

文章编号: 0253-2239(2004)03-427-4

一种图像稳定程度的描述方法

李 奇 徐之海 冯华君 王 凌 戴顺林

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 提出一种数学模型描述成像系统的稳定程度。通过分析证明:当目标物体为黑白分辨率标板(只有两种亮度且为周期性结构)时,成像系统的不稳定对成像结果的影响是使图像的像素灰度值按照二项分布的规律分布,因此可以用统计参量来反映成像系统的运动速率,进而表征图像的不稳定度。为了研究在不同时刻图像稳定性的变化规律,引入了统计学中表征数据离散程度的参量“标准偏差”作为描述因子。通过实验,直观地描述了一个佩肯棱镜系统的稳像过程,得出了变化曲线。曲线的波动与所观察到的图像稳定度的变化相符,证明了本描述方法是合理且有效的。

关键词: 成像光学; 图像稳定性; 描述方法; 佩肯棱镜系统

中图分类号: O436 文献标识码: A

A Descriptive Method for Image Stability

Li Qi Xu Zhihai Feng Huajun Wang Ling Dai Shunlin

(State Key Lab of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 14 January 2003; revised 20 March 2003)

Abstract: A mathematical model, which describes stability of imaging system, is provided. While objects consist of two kinds of brightness and have periodic structure, it is proved, that intensity of pixel on image sensor of unstable image system accords binomial distribution. So image statistical parameter can be applied to describe system velocity and image instability. In order to research the rule of image stabilization at different times, the standard deviation, which indicates discrete degree of data in statistics, is introduced as descriptive factor. Finally, the curve, which described transformation process of Pechan prism system, is given. The fluctuation of the curve is in accordance with the stability change of observed image. This conclusion proves the provided method is reasonable and effective.

Key words: imaging optics; image stability; descriptive method; Pechan prism system

1 引 言

在侦察摄像机、光学导引头、火控武器瞄准等现代军用成像系统中,需要光学系统在运动(车载、机载、弹载)的过程中,实时、准确地进行目标图像的自动识别与跟踪。图像的高度稳定性对提高识别、跟踪精度具有决定性的作用。

目前国内外研究的稳像技术可以分为光学稳像和电子稳像^[1,2]。光学稳像技术在国内外发展较早,

20 世纪 80 至 90 年代,一些光学稳像系统已经应用于航空、军事领域中。光学稳像的方法主要通过光学或机械机构补偿像移或控制成像系统的关键部件,达到稳定图像的目的^[3]。例如,佩肯棱镜稳像就是利用机械陀螺的惯性,控制成像光路中佩肯棱镜的空间姿态,以得到稳定的图像。近几年来随着数字成像技术的日益发展,电子稳像技术受到各发达国家的高度重视。电子稳像的通用方法是:直接从数字图像中找到每一帧图像相对于参考图像的全局运动矢量,然后解算出的运动参量去控制图像传感器输出像素各行列的起始读取位置,从而达到图像补偿稳定的目的。目前,关于稳像的研究主要集中在

E-mail: liqi@zju.edu.cn

收稿日期: 2003-01-14; 收到修改稿日期: 2003-03-20

在运动矢量检测方面,人们提出了投影算法、特征量跟踪算法^[4]、位平面匹配算法^[5]等,以实现简单、方便的稳像功能,并提出一些指标对稳像算法进行评估^[6],但这些指标只适用于小幅振动场合,一般用于电子稳像系统的评价;当振幅较大时,每帧的图像内容变化过于剧烈,无法找到相邻帧中像素的对应关系,这些描述方法失去评价功能。对于各种光学稳像方法,只能通过主观评判,感觉稳像的最终效果,而稳像的中间过程则无从获得。寻找针对这种情况的图像稳定程度的描述方法,具有很大的现实意义。因为在国防领域,光学稳像依然是不可缺少的核心技术,确定合适的图像稳定程度的描述方法,有助于比较现有的各种方法的优劣,也可预示新的发展方向。本文根据数字成像的曝光特点,设定了用来测定图像稳定程度的黑白分辨率标板,通过用数理统计的方法得出了像素灰度值分布规律的近似数学模型,并提出一种图像稳定程度的描述方法,通过实验对一个佩肯棱镜系统的稳像过程进行描述。

2 理论分析

成像系统的像面上得到的曝光量合成值可以表示为

$$E = c_1 \cdot L \cdot G \cdot t / F^2, \quad (1)$$

其中 c_1 为常量, L 为景物亮度, G 为电路增益, t 为曝光时间, F 为镜头光圈数。

可见,当摄像系统在一帧曝光时间内保持稳定时,像素灰度值 I 与物面上对应景物区域的亮度成正比(如图 1 所示):

$$I \propto f(D_1), \quad (2)$$

如果在曝光时间内摄像系统不稳定,则像素灰度值与多块景物区域亮度有关:

$$I \propto \sum_{i=1}^m k_i f(D_i), \quad (3)$$

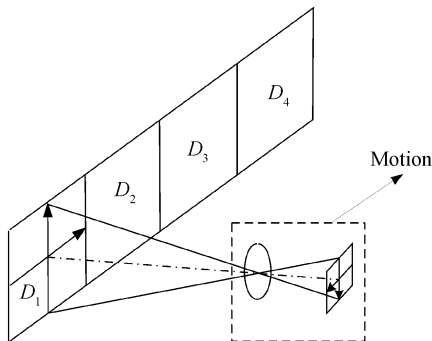


Fig. 1 Imaging model

式中 $\sum_{i=1}^m k_i = 1$ 。我们可以对景物进行人为规定,要求景物(标板)只有两种亮度(0 和 1)并具有周期结构,使成像系统在任意时刻视场中平均亮度基本保持一致,即视场中白色区域面积 A_1 与黑色区域面积 A_0 的比例近似恒定,而对黑白标板的频率没有特殊要求。假设某块景物区域亮度为 1 的概率为 p [$p = A_1 / (A_1 + A_0)$], 则当摄像系统稳定时,图像像素灰度平均值为 Kp (K 是从物方亮度转换到像方灰度的一个比例常数), 标准偏差为

$$S = K \sqrt{p(1-p)^2 + (1-p)p^2} = \sqrt{K(p(1-p))}. \quad (4)$$

而当系统不稳定时,像方一个像素的灰度值与物方 m 个景物区域有关,因此图像中各像点的灰度值符合二项分布。如果运动视为匀速的,则 $k_i = 1/m$, 在 m 个区域中包含 n 个亮度为 1 的区域(即平均亮度为 n/m) 的概率为 $C_m^n p^n (1-p)^{m-n}$, 图像的标准偏差为

$$S = K \sqrt{\sum_{n=0}^m C_m^n p^n (1-p)^{m-n} (n/m - p)^2}. \quad (5)$$

根据二项分布的性质可知,当 p 一定时, m 越大, 概率分布图越平缓, 标准偏差越小。实际情况下, 系统的运动一般是周期运动, 因此 k_i 不是恒值, 而是正比于景物区域 D_i 在该像素处的曝光时间。此时图像的标准偏差修正为

$$S = K \sqrt{\sum_{n=0}^m [p^n (1-p)^{m-n} \sum_{l=1}^m (b_l - p)^2]}, \quad (6)$$

式中 b_l 为 m 个系数 k_i 中的任意 n 个的相加组合(若 $m = 4, n = 2$, 则 b_l 为 $\{k_1 + k_2, k_1 + k_3, k_1 + k_4, k_2 + k_3, k_2 + k_4, k_3 + k_4\}$)。假设系统运动的位移符合正弦规律, 则在每一帧曝光的起始处, 正弦曲线斜率越小, 系统的运动越接近于匀速运动; 曲线斜率越大, 系统的运动越偏离匀速运动。我们考察系统运动的相位在 0 与 $\pi/2$ 之间变化时, 标准偏差关于 m 的变化规律, 并得到图 2 所示曲线(此处 p 取恒值 0.4 , K 取 1), 图中横坐标表示曝光开始时系统运动的相位, 纵坐标表示标准偏差。如图所示, m 越大, 标准偏差越小的规律依然成立。

因此可以把图像的标准偏差作为图像稳定度的描述参量, 标准偏差越小, 则 m 的数值越大, 这意味着在每一帧曝光时间内, 摄像系统的相对运动速率越大, 图像不稳定程度增加。稳像方法众多, 每种稳像方法的过程各不相同, 也都十分复杂, 尚未有精确的数

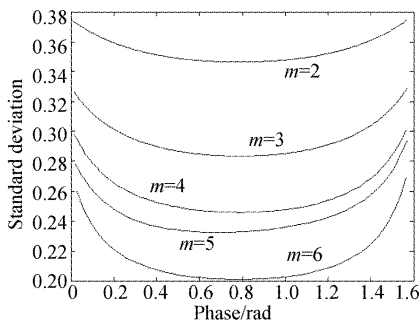


Fig. 2 Relation between S and m

学模型从振动振幅、频率等参量描述稳像过程,本文提出的方法是利用统计工具,从最终的成像效果来描述稳像过程,即定性用 S 的变化来描述 m 的变化。

3 实验系统

3.1 标准物体

进行实验时,首先需要设定满足前述要求的景物。我们设计制作了黑白分辨率标板,用几组间隔不等的亮暗条纹代表亮度 1 和 0,并使之在纵横两个方向循环排布。这样,当成像系统处于不稳定状态导致

视场内景物变化时,总的平均亮度基本一致,即令(6)式中的 p 为恒值。

3.2 系统组成

成像系统采用一个安装了佩肯棱镜的稳像望远镜,即把一个固定在机械陀螺环架上的佩肯棱镜装入成像光路中,陀螺环架允许佩肯棱镜有一定程度的空间自由度。当成像系统的整体发生晃动时,利用机械陀螺的惯性,控制成像光路中佩肯棱镜的空间姿态保持不变,达到图像稳定的目的^[7,8]。我们将一块互补性金属氧化物半导体传感器(CMOS)固定在望远镜一个镜筒上获得图像,然后将望远镜固定在振动台上,同时通过模数转换将图像送入计算机。实验时,首先开启振动台,这时佩肯棱镜不发挥作用,图像处于非常不稳定状态。然后启动稳像机构,图像逐渐稳定,这样计算机就记录了图像由不稳定到稳定的整个变化情况。

3.3 实验结果

图 3(a)~图 3(c)分别是稳像过程的开始阶段、中间阶段和稳定阶段的典型图像。

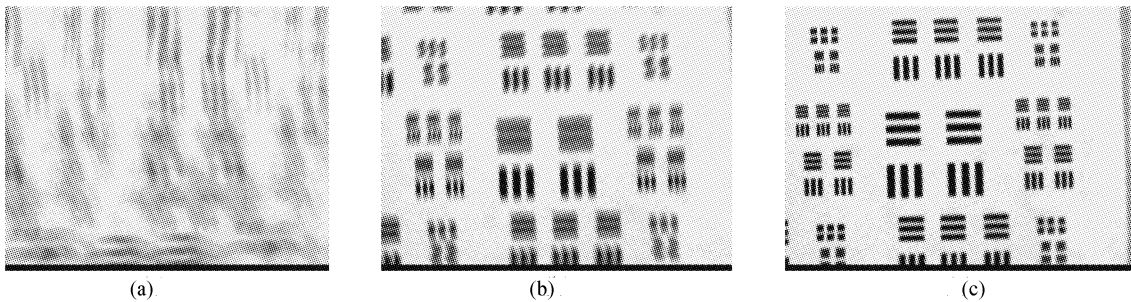


Fig. 3 Typical images recorded by complementary metal oxide semiconductor (CMOS) sensor

我们对记录的每一帧图像用如下的标准偏差公式进行分析计算:

$$S = \sqrt{\sum_{n=0}^N \frac{(I - \bar{I})^2}{N-1}}, \quad (7)$$

式中 I 为各点像素灰度值, \bar{I} 为灰度平均值, N 为总像素数。各幅图像的标准偏差数据绘制成的曲线如图 4 所示。

从稳像曲线的变化可以看出,佩肯棱镜的稳像经历了几个阶段。在 A 点之前,图像由于剧烈晃动[如图 3(a)所示],根本无法观察图像的内容,当佩肯棱镜的陀螺开始发挥作用后,图像很快达到基本稳定状态,到达 B 点[图像见图 3(b)]。之后这种状态持续一段时间后,从 C 点起进一步稳定, D 点以后达到很稳定的状态,典型图像见图 3(c)。

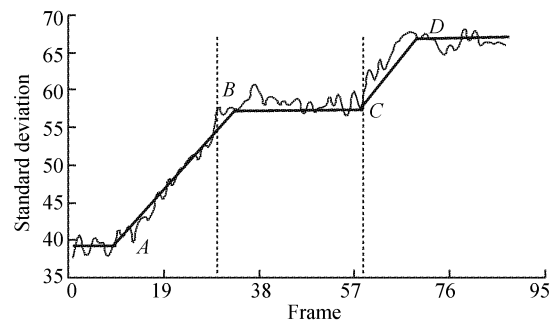


Fig. 4 Standard deviation graph of images

讨论 在理论分析中,我们假设每一帧图像曝光时间,只在摄像系统的运动周期中占很小的一部分,因此严格来说,本文提出的描述方法适用的条件是 $T \gg t$,式中 T 是摄像系统的运动周期,而 t 为一帧

图像的曝光时间。本文实验中,振动台的振动频率为 15.2 Hz,互补性金属氧化物半导体传感器的捕获速度为 15 帧/秒,并不满足此条件,所以在 A 时刻前评价参量的数值很不稳定,而当佩肯棱镜的陀螺发挥作用后,即把随机运动的频率由高转低,此时系统满足了以上要求,评价参量很好的反映了图像的稳定程度。在图像已经相当稳定的情况下,每一帧的图像基本一致,此时的情况已经不十分符合前述的模型[(3)式中的 m 十分接近于 1],图像传感器的噪声、非线性等因素的干扰致使评价参量无法反映如此微小的差异,评价曲线再次出现波动。

过去人们对稳像(特别是光学稳像)效果的评价大多通过稳像前后所见图像的对比凭主观判断,缺少客观的评价标准,而且无法更进一步对稳像的中间过程进行分析。尽管使用本文方法,必须对景物进行规定(只有两种亮度,并且具有周期性结构),但它对稳像系统的性能表征,如稳像时间(稳像系统发挥作用后,图像从不稳到稳定所经历的时间),稳像中间过程(本文实验中佩肯棱镜稳像系统发挥作用时,稳像过程经历了三个阶段),这些指标对于任意景物都是一样的。

参 考 文 献

- 1 Shen Honghai, Liu Jinghong, Jia Ping *et al.*. Overview of imaging stabilization. *Optic and Precision Engineering* (光学精密工程), 2001, **9**(2):115~120 (in Chinese)
- 2 Han Shaokun, Zhao Yuejin, Liu Mingqi. Electronic image stabilization techniques and development. *Optical Technique* (光学技术), 2001, **27**(1):71~73 (in Chinese)
- 3 Zhao Yuejin, Lian Tongshu. Programming optical platform. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(5): 544~547 (in Chinese)
- 4 Ko Sung-Jea, Lee Sung-Hee, Lee Kyung-Hoon. Digital image stabilizing algorithms based on bit-plane matching. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1998, **44** (3): 617~622
- 5 Morimoto C, Chellappa R. Evaluation of image stabilization algorithms. *Proc. IEEE ASSP, Seattle, WA, USA*, 1998, **5**:2789~2792
- 6 Xu Zhihai, Li Qi, Feng Huajun. Image stabilization technique in video and photograph system. *Camera* (照相机), 2002, **24**(6):4~5 (in Chinese)
- 7 Zhao Yuejin, Lian Tongshu. Three-axis image stabilizing reflecting prism assembly in convergent light. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1992, **12**(8):749~754 (in Chinese)
- 8 Morimoto C, Chellappa R. Fast electronic digital image stabilization. *Proc. ICPR '96, Vienna, Austria*, 1996, **3**: 284~288