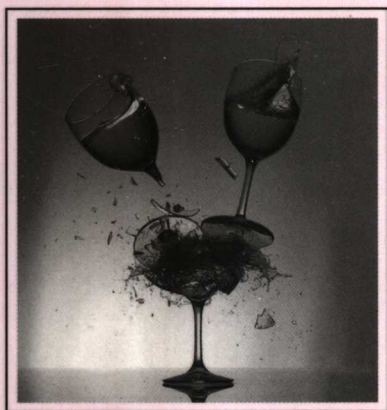


高速摄像

及其应用技术

张三喜 姚敏 孙卫平 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

高速摄像及其应用技术

张三喜 姚敏 孙卫平 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

高速摄像及其应用技术/张三喜等编著. —北京:国防工业出版社, 2006.1

ISBN 7-118-04237-4

I. 高... II. 张... III. 摄影技术 IV. TB8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 133640 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9½ 250 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:20.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422 发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535 发行业务:(010)68472764

前 言

高速摄影(摄像)是研究高速运动物体或瞬变流逝现象的最有效方法之一。它能把视觉无法分辨的高速过程“冻结”在记录介质(胶片、磁带、存储器、磁盘)上,从而提供一系列与之耦合的空间—时间信息。这样,就把高速过程的发生、发展和运动规律等清晰地展现在人们的面前。高速摄影(摄像)在国防领域得到了广泛的应用,特别是在武器鉴定试验中是不可缺少的。

本书是在高速摄像逐渐代替高速摄影、新的高速数字图像感应器高速发展以及新的高速摄像系统不断推出的形势下编写的。本书主要介绍了高速 CCD 和 CMOS 成像系统的工作原理、该技术涉及的光学知识、高速摄像系统的实施技术、照明光源、高速摄像的应用技术——高速同步立体测量技术、图像判读处理技术、自研的自动判读处理 MAS 系统,以及该技术的历史、最新发展和动态等内容,全书共 7 章。本书可作为光电技术、摄影测量、武器鉴定等领域科技人员的参考书。

参加编写本书的有:张三喜(第 1、2、3、5 章)、姚敏(第 6 章)、孙卫平(第 4 章)、康社峰、张晓满(第 7 章)、薛以辉(2.3 节);许天生高级工程师审阅了全书,并对全书进行了多处修改和提出了改进意见;胡小丽、刘晓彬、张军峰、杨志刚和马平对获得的图像资料进行了选材、整理和绘制。在编写工作中得到了中国工程物理研究院流体物理研究所谭显祥研究员和深圳大学李景镇教授的帮助,瑞士技术中心、凌云光视数字图像公司、杭州中瑞科技有限公司和上海金桥精艺公司等单位提供了大量的文献资料,在此一并

表示感谢。

全书力求作到理论和工程实践相结合,反映当前的最新技术。但由于高速摄像技术发展很快,同时由于编者水平和实际经验有限,书中还可能存在不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编著者

2005年8月于西安

(E-mail: zsx_a@yahoo.com.cn)

目 录

第 1 章 高速摄像概述	1
1.1 高速摄影的定义和历史	2
1.2 高速摄影的种类	9
1.3 高速摄像	14
1.4 高速摄像的信息	22
1.5 高速摄像的应用领域	27
1.6 几种典型的高速摄像系统	35
第 2 章 固态图像传感器的工作原理	41
2.1 图像传感器现状及发展趋势	41
2.2 基于多学科领域需求的高速图像传感器特性	48
2.3 高速 CCD 摄像技术	50
2.4 高速摄像系统实例	70
2.5 CMOS 成像原理	79
2.6 色彩获取原理	85
2.7 快门	88
2.8 图像传感器的主要特性	90
2.9 CCD 与 CMOS 的比较	98
2.10 成像系统中的新技术	105
第 3 章 摄像系统应用中的光学知识	117
3.1 光学系统成像基本计算公式	117
3.2 摄影物镜	122
3.3 摄像物镜的光学特性	131
3.4 摄像物镜的像质评价	136

3.5	光的度量	140
第4章	照明技术	152
4.1	概述	152
4.2	光源的基本特性参数	154
4.3	自然光源	158
4.4	人工光源	160
4.5	照明技术	172
第5章	高速摄像实施技术	185
5.1	摄像测量需考虑的问题	185
5.2	直接影响数据结果的一些因素	196
5.3	高速摄像系统基本参数确定	199
5.4	同步启动装置	209
第6章	高速摄像同步立体测量基础	214
6.1	高速同步立体测量概念	215
6.2	高速摄像同步立体测量系统构成及原理	216
6.3	飞行体空间轨迹交会处理方法	223
6.4	中轴线矢量合成获取目标的空间姿态	229
第7章	高速图像信息处理	243
7.1	图像判读	244
7.2	摄像系统及其数据处理参数的精确标定	253
7.3	亚像素处理技术	259
7.4	动态序列图像中对象信息的自动检测	271
7.5	MAS 运动分析软件简介	279
参考文献		295

第1章 高速摄像概述

术语“高速摄影”、“高速摄像”很容易被人们直观地理解。那就是用不同制式的相机以很高的速度一幅一幅地(即摄影频率)来拍摄快速运动的物体,将物体的运动变化过程记录下来。高速摄影是采用胶片作为记录介质,而高速摄像则是采用非胶片的摄影,使用的记录介质为存储器和磁盘,光敏器件为固体图像传感器。前者出现较早,技术成熟,但后者发展迅速,大有取代前者而成为现代主流相机的趋势。因此,谈到高速摄像就不能不提到高速摄影,本章在简要回顾高速摄影历史轨迹的同时,着重对高速摄像进行概述。

当我们观看体育运动的电影时,常常看到运动员各种慢动作的特写镜头,高速摄影能更好地体现这种艺术效果。摄影作为一种艺术,已得到广泛的应用,它的实质是记录空间二维信息的一种方法。我们知道当用相机拍摄快速运动的物体时,如近距离拍摄高速行驶的摩托车,即使采用极短的曝光时间,也往往得不到清晰的照片。其原因是在曝光时间内,物体的影像在底片上发生了移动,没有实现影像的“冻结”。此外,为了研究分析快速运动的过程,要求得到一系列不同时刻的连续画幅。因此,“高速摄影”这个词就包含着两个内容:一个是以很高的摄影频率获得一系列画幅;另一个是每个画幅的曝光时间极短,把快速运动物体的影像冻结在记录介质上。

人眼的视网膜有 $1/24\text{s}$ 的视觉暂留效应,所以人眼的时间分辨能力(分辨率)只有 $1/24\text{s}$ 。电影摄影与放映的频率选为 24幅/s ,正是利用这一特点,以不连续的放映使人获得连续的感受。但对于许多瞬变现象,受到眼睛时间分辨率的限制,我们却只能看

到变化前后的结果,而看不清过程。高速摄影是一种以高于电影拍摄频率摄影的技术,当拍摄结果以电影放映频率放映时,现象的变化就被放慢了。

1.1 高速摄影的定义和历史

1.1.1 定义

最初美国的电影与电视工程师学会(SMPTE)建议高速摄影定义为:摄影的曝光时间小于等于 1ms,摄影速度大于或等于 250 幅/s。后来充分考虑到各个方面修改为(fuller,1994):以足够短的曝光时间和足够快的摄影速度记录光学及光电信息,获得的空间和时间分辨率应满足实验者的需求。

2004 年在美国召开的第 26 届国际高速摄影和光子学会议把高速摄影的定义修改为:速度大于 128 幅/s,可连续获得 3 幅以上的摄影。

1.1.2 高速摄影的历史

高速摄影已有 100 多年的历史。其按记录原理可分为 3 类:20 世纪 60 年代的化学技术(胶片)、70 年代出现的磁带技术和当代的半导体技术,这一技术已成为高速相机的主流。

1. 胶片摄影的历史

第一次高速摄影是由英国化学家、语言学家及摄影先驱亨利·塔尔博特(Henry Talbot)完成的。1851 年,塔尔博特将《伦敦时报》的一小块版面贴在一个轮子上,让轮子在一个暗室里快速旋转。当轮子旋转时,塔尔博特利用来自莱顿电瓶(这是一种能聚集电荷的容器,就是现在的电容器的前身)的闪光(速度为 1/2000s),拍摄了几平方厘米的原版面。最终获得了清晰的图像,它好像是从一种静止的实体上拍下来的,但实际上却是运动中的实体。

那时的记录介质是采用“珂罗酊湿版法”制成的玻璃干板,即在玻璃板上镀上感光材料,其敏感度非常低,大约在 ASA 4 左右,在普通照明条件下,曝光时间达数秒钟以上。镜头的光圈大约是 F32,但摄影非常成功。

1856 年, Foucault 以及随后众多人对波阵面及其在透明介质中振动影响的研究,导致了纹影摄影术(schlieren photography)的出现。

1861 年,在伦敦附近进行了一次试验。试验采用阴影摄影(shadowgraphs)来获取弹丸飞行的照片,弹丸从照相机和 $100\mu\text{s}$ 的照明光源中间穿过,采用短时间的照明,使弹丸在底片上成像。

1867 年, Alfred A. Pollock 制成可以在旋转的圆盘上得到 50 幅照片的相机,同时又指出如果胶片的灵敏度足够高,像人和动物的运动过程都可以记录下来。

1871 年发明了“溴化银明胶干板法”,干板的曝光时间降低到几十分之一秒,为拍摄运动物体提供了较方便的条件。

1872 年,摄影师 Eadweard Muybridge 受加州州长 Leland Stanford 委任,到加利福尼亚解决关于疾驰快马的脚步问题,以平息争论。争论的一方称马总是至少有一个脚是在地上,而另一方认为在瞬间所有的脚都不着地。Muybridge 设计了一套摄影系统,用丝线同时控制多台相机的快门,得到了一系列在黑色背景下白马奔跑的照片,图 1.1 照片中显示马在每个图片上细微的不同,印证了马的四脚在瞬间是同时离开地面的。

1874 年,法国宇航员 Pierre Jules Cesar Jennsen 设计了一种自动相机,用来拍摄金星的运动轨迹。相机 70s 可拍摄 8 幅照片,图像记录在圆形的照相银板盘上,照相盘由发条装置驱动。

1882 年, Dr. Etienne Jules Marey 使这种自动相机得到了改进,称为照相枪。这种相机最初每秒可拍摄 12 幅照片,曝光时间为 $1/720\text{s}$,记录介质为玻璃干板。后来胶片代替了玻璃板,曝光时间达到 $1/1000\text{s}$,速度可达 100幅/s 。他还发明了一种用唱针把声音记录在旋转柱面上的装置,这和后来的示波器记录原理相同。



图 1.1 Eadweard Muybridge 获得的马奔跑中的照片

1884 年,普鲁士摄影师发明了焦平面快门的便携式摄影机,其曝光时间可达 $1/1000\text{s}$ 。1886 年他又发明了宽银幕电影系统(schnellseher),用来观看 12 个到 14 个摄影机获得的图像。

早期摄影机的发展同放映机的发明紧密相连。Joseph Antoine Ferdinand Plateau 在 1829 年提出了视觉暂留理论,并在 1832 年设计了放映机,1853 年放映机得到了普遍的应用。

1893 年 Thomas Alva Edison(爱迪生)发明了活动电影放映机。1893 年—1894 年 C. Francis Jenkins 发明的电影放映机是当今电影放映机的前身。

1939 年—1945 年二战,战争期间推动了军事研究的发展。几种连续补偿式相机相继在美国、英国、法国、德国被研制出来;美国的 Genkins,德国的 AEG 和 Thun,法国的 Merlin 和 Gerin,英国的 Vinten 等厂家都着手于 Maskelyne 转镜式相机的研究,德国研制出了一种新式 Zeiss Ikon 16mm 和 35mm 转镜相机。二战期间为主的相机是 Fastax 和 Eastman 相机, Fastax 相机最大速度可达 800幅/s (分幅可达 6000幅/s)。为了记录炸弹的爆炸、炮弹的飞行和降落伞的张开等过程的需要,出现了速度为 250幅/s 的 De-brie(法国)和 Zeiss(德国)35mm 间歇式相机。其中被公认为最快的相机是 Vinten 有限公司的 HS300,速度为 275幅/s ,快门曝光时间范围为 $100\mu\text{s}$ 至 2ms ,并在胶片边缘上记录有音叉振荡器得到的 50Hz 时标信号,获得了较高的计时精度。

二战期间为了研究炮弹的飞行和炸弹的爆炸情况,出现了一些使用特殊胶片规格、不同记录方式的新式专用相机。比如 Bowen 条纹相机(ribbon frame camera)和单幅画面的 YOC(Yaw Observation Camera)高速相机。YOC 相机是弹道同步相机(ballistic-synchro)的前身。因为这种技术不仅可记录高速运动目标的细节,而且可给出目标的速度、转速和姿态等数据,因此直到今日还一直在使用。

普通电影摄影机由于曝光时间太长、帧速过慢,不能用于诸如子弹、雷管、等离子体中微秒级至毫微级事件的分析研究,于是—

种在快速旋转鼓轮四周装上短尺寸胶片的相机产生了,从而获得离散连续的图像。该相机在 $250\mu\text{s}$ 时间内帧速可达 250000 幅/s。

1940 年至 1945 年间,英国研制出了超高速转镜摄影机 (Miller 相机)。该相机画幅为 20mm ,速度为 2 百万幅/s,画幅为 8mm ,时速度可达 8 百万幅/s,时间分辨率为 $1 \times 10^{-8}\text{s}$ 。

美国的 Beckman Whitley 和 Cordin 公司也都相继生产了相似的 Miller 相机。20 世纪 80 年代,Cordin 仍在大量生产 35mm 和 70mm 鼓轮转镜式相机,速度为 $(1000 \sim 2000000)\text{r/s}$,能记录 $8\text{mm} \sim 80\text{mm}$ 的高质量彩色和黑白图像。

战后,Acma Limited of Dwnham 制造出一种特殊的 35mm 旋转棱镜相机。在 3 个互换旋转棱镜作用下,速度可达 2000 幅/s,两分幅后速度可达 4000 幅/s,四分幅后速度可达 8000 幅/s。

1955 年—1975 年,美国国防航空航天管理局 (NASA) 为了空间技术的研究,设计研制了速度为 500 幅/s 的新型间歇式摄影机,以适应恶劣环境下工作。期间 DB Milliken、Mitchell、Photosonics、Red Lake 四个厂家都生产 16mm 相机。Photosonics 也研发了 35mm 和 70mm 系列的高速相机,并配以半自动和全自动跟踪架。

直至 20 世纪 60 年代,以 AWRE、Barr、Steoud 以及 Beckman Whitley 为代表的转镜式相机始终主宰着超高速摄影领域。

2. 电子成像技术的发展

光学机械式高速摄影机虽然工作稳定可靠,像质较好,使用面广,但是在时间分辨率方面要有更大的提高是有困难的。1949 年,countey-prett 教授利用电与磁的作用使电子束偏转扫描,以达到比光学机械系统大得多的扫描速度。研制了第一只变像管,时间分辨率为 $(10^{-7} \sim 10^{-8})\text{s}$ 。

20 世纪 50 年代,电子摄像管可在相对暗背景下记录单幅高质量图像。1960 年,美国空间技术实验室研制出了 STL 变像管高速摄影机。它由光电阴极、电子透镜和荧光屏组成。记录介质为 (4×5) 英寸 Polaroid 或普通胶片,可产生三帧连续图像,每幅大

小为 $17\text{mm} \times 25\text{mm}$, 分辨率为 12 对线/mm, 速度为 $(200 \sim 2000000)$ 幅/s, 时间分辨率可达 0.5ns , 触发至第一幅图像之间的延迟仅为 12ns 。

1969 年, Imacon 相机问世, Hadland Photonics 有限公司和 Imco 光电有限公司因此在图像转换领域成为领头羊, 制造出一大批帧速率为 $(10000 \sim 600000000)$ 幅/s、扫描时间分辨力为 2ps 的高速摄像系统。

3. 磁带记录的历史

1884 年, Paul Nipkow 提出了原始 TV 系统的原理。

1897 年, 德国人 Braun 研制出阴极管。一年后, Braun 提出了磁信号存储原理。此后, 视频磁带记录原理没有根本上的创造, 仅是技术上的进步。

直到 1923 年, Zworykin 获得了映像管专利, 一种高敏感 CRT 取代了 Nipkow 的圆盘, 这种技术同 Braun 的 CRT 相结合形成了当时的电视系统。

20 世纪 30 年代德国的电子和化学技术很发达, 从而推动了磁带录音机的发展。1928 年 Fritz Pfleumer 获得磁带(在胶带上涂上磁粉)的专利, 经过几年的研究探索, 1935 年 Basf 和 Telefunken 制作的磁带录音机在柏林电台展示, 使得磁带录音机成了磁带记录机的通用名词。

Bing Crosby 在娱乐行业是行家里手, 他的公司最终完成了一种高品质的磁带记录机。那时, 一个高品质的声音要求磁带的速度是 $(10 \sim 20)\text{cm/s}$, 作为视频记录需要更高的带宽。那时磁带较宽, 并使用多个并行磁头。1951 年 Bing Crosby 研制的系统使用了 12 个磁头, 磁带速度为 2.5m/s 。RCA 在 1953 年仅用了 3 个磁头, 速度为 9m/s 。

第一台商业的螺旋扫描 Ampex 视频磁带记录机在 1956 年完成。同年, IBM 公司研制出第一台磁盘内存电脑。

从 1970 年开始, 美国生产出了许多以常速记录的高质量彩色/黑白图像、曝光时间为 $100\mu\text{s}$ 的相机。两种真正的慢速运动分析

系统是日本的 NACsav200 和美国的 Instar 相机,他们都是对普通视频记录系统的改进型。

1980 年 12 月,美国 Eastman Kodak 公司生产出 SP2000 视频运动分析系统。从而真正开始了视频运动分析系统的研制和广泛应用。

1986 年,使用微处理器控制磁带记录的 Ektapro 系列 1000 取代了 SP2000,它的速度范围是(25~1000)幅/s,分幅后速度可达 6000 幅/s。它的性能虽比不上 SP2000 系统,但造价约比 SP2000 系统少 1/2 以上。

4. 半导体相机的发展

由计算机来存储和处理图像,是在计算机发展到大约第三代电脑的时候。在 20 世纪 90 年代,基于 PC 的高速相机结束了基于视频磁带的高速相机的统治。

20 世纪 70 年代的 TV 和视频相机体积大而且不方便携带,半导体 TV 传感器的出现改变了这一切。目前,多数主流相机都是基于 CCD 和 CMOS 技术。

在 20 世纪 90 年代,半导体和电脑技术使得基于电脑的高速相机成为可能。PC 的内存大小和 CPU 的速度随时间的推移不断地提高,最终高速相机能够使用自身的半导体内存。

数字存储运动分析系统比如美国视频研究机构生产的 PhantomV2.0,相对于磁带存储系统来说有许多优点,系统可连续存储图像,当空间不足时,最早存储的图像则释放掉,以保证继续存储。图像在存储过程中,可选择性地存储所要保存的部分。该系统满分辨率的摄像速度可达 500 幅/s。

1989 年问世的 Ektapro1000 EM 是一种固态电子存储系统,可以 1000 幅/s 的速度存储 1200 帧信息,或以 6000 幅/s 存储 7200 幅分幅图像信息,满画幅可连续记录 1.2s,可以手动控制,也可遥控。

1993 年出现的 Ektapro HS 4540 运动分析系统使帧速提高至 4500 幅/s。系统采用数字摄像技术,可在电存储器里存储 5152

幅图像,这些数字图像可即刻从存储器里重放。该系统的传感器大小为 (256×256) 像元,传感器的灵敏度为 ISO3000,可由 RS232 /IEE 接口同计算机进行通信。

由于使用了 PC,高速相机的价格降到了一个新的水平。高速影像通常记录时间不长,大多数都是在几秒的时间内。当事件结束后相机停止工作,图像采用循环记录的工作方式。视频磁带记录仪可以长时间记录,但磁带须 $(5 \sim 20)$ min 左右时间来重绕,而半导体相机能够连续记录,并当事件结束后相机就停止。但 PC 的存储空间、显示、硬拷贝设备和后期处理都很方便容易。

在 21 世纪开始到现在(2005 年),实际上所有高速相机都是基于 PC,没有什么大的明显改变,只是速度和记录时间在不断增加。基于 PC 的数字高速影像技术才发展了 10 年,它的前任(磁带式)是 20 年,更早的(胶片式)是 60 年。

我国高速摄影机的研制可以追溯至 20 世纪 50 年代,然而大规模的研究开始于 1963 年,受国防科技研究需要的牵引,发展很快。到 80 年代末,我们已经研制成功几乎所有类型的光机式高速相机和主要类型的变像管高速相机,并达到了国际先进水平。

1993 年西安光机所研制出了我国第一台 HTV - 500 高速电视及录像系统,其性能指标达到了国际先进水平,其原理和性能指标将在第 2 章中详细介绍。

1.2 高速摄影的种类

高速摄影综合使用光、机、电、光电传感器与计算机等一系列技术。高速摄影按其作用技术可以分为光机式、光电子类与可见化技术。

1.2.1 光机式相机

所有使用几何光学原理及高速动作的机械机构实现对快速现象观测记录的设备,统称为光机式高速相机。它通常又可以分为

以下3类。

1. 间歇式高速摄影机

相机有输片、收片与光学系统。底片在抓片机构的拖动下间歇运动。曝光在底片静止的片刻完成。限于底片两侧齿孔的强度,这类相机的拍摄速度的上限为360幅/s。底片通常长约(200~300)m。结果可以按放电影的频率放映,使原有现象变化的速度放慢至多15倍,也可以用专门的判读仪测出运动的多种参数。我们通常看到的体育运动的慢动作,早先都是用这类摄影机拍摄的,速度约在(50~100)幅/s之间。近十多年来,人们逐渐使用了高速视频录像技术代替了此类高速摄影机。

2. 光学补偿式高速摄影机

在这类相机中,底片连续运动,从静止逐步达到某一稳定速度,为了获得清晰的图像,人们使用移动的透镜、旋转的棱镜或反射镜,使图像在曝光时间内与底片同速运动、相对静止,目前使用最多的是旋转棱镜。这类相机的底片长度通常在(30~120)m之间,最长也有600m的,所得结果可以放电影。由于光学补偿式高速摄影机结构简单,操作方便,体积小而造价低廉,它被广泛地应用于研究各种发光的和不发光的(加照明装置)快速现象,如导弹的发射、工业机器的运转、流体力学、爆轰学、加工工艺研究、材料力学、航空航天技术等领域。

这类相机还可按底片运动的方式分为牵引输片式和鼓轮式,牵引输片式相机的胶片总长约(200~300)m,拍摄频率每秒数千幅,16mm胶片拍摄频率上限为1.1万幅/s。鼓轮式相机的底片固定在一个高速旋转鼓轮的内表面或外表面上,片长约1m,拍摄频率可达数万至数十万幅每秒,画幅总数可达到数百至数千幅。

3. 转镜式高速摄影机

在这类相机中,底片固定在暗箱内一个近似圆弧的片架上,用旋转反射镜使成像光束在底片上高速扫过。如在底片前面放置一排小透镜,光束扫过它们时会在底片上形成一幅幅图像,构成所谓分幅相机。如在光学系统前设置一个狭缝,将目标成像在狭缝上,