融合的图像,从人眼主观分辨来看,图7融合后的图像在亮度和对比度上都显著提升。

4 结论

本文提出了一种适用于低照度条件下的三基色动态采集方法,通过设计扇形滤色轮实现低照度条件下目标反射光的三基色分离,引入像增强器对单色光进行放大,然后通过 CCD 图像传感器获取经过放大的三基色图像。采用国产超二代像增强器和 CCD 相机搭建实验系统,在微光实验室进行三基色采集实验,获得了经过扇形滤色轮和经过圆孔型滤色轮的三基色图像,对两个滤色轮采集的三基色图像分别融合成彩色图像,对彩色图像质量进行了评价,评价结果表明:在低照度条件下,经扇形滤色轮过滤后融合的图像在均值、方差和熵3项指标上均优于圆孔型滤色轮过滤后融合的图像。本文的研究从理论和实践上证明了在低照度条件下,采用“分离—放大—融合”的方案获取彩色图像在理论和实践上的可行性。

在低照度条件下成像,像增强器的性能对实验影响较大,文献[16]认为加入滤光片降低了像增强器的信噪比,对加入滤光片前后信噪比进行了分析,并增加一个透明玻璃片获取全波图像,将全波图像作为一定配比用于彩色图像的融合,从而弥补因像增强器而导

致的信噪比的降低。实际上,在三基色滤光片之外再增加一块透明玻璃片,进一步减少了 CCD 采集每个基色光图像的时间,本项目组在完成三基色图像动态采集后,目前正在研究三基色图像去噪和增强算法,并已取得了较好的去噪效果。

参考文献

- [1] 骆媛,王岭雪,金伟其,等.微光(可见光)/红外彩色夜视技术处理算法及系统进展[J].红外技术,2010,32(6):337-344.
- [2] Al-AMEEN Z, SULONG G. A new algorithm for improving the low contrast of computed tomography images using tuned brightness controlled single-scale Retinex[J]. Scanning, 2015, 37(2):116-125.
- [3] BAYER B E. Color imaging array; US, 3971065 [P]. 1976-07-20.
- [4] TOET A, HOGERVORST M A, VAN SON R, et al. Augmenting full colour-fused multi-band night vision imagery with synthetic imagery in real-time[J]. International Journal of Image and Data Fusion, 2011, 2(4):287-308.
- [5] AGUILAR M, FAY D A, ROSS W D, et al. Real-time fusion of low-light CCD and uncooled IR imagery for color night vision[C]//SPIE, 1998, 3364:124-135.
- [6] QI B, GAO K, TIAN Y X, et al. A novel false color mapping model-based fusion method of visual and infrared images[C]//International Conference on Optical Instruments & Technology, 2013. doi:10.1117/12.2036249.
- [7] TOET A. Colorizing single band intensified nightvision images[J]. Displays, 2005, 26(1):15-21.
- [8] 杨文彬,张俊举,许辉,等.基于目标特性分析的红外与微光图像融合算法[J].激光与红外,2014,44(1):56-60.
- [9] 张毅,柏连发,陈钱,等.基于像素空间相关度的微光双谱图像实时配准[J].南京理工大学学报,2009,33(4):506-510.
- [10] 杨少魁,刘文.一种微光与红外图像彩色融合方法[J].红外与激光工程,2014,43(5):1654-1659.
- [11] SUN Y P, LOU C, JIANG Z W, et al. Experimental research of representative wavelengths of tricolor for color CCD camera[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(2):108-111.
- [12] 唐雄,姚兰芳.三基色滤光片的设计[J].激光技术,2014,38(2):274-277.

(下转第105页)

观察图10可知,目标物体的三维重构效果良好,能够较好地反映出物体的三维视觉信息。

2.5 技术指标计算

本实验基于如下假设:忽略环境光的影响;投影墙面和光栅均垂直水平面向上;照相机成像符合标准的针孔模型,忽略镜片变形等误差影响。

通过测量可得,本系统中投影仪光心到投影墙面之间的距离 $d = 2240 \text{ mm}$,投影仪光心与照相机光心之间的距离 $m = 521 \text{ mm}$,放上物体之后光栅移动的距离 s 的最小值为一个光栅的宽度,即 $s = 5.7 \text{ mm}$,代入式

$$(5) \text{ 可求得系统的分辨率 } \frac{\partial Z}{\partial s} \approx 4 \text{ mm}。$$

标定好投影仪和照相机的位置后,系统扫描时间主要耗费在不同编码光栅图像的切换和拍摄上。计算机成像的时间则相对很短,可以忽略。由于采用了8位格雷码,因此一共需要拍摄16张照片,扫描大约用时24 s,系统的扫描范围为1480 mm,从而可计算出等效扫描速度为62 mm/s。

由此可见,该系统在分辨率和扫描时间上性能优越。

3 结束语

本文基于光栅投影法建立了3D扫描成像模型,并利用普通的照相机、投影仪和计算机等设备搭建系统进行了实验,实现了高速度高分辨3D扫描成像,同时体现了系统低成本、易操作的特点。实际上,该模型在某些方面还存在拓展与改进的空间,例如在单目扫描系统的基础上构建多目扫描系统,使用多个照相机从各个方向对目标物体进行拍照,通过图像拼接生成更加完整的3D图像;探索更好的编码方式,使得对运

动物体也能进行3D扫描成像。

参考文献

- [1] 侯风芝. 格雷码结合相移的编码结构光三维重建技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [2] TONG J, ZHOU J, LIU L G, et al. Scanning 3D full human bodies using Kinects [J]. Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(4):643-650.
- [3] 吕乃光,孙鹏,姜小平,等. 结构光三维视觉测量关键技术的研究[J]. 北京信息科技大学学报,2010,25(1):1-5.
- [4] 朱江涛. 基于Kinect的人体三维重建与尺寸测量[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2015.
- [5] 冯丰. 相机标定和三维重建中球体的应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [6] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1):10-22.
- [7] 陈彦军. 基于编码结构光的三维重建关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [8] 李托拓,胡锋,耿征. 基于结构光的三维成像技术[J]. 网络新媒体技术,2012,1(1):22-33.
- [9] 王中任,张明,梅顺齐. 基于结构光的反光工件在机三维重构[J]. 制造业自动化,2015,37(10):9-12.
- [10] MORENO D, TAUBIN G. Simple, accurate, and robust projector-camera calibration [C]//International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission, 2012:464-471.
- [11] 综述[J]. 激光与红外,2014,44(9):966-971.
- [12] 赵宝玮,相里斌,吕群波,等. 机械快门对大面阵滤光片型多光谱相机成像的影响及改进[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(7):1982-1986.
- [13] 矫英祺,任国全,李冬伟. 光电系统图像质量评价方法
- [14] 张勇,金伟其. 夜视融合图像质量客观评价方法[J]. 红外与激光工程,2013,42(5):1360-1365.
- [15] 陈一超,胡文刚,武东生,等. 三波段微光彩色夜视方法研究[J]. 应用光学,2015,36(3):430-434.

欢迎订阅期刊 欢迎刊登广告