

远距离弱小目标视觉测量系统探测能力模型研究

刘美莲¹ 李爽²

(1.北京工商大学 北京 100048;

2.郑州旅游职业学院 旅游商贸系, 郑州 450009)

摘 要 在远距离视觉测量过程中,视觉测量系统参数选择不当,将无法使被测目标成像,从而严重影响视觉测量系统的探测能力。根据远距离弱小目标的成像特点,研究了弱小目标成像与目标光照度、成像距离、传感器灵敏度、动态范围、曝光时间及光学系统光孔大小等参数的关系,建立了远距离弱小目标视觉测量系统的极限探测距离模型,为远距离弱小目标视觉测量系统的参数选型提供了理论依据。为了验证成像系统极限作用距离模型在具体应用中的有效性,对具体的视觉测量系统进行了探测能力试验。试验表明,测量值与计算值基本一致,特别是两者的变化趋势一致,证明该模型基本正确,可用于视觉测量系统的探测能力估计。

关键词 视觉测量系统;探测能力;远距离;弱小目标

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2012)08-0177-04

Study of Detect Capability Model of Long-range Visual Measurement System for Weak Small Target

LIU Meilian, LI Shuang

(1.Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2.Zhengzhou Tourism College, Zhengzhou 450009, China)

Abstract: During the measurement distance vision, vision measurement system argument poorly chosen, will not be able to make the target Imaging to be measured, thereby seriously affecting the Visual detection capability of measuring systems. According to the distance-weak target imaging characteristics, study of weak target imaging and target illumination distance, imaging, sensor sensitivity, dynamic range, exposure time and light hole size and other parameters of the optical system, established distance limit detection range of small target Visual measurement system model for distance Dim target provides a theoretical basis for the selection of vision measurement system argument. In order to verify the operating range in model specific application imaging systems limit the validity of vision measurement system for the detection of the specific ability tests. Tests showed: basically the same measurement and calculation values, in particular a combination of trend line, prove that the model basic right, can be used for Visual detection capability estimation of measurement systems.

Key words: visual measurement system; detection; distance; Dim-small target

0 引言

探测能力也称作用距离,用定目标成像的最远探测距离或定距离成像的最小探测目标表征。探测能力

是远距离视觉测量系统的重要设计指标。CCD成像是将被测目标发出的光能通过光学系统收集、由感光材料转换为电能,以相应的形式读取、传递数据,通过信号处理系统,最终形成数字图像的过程。弱小目标在

收稿日期:2012-06-11

基金项目:北京市教委项目(20061D0500300139)。

作者简介:刘美莲(1972-),女,山东潍坊人,硕士,讲师,研究方向:自动控制技术。

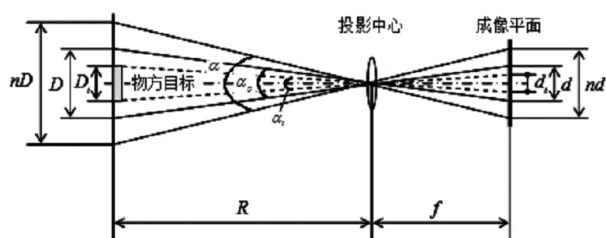


图1 弱小目标成像原理

Fig.1 Weak small targets with imaging principle

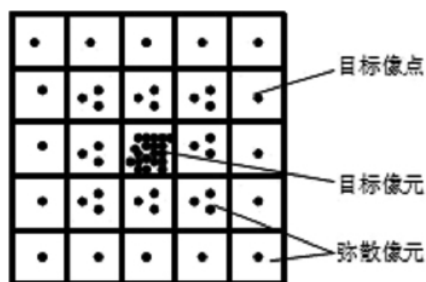


图2 弥散成像示意图

Fig.2 Dispersion imaging schemes

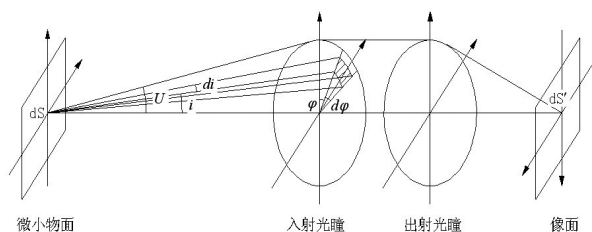


图3 光学系统的光能传递原理

Fig. 3 Light energy transfer principle of the optical system

CCD上成像,要经过一系列能量衰减和扩散过程,如果视觉测量系统的参数选择不当,则很难被CCD成像。即使成像,也会因为弱小目标自身强度弱、成像距离远,而被强大的背景噪声干扰,很难检测提取,从而影响视觉测量系统的探测能力。因此,研究视觉测量系统探测能力与系统参数之间的关系是远距离弱小目标视觉测量系统的重要内容。目前,关于视觉测量技术的研究多集中于近距离的目标测量^[1,2],此领域的研究多注重提高被测目标细节的成像质量,可通过提高图像传感器的分辨率和灵敏度实现,很少关注视觉测量系统的探测能力研究。文献^[3,4]对远距离小目标的视觉测量方法进行了研究,但均没有涉及视觉测量系统探测能力的研究,其研究内容均以测量系统能探测到目标为前提。文献^[5]对远距离视觉测量系统的探测能力进行了初步研究,但只是研究了部分参数对系统探测能力的影响,没有建立完整的视觉测量系统探测能力模型^[5]。

本文针对远距离弱小目标视觉测量的需求,研究了系统参数与探测能力之间的关系,建立了完整的探测能力模型,为远距离弱小目标的视觉测量系统的构建提供理论依据。

1 弱小目标成像

1.1 弱小目标成像模型

当弱小目标与CCD成像系统相距很远,目标相对于成像系统的张角小于等于成像系统的单像素视场角时,弱小目标发出的光经过大气传输进入光学系统进行成像的过程中,不但能量进行了衰减,还会因为各种因素引起目标像点的弥散。图1为弱小目标成像模型。 D_t 为被测物方目标尺寸; μ_t 为根据小孔成像计算的理论成像尺寸; μ 为CCD的单个像素单元尺寸,在远距离弱小目标的极限成像情况下 $\mu_t \leq \mu$; μD 为成像系统单像素视场在物方目标处所对应的物方尺寸; μnd 为弱小目标的弥散像尺寸; μnD 为弱小目标的弥散像由小孔成像理论计算的被测物方目标处的物方尺寸; α_t 为物方目标的视场角; μ_p 为单个CCD像素单元的视场角; μ 为物方目标弥散像的视场角; R 是物方目标与投影中心的距离; f 是光学系统的焦距。

1.2 弱小目标成像弥散系数

由于弥散因素的存在,目标像点会偏离目标像元,而落在周围的像元上成像,即弥散像元,导致弱小目标的实际成像尺寸大于小孔成像的理论计算尺寸。从而,弥散成像也导致了目标像点处的能量分散,部分能量分散到了弥散像的边缘,弱小目标弥散像边缘像素灰度与背景像素灰度差别较小。将目标像元得到的光通量 Φ_o 与被测目标发出的光通量 Φ_t 之比称为弱小目标的成像弥散系数(k)。

如图2所示,根据小孔成像模型,弱小目标的像点应落在目标像元上。由于弥散因素的随机性,目标像点的分布符合以目标像元为中心的正态分布。以图2中目标像元中心为坐标原点,以像素坐标为正态分布概率函数的自变量(δ),利用正态分布概率函数可计算不同弥散像元个数时的标准差(σ)。可计算出弱小目标的弥散成像系数为:

$$k = \frac{Q_o}{Q_t} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-0.5}^{0.5} e^{-\delta^2/(2\sigma^2)} d\delta \quad (1)$$

2 成像系统作用距离模型

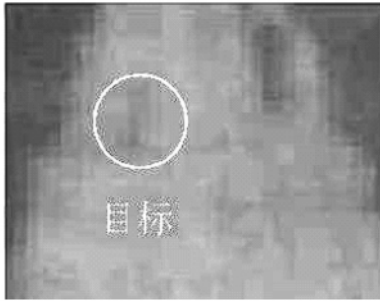
弱小目标的弥散成像可能占多个像素,边缘像素灰度与背景差别较小,主要能量仍集中在理论计算像元,即目标像元。要想检测出目标成像,目标像元接收的光通量与背景像元接收的光通量必须满足传感器的灵敏度要求。

(1) 目标像元接收的光通量计算

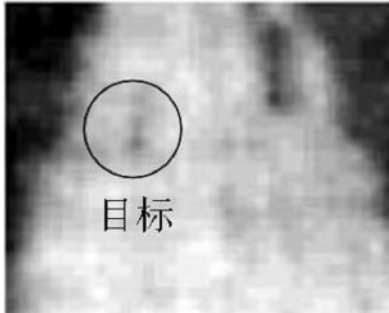
图3为光学系统的光能传递原理。 dS 为物方目标的微小物面,由其发出的光能经过光学系统的入射光瞳



(a) 原始图像



(b) 剪切出的目标原始图像



(c) 处理后的目标图像

图4 视觉测量系统探测能力试验

Fig. 4 Vision measuring system in detecting ability test

和出射光瞳,在像面成目标像 dS' 。 U 为入射光瞳对于弱小物面 dS 的孔径角。

根据元光管中光通量的传递规律,可得弱小面元对入瞳面的总光通量为:

$$\Phi = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^U L_i \cos i dS \sin i di \quad (2)$$

其中 L_i 为弱小物面在 i 方向的光亮度。

当弱小物面是余弦辐射体时,设为余弦辐射体的光亮度为 L_i ,则弱小余弦辐射面元对入瞳面的总光通量为:

$$\Phi = \pi L_i dS \sin^2 U \quad (3)$$

设弱小物面与入瞳中心(投影中心)的距离为 R ,入瞳直径为 d_o ,当 $R \gg d_o$ 时,有:

$$\sin U \approx \frac{d_o}{2R} \quad (4)$$

设物方弱小目标的有效辐射面积为 S_i ,光能的大气衰减系数为 τ_R ,光学系统的内部衰减系数为 τ_o ,则弱小目标对像面目标像元的总光通量为:

$$\Phi = \frac{\pi L_i S_i d_o^2}{4R^2} \tau_R \tau_o \quad (5)$$

由于存在弥散现象,物方目标到达CCD像面的光

能发生了分散,则目标像元接收的由物方目标发出的辐通量为:

$$\Phi_o = k \Phi_i \quad (6)$$

式中 Φ_o 为目标像元实际接收的由物方目标发出的辐通量 k 为像弥散系数。

当物方目标像小于1个CCD像元时,目标像元除了接收物方目标发出的光通量外,还会接收CCD单个像元对应的物方视场角内背景发出的光通量和目标与像平面间的路径辐射光通量。设背景辐亮度为 L_b ,路径辐射通量为 Φ_l ,则CCD目标像元接收的总光通量 Φ_m 为:

$$\begin{aligned} \Phi_m &= \Phi_o + \frac{\pi L_b (D^2 - S_i) d_o^2}{4R^2} \tau_R \tau_o + \Phi_l \\ &= \frac{\pi [k L_i S_i + L_b (D^2 - S_i)] d_o^2}{4R^2} \tau_R \tau_o + \Phi_l \end{aligned} \quad (7)$$

式中 D 为成像系统单像素视场在物方目标处所对应的物方尺寸。

(2) 单个背景像元接收的光通量计算

CCD背景像元接收的光通量 Φ_b 包括背景光通量和路径光通量。即

$$\Phi_b = \frac{\pi L_b D^2 d_o^2}{4R^2} \tau_R \tau_o + \Phi_l \quad (8)$$

(3) 单个目标像元与单个背景像元的光通量差

CCD像平面上,单个目标像元与单个背景像元接收到的光通量之差为:

$$\Delta \Phi = \Phi_m - \Phi_b = \frac{\pi (k L_i - L_b) S_i d_o^2}{4R^2} \tau_R \tau_o \quad (9)$$

3 成像系统作用距离计算

单个目标像元产生的信号电压 V_i 为:

$$V_i = \frac{\Phi_i \mathfrak{R} t_{int}}{A_d} = \frac{\Phi_i t_{int}}{d^2} \mathfrak{R} \quad (10)$$

式中, \mathfrak{R} 为CCD灵敏度; A_d 为CCD像元面积; t_{int} 为光学系统积分时间; d 为CCD像元尺寸。

单个背景像元产生的信号电压 V_b 为:

$$V_b = \frac{\Phi_b \mathfrak{R} t_{int}}{A_d} = \frac{\Phi_b t_{int}}{d^2} \mathfrak{R} \quad (11)$$

根据信噪比的要求,输出有效目标信号须满足:

$$\frac{V_i - V_b}{V_n} = \frac{|\Phi_m - \Phi_b| t_{int} \mathfrak{R}}{V_n d^2} = \frac{|\Delta \Phi| t_{int} \mathfrak{R}}{V_n d^2} \geq \text{SNR} \quad (12)$$

式中, V_n 为CCD噪声信号电压, SNR 为CCD可检测的最低信噪比。

则,成像系统的极限作用距离 R_{inf} 为:

$$R_{inf} = [\pi [k L_i - L_b] S_i d_o^2 \tau_R \tau_o \mathfrak{R} t_{int} / (4 d^2 V_n \text{SNR})]^{1/2} \quad (13)$$

4 试验验证

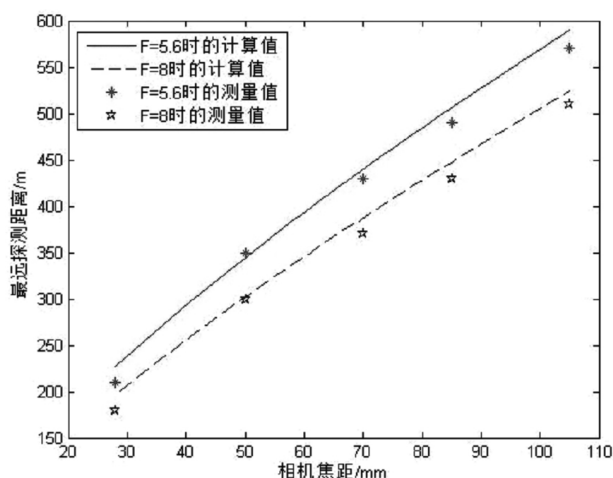


图 5 探测距离与焦距关系曲线

Fig. 5 Detection range and focal length relationship curves

为了验证成像系统的极限作用距离模型在具体应用中的有效性,利用分辨率为 1024×1024 、像元尺寸为 $17 \mu\text{m}$ 、响应度为 50 mA/W 、动态范围为 50 dB 的相机对直径为 12 cm 的圆柱形模拟目标进行了探测能力试验。图4为视觉测量系统的探测能力试验中用 105 mm 焦距、 5.6 F 数的参数拍摄的距离相机 570 m 处的目标图像。图5所示为本试验中探测距离随相机焦距变化的关系曲线与实际试验数据的对照情况。实线为相机 F 数为 5.6 时的变化曲线;虚线为相机 F 数为 8 时的变化曲线;“*”点为相机 F 数为 5.6 时的实测距离;“☆”点为相机 F 数为 8 时的实测距离。从图中可以看出,计算值与实测值基本一致,特别是两者的变化趋势一致,因此,该计算模型基本正确,可用于视觉测量系统的探测能力估计。另外,从图中还可以看出,计算值比实测值大,是因

为在利用模型计算探测距离时,由于图像传感器只给出了在某一波长时的响应度参数,而实际成像是在可见光波段。因此,在利用该模型进行探测距离计算时,利用精确的参数更加有利于结果的准确。

5 小结

本文根据远距离弱小目标的成像特点,研究了弱小目标成像与目标光照度、成像距离、传感器灵敏度、动态范围、曝光时间及光学系统光孔大小等参数的关系,建立了远距离弱小目标成像模型,为远距离弱小目标的视觉测量系统的参数选型提供了技术指导。

参考文献:

- [1] Zheng X, S Wang, Y Zhang. The Obstacle Detection and Measurement Based on Machine Vision [J]. International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA), 2010, 2 (2): 17.265-268
- [2] Huang C-H, C-S Hsu, P-C Tsai, *et al.* Vision Based 3-D Position Control for a Robot Arm. Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2011 IEEE International Conference[C]. IEEE 1699 - 1703.
- [3] 朱晓辉, 郭文佳, 王向军. 超大范围坐标测量系统的现场测试基准及其误差分析 [J]. 传感技术学报, 2005, 18 (2): 265-268.
- [4] 王向军, 韩双来. 弹落点坐标测量系统的快速校准方法及精度分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13 (6): 687-690.
- [5] 徐寒, 夏森, 徐健健. 红外弱小目标的匹配方法研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2012, 2: 233-236.