

关于高速摄影系统的信息量

李 德 熊

(北京理工大学工程光学系)

提 要

本文分别讨论了狭缝扫描高速摄影系统、分幅高速摄影系统以及网格高速摄影系统的信息量计算公式。在讨论分幅摄影系统时,指出了光快门作用对空间自由度的影响。
关键词: 信息量; 信息功率; 高速摄影。

一、引 言

陶纯堪教授讨论关于高速摄影系统信息量的文章^[1],指出了 H. Schardin 公式^[2,3]中引入优质系数 g 以及对其所作解释带来的空间信息与时间信息概念间的混乱和矛盾。本文拟在以下两个方面作进一步的分析和讨论,可以看作是对文献[1]的补正和扩展。

1. 无论是文献[1]还是[2,3]或其它一些讨论高速摄影系统信息量的文章,均仅涉及高速摄影系统中的一个大类,即分幅摄影系统。但是高速摄影系统至少大致可成分幅摄影系统和轨迹记录(狭缝扫描)系统两大类,而网格高速摄影系统可以看成是兼有上述两类系统的特性。因此有必要逐一加以分析它们的信息量公式。

2. 在讨论有些分幅摄影系统(例如转镜扫描系统)时,还需考虑光快门作用等因素。

讨论同样以信息量公式

$$I = N_{DOF} \log_2 m \quad (1)$$

为基础。式中总自由度数 $N_{DOF} = STW\psi$, (S , T , W , 和 ψ 分别为空间、时间、辐射波谱段和偏振的自由度数),它表示高速摄影系统所得信息的抽样总数,或如[3]中所说的相当于通信系统中的平行通道数。

m 为灰度级数, $\log_2 m$ 即为以比特(bit)数来表示的灰度级数,它是每一个抽样(通道)的量化数或信息量。我们在这里没有如[1]中那样写成 $\log_2(1+m)$, 因为量化时,灰度级中必有一个代表信号等于零的背景,灰度级数 $m=1$ 是一幅没有意义的图像。最简单的二值图像中,一个灰度级代表背景,而另一个灰度级则代表背景上的物体。

同样,不失其普遍意义,我们也假设 $W=\psi=1$, 即只考虑空间自由度 S 和时间自由度 T , 并有时间自由度 $T = t_s/t_w$, 其中 t_s 为一次拍摄的总摄影时间(全记录时间), t_w 则为相邻两个记录之间的时间间隔。于是有,一次拍摄的总信息量为

$$I = TS \log_2 m = \frac{t_s}{t_w} S \log_2 m, \quad (2)$$

或,单位时间内的信息量为

$$M = I/t_s = \frac{1}{t_w} S \log_2 m = PS \log_2 m, \quad (3)$$

式中 $P = 1/t_w$ 。A.C. Дубовик 把单位时间内的信息量 M 称之为信息功率^[4], 单位为 bit/s。

下面我们先来讨论不同高速摄影系统的信息量公式中的抽样问题, 然后再讨论它们的量化问题。

二、狭缝扫描系统的信息量

用狭缝扫描高速摄影系统所拍摄的, 是被摄对象边缘(例如爆炸物的爆炸前沿)上一个微元的扩展进程轨迹照片, 它的一个方向(沿狭缝长度方向)表示微元扩展所到位置的空间轴, 与其垂直的方向则表示时间轴。因此可以认为, 空间自由度 $S = 1$ (当然, 如有必要, 也可将狭缝像看作宽度为 1 的分幅像, 按下节分幅像来处理)。相邻两个记录之间的时间间隔 t_w (或称时间分辨率)为

$$t_w = b/v, \quad (4)$$

式中 b 为狭缝像的宽度, v 为狭缝像的扫描速度。

如设轨迹照片的总宽度为 B , 显然有, 全记录时间 t_s 等于

$$t_s = B/v. \quad (5)$$

于是, 代入(2)和(3)式分别可得

$$I = \frac{B}{b} \log_2 m, \quad (6)$$

以及

$$M = \frac{v}{b} \log_2 m. \quad (7)$$

对于所讨论的情形中, 可以认为 $m = 2$, 于是最后可得狭缝扫描高速摄影系统的信息量和信息功率分别为:

$$I = B/b, \quad (8)$$

和

$$M = v/b. \quad (9)$$

b 的大小当然不能无限制地缩小, 它至少应受衍射极限的限制, 并且与高速摄影系统的具体结构参数(物镜孔径、扫描半径等)直接相关。

三、分幅摄影系统的信息量

在分幅摄影系统中, 单位时间的空间自由度 $P = 1/t_w$ 就是一般所说的拍摄频率, 它是高速摄影系统的基本结构参数, 可以直接得到。正如文献[1]所指出, Schardin 人为地乘上一个 $g^{2/3}$ 的因子作为时间信息是不恰当的。Schardin 所谓的优质系数 $g = t_w/t_B$ (式中 t_B 是一个画幅的曝光时间), Дубовик 把它称为孔隙性^[4], 并且明确指出, 设计高速摄影系统时, 提高孔隙性的目的是为了减小拍摄成像中的模糊量, 提高像的空间信息。[1]在讨论空间自由度时, 考虑了三个影响因素, 即: 光学系统的点扩展函数 $h(x, y)$, 像移影响(这里也用点扩展

函数 $d(x, y)$ 表示)以及胶片的点扩展函数 $m(x, y)$ 。于是胶片中记录下的点扩展函数为:

$$h''(x, y) = h(x, y) \otimes d(x, y) \otimes m(x, y), \quad (10)$$

空间自由度取为

$$S = F / \mathcal{D}\{h''(x, y)\}. \quad (11)$$

其中 F 为画幅面积, $\mathcal{D}\{\cdot\}$ 表 $h''(x, y)$ 第一暗圈内的圆斑面积。 \otimes 为卷积符号。

但是需要进一步仔细讨论的是:

1) 光学系统的点扩展函数在由 0 至 t_B (或 $-t_B/2$ 至 $+t_B/2$) 的整个曝光过程中是变化的([1]也提及这一点,但未按此处理),这是由于扫描光孔扫过光学系统前的固定光阑时,改变着通光孔的面积(相当于一个镜头快门的作用)。对于矩形光孔,只有扫描方向上,光孔宽度由 0 变到最大又缩小至 0,而对于圆形光孔或其它形状(例如菱形)的光孔,则在垂直于扫描的方向上也有类似变化。因此 $h(x, y)$ 不但随光孔形状而异(这里且不考虑光学系统像差的影响),而且还应当是时间 t 的函数,即 $h_t(x, y)$ 。

2) 对于等速直线运动造成的像移,已经熟知点扩展函数 $d(x, y)$ 的形式是一个矩形函数,它的传递函数则为一个 $\sin c$ 函数^[5,6]。但是,既然 $h_t(x, y)$ 在整个曝光时间 t_B 期间是变化的,则两者的合成结果,就不再能由某一不变的 $h(x, y)$ 与矩形函数的 $d(x, y)$ 作简单卷积来求出。附带指出文献[1]中的一个小疏忽,其中(18)式在表示像移的传递函数为 $\mathcal{F}\{I_p(x, y)\} / \mathcal{F}\{I_k(x, y)\}$ 时,忽略了 $I_p(x, y)$ 是定义为胶片上的曝光量(强度对曝光时间的积分)分布,而 $I_k(x, y)$ 为物体的强度分布,两者并非同一量纲。如将该式右边的 t_B 移到左边,满足传递函数定义的要求,又恰恰说明没有考虑在整个曝光过程(产生像移的过程)中, $h_t(x, y)$ 随着光孔改变大小而变化这一点。

3) 当将快门作用和胶片感光特性结合起来考虑时,实际由于像移造成的可察觉的模糊量要小于按曝光时间 t_B 计算得到的大小^[7]。这是因为只有当曝光量达到一个最小值时,像的变黑密度才等于胶片感光特性曲线($H-D$ 曲线)的初感密度^[8]。

可见,要想利用(10)和(11)式来计算空间自由度是十分困难的。这里我们指出一个估算的方法。 $h_t(x, y)$ 用全开孔径时的 $h(x, y)$ 来代替,而 $d(x, y)$ 则用描写光孔打开面积变化的快门工作曲线来代替,对于矩形光孔,它是一个等腰三角形,即

$$d(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq t_B/2 \\ t_B - x, & t_B/2 \leq x \leq t_B \end{cases} \quad (12)$$

对于圆形或菱形光孔,则为斜边呈不同下凹形曲线的等腰三角形^[9]。于是,可由这样两个函数的卷积 $h(x, y) \otimes d(x, y)$ 求出前两个因素合成的点扩展函数,并进一步确定对应的空间分辨率 N_0 , 然后再按一般常用的公式

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} + \frac{1}{N_f}, \quad (13)$$

求出最后包括胶片在内的系统空间分辨率,其中 N_f 为胶片的空间分辨率。最后可得空间自由度

$$S = FN_x N_y, \quad (14)$$

式中 N_x, N_y 分别为按(13)式求得的两互相垂直方向的系统空间分辨率。

我们用文献[1]中的参数作为例子来进行计算,即:(1)画幅尺寸 $F = 18 \times 24 \text{ mm}^2$, (2)

光学系统相对孔径 $1/5$; (3) 光波波长 $\lambda=500\text{ nm}$; (4) 胶片分辨率 $N_f=90\text{ lp/mm}$, 并设孔隙性 $=1$, 即 $t_B=t_w$ 。计算结果列于表 1。在表 1 中并列出文献 [1] 的结果 (已除以 $m=8$) 以作比较。

Table 1 The values of PS for various systems

Velocity of image v	Image displacement Δl	S	Framing rate $P=1/t_w$	PS	Results taken from [1]
10^5 m/sec	$10\ \mu\text{m}$	1.9×10^6	10^{10}	1.9×10^{16}	0.675×10^{16}
	$100\ \mu\text{m}$	2.48×10^5	10^9	2.48×10^{14}	1.3×10^{14}
	$1\ \text{mm}$	2.83×10^4	10^8	2.83×10^{12}	1.4×10^{12}

最大可能的量化级数

$$m=1+S/N, \quad (15)$$

式中 S/N 为系统的最大信噪比, 它与实际摄影所用的参数 (像的亮度大小、曝光时间以及胶片特性等) 有关, 因此 m 值的大小应按具体系统计算。估算或比较不同系统的信息量时, 可取一个合理的数值。据 Leo Levi 书中的数据定为 $m=2\sim 8^{[1]}$, 据 X. Фризер 书中的数据指出, 对于胶片 m 值可取等于 $30^{[4]}$ 。看来估算信息量时采用后者比较合理。

四、网格高速摄影系统的信息量

网格摄影系统中整幅画幅是由许多小的像元所组成, 而多个画幅的拍摄实际上是由这些像元在像元之间未曝光的胶片上作扫描来实现, 因此它可以看成是一个多通道的“狭缝” (这里一般是点状像元) 扫描系统。它的单位时间的空间自由度 P 按 (4) 式应为

$$P=1/t_w=v/b, \quad (16)$$

但式中 b 为像元在扫描方向上的线度。

空间自由度 S 就是整个画幅 F 中网格像的分解像元数。量化级数 m 则应按 (15) 式计算, 或在估算信息量时取用一个合理的数值。

五、结 论

狭缝扫描、分幅摄影以及网格式高速摄影系统的信息量应根据其工作原理和特点分别讨论。狭缝扫描高速摄影系统可以看成空间自由度 $S=1$, 单位时间的空间自由度 $P=v/b$, 以及量化级数 $m=2$ 的系统, 信息量和信息功率分别可由 (8) 和 (9) 式计算。网格高速摄影系统可看作是一个多通道 (通道数等于整个画幅所包含的分解像元数) 的扫描系统, 空间自由度 S 即为通道数, 但量化级数 m 则需由系统的最大信噪比按 (15) 式确定。对于光阑扫描具有光快门作用的分幅高速摄影系统, 计算空间自由度时, 必须考虑光快门对光学系统点扩展函数和像移的影响, 本文指出了便于计算的近似方法。

参 考 文 献

- [1] 陶纯基;《光学学报》, 1988, 8, No. 3(Mar), 242。
[2] H. Schardin; "Proc. of the 6th International Congress on High-speed Photography," (Willink & Zoom, Haarlem, 1963), 1。
[3] 龚祖同, 张耀明;《高速摄影总论与间歇式高速摄影》, (科学出版社, 北京, 1983), 32。
[4] А. С. Дубовик; "Фотографическая регистрация быстротекающих процессов", 3-е изд., (Наука, Москва, 1984), 44, 66, 93, 190, 45。
[5] F. T. S. Yu; "Optical Information Processing", (John Wiley & Sons, New York, 1983), 274。
[6] H. C. Andrews, B. R. Hunt; "Digital Image Restoration", (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1977), 81。
[7] 李德熊;《中国精密机械学会学术论文选集(第1集)》, (国防工业出版社, 北京, 1965), 49。
[8] 李德熊;《摄影仪器》, (兵器工业部教材编审室, 北京, 1986), 29。
[9] Г. И. Белинская; *Журнал Физики*, 1963, 8, No. 5 (Сан-Окт), 370~374。

Amount of information of high-speed photographic systems

LI DEXIONG

(Optical Engineering Department, Beijing Institute of Technology)

(Received 17 March 1989)

Abstract

Calculating formulas of the amount of information for high-speed streak cameras, high-speed framing cameras, and high-speed raster cameras are discussed respectively. The influence of optical shutter effect on the spatial resolution of some kinds of framing cameras is also discussed.

Key words: amount of information; power of information; high-speed photography.