

高等学校工科电子类教材

成像跟踪技术导论

杨宜禾 周维真

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书论述成像跟踪的基本概念、系统结构及一般设计方法。全书分基础篇及结构篇两部分。基础篇叙述图像生成及图像处理方面的基础知识；结构篇叙述成像跟踪系统总体设计、目标运动描述及跟踪、跟踪处理器、跟踪与估值、系统综合与设计等内容。

本书可作为图像传输与处理、计算机及应用、自动控制、光电子技术、交通信号与控制、广播电视工程、火力控制、导弹制导等专业的研究生、本科高年级学生的教材，亦可供从事上述工作的科学工作者、工程技术人员、管理工作、维护使用人员阅读。

陕新登字 010 号

高等学校工科电子类教材

成像跟踪技术导论

杨宜禾 周维真

责任编辑 夏大平

西安电子科技大学出版社出版发行

西安电子科技大学印刷厂印刷

新华书店经销

开本 850×1168 1/32 印张 8 字数 193 千字

1992 年 4 月第 1 版 1992 年 4 月第 1 次印刷 印数 1—2 000

ISBN 7-5606-0147-2/TN · 0055 (课) 定价: 2.55 元

目 录

绪论	1
----------	---

第一部分 基 础 篇

第一章 图像生成	7
§ 1-1 成像几何学	7
§ 1-2 成像亮度	10
§ 1-3 成像装置	12
第二章 图像的预处理	15
§ 2-1 噪声抑制	15
§ 2-2 灰度校正	21
§ 2-3 几何校正	25
§ 2-4 散焦校正	27
思考题	28
第三章 图像特征提取	29
§ 3-1 边缘点检测	29
§ 3-2 局部边缘连接	38
§ 3-3 参数空间边缘点聚类	40
§ 3-4 边缘跟随方法	43
§ 3-5 区域合并方法	48
§ 3-6 区域切分方法	50
思考题	54
第四章 图像特征描述	56

§ 4-1 线特征描述	56
§ 4-2 区域特征描述	64
思考题	70
第五章 图像匹配	71
§ 5-1 模板匹配	71
§ 5-2 连续图像的匹配滤波	73
§ 5-3 离散图像的匹配滤波	77
§ 5-4 图像配准	79
§ 5-5 实用匹配算法	83
思考题	89
第六章 图像识别	90
§ 6-1 特征选择	90
§ 6-2 统计识别方法	96
§ 6-3 结构识别方法	102
思考题	107

第二部分 结 构 篇

第七章 成像跟踪系统的总体设计思想	108
§ 7-1 总体设计思想	108
§ 7-2 设计举例	110
思考题	112
第八章 目标运动描述及跟踪	113
§ 8-1 目标运动参量描述	113
§ 8-2 运动理解	125
§ 8-3 特征预测器	129
§ 8-4 跟踪波门及其自适应调节	134
思考题	140
第九章 跟踪处理器	141
§ 9-1 跟踪状态估计	142

§ 9-2 跟踪模式	149
§ 9-3 瞄准点选择	171
§ 9-4 多目标跟踪	179
思考题	200
第十章 跟踪与估值	202
§ 10-1 估值理论概略	203
§ 10-2 估值理论在成像跟踪系统中的应用	211
思考题	218
第十一章 系统综合与设计	219
§ 11-1 系统综合	219
§ 11-2 美陆军白沙靶场 RTV 系统设计思想分析	223
§ 11-3 反导导引头智能跟踪系统设计思想分析	234
参考文献	244

绪 论

一、成像跟踪的意义

利用景物的图像特征对运动目标进行跟踪称为成像跟踪。跟踪装置通常是由探测系统和伺服机构联合组成的。探测系统提供测量信息，伺服机构完成对目标的跟踪。跟踪系统的总体性能主要指跟踪速度、跟踪加速度、跟踪的空间范围（视场）、跟踪频率范围等。这些总体跟踪性能很大程度上依赖于探测系统的灵敏度和精度这两个主要性能。跟踪系统对目标的探测跟踪有点探测跟踪和成像探测跟踪两类方式。点探测跟踪所能提供的信息有点的辐射能量、点位置及其变量；成像探测跟踪能提供的信息有目标的辐射亮度及其分布，据此可进一步感知目标的形状特征及矩描绘特征，进而确定目标的位置及其变量。因此，成像跟踪方式较点跟踪方式所能感知的信息量要丰富得多、精确得多。在自然干扰及人工干扰情况下，成像跟踪可以根据其丰富的信息量去抗抑干扰的影响以提高探测跟踪精度。在现代跟踪系统中，往往有智能化的跟踪需要以适应诸如工作环境的变化、工作状态的变化、不同工作阶段的变迁以及人工干扰的影响等。智能化程度要根据所提供可能的信息量来决定。由于成像跟踪所能提供的信息量较点跟踪丰富得多，所以成像跟踪方式较点跟踪方式的智能化程度高。

成像探测跟踪系统具有图像识别功能，可以用它来从复杂的

背景中辨认出目标及其类型。由于成像跟踪具有较高的跟踪精度、较高的智能化程度及图像识别功能，因而受到人们的广泛关注。

对成像系统来说，通常需要采用扫描方式对物空间进行分割按序采样，然后再复合成像；近代的点探测系统也多采用扫描方式以提高探测系统的工作性能。因此，采用扫描方式工作的探测系统在对目标进行探测时，在目标距离较远的情况下，所探测到的只是目标的像点；当目标距离变小后，便逐渐呈现出目标像来。所以，可以认为采用扫描方式工作的探测系统是一种泛成像探测系统。人们现在所研究、应用的高性能的跟踪系统正是这种泛成像跟踪系统。

二、成像跟踪的研究内容

成像跟踪技术有两个重要的研究方面，即序列图像的运动分析及成像跟踪系统的结构设计。序列图像的运动分析是成像跟踪的基础。已经提出的分析方法有光流法、图像序列理解法等多种^[1,2,42]，本书将予以适当叙述。成像跟踪系统的结构设计涉及成像探测及跟踪两个方面。本书将着重在这方面予以阐述，成像系统研究的基本点是跟踪精度、智能化及图像识别功能三个方面。成像跟踪系统的具体研究内容主要是：

1. 跟踪模式

目标图像的尺寸、形状、灰度及其分布，以及图像系统的分辨率等可因成像探测系统的结构、成像跟踪系统对目标所处的工作状态、环境条件等不同而有较大的差异，且具有时变性质。跟踪系统对目标所采取的跟踪模式应随上述诸图像参量而相应变化以得到最佳的跟踪性能。通常采用的成像跟踪模式有形心法、相关法、对比度跟踪法、动目标跟踪法等多种。研究的方面主要指各种算法的适用场合、可信度、单模运用或多模运用以及算法本身的难易程度及其实际可用价值。

2. 跟踪状态估计及状态的转换

对目标的跟踪是否正常取决于跟踪信号的强弱、目标本身的运动状况、跟踪系统的结构性能等因素，在跟踪过程中还会受到环境条件的影响。对跟踪过程中的跟踪状态进行估计是十分必要的。据此可采取相应的措施以便维持系统对目标的良好跟踪状态。跟踪状态的估计方法有灰度估计法、面积计算法等。

3. 多目标跟踪

视场中出现多个目标时要能根据目标的运动特性区分出新进入视场的或已从视场中消失了的目標、逐渐接近的或逐渐远离的目标、相同形状但不同面积的目标或相同面积但不同形状的目标，以及目标间相互阻塞等情况，还要根据图像序列的一致性计算去估计目标的运动状况。根据上面的分析以及测得的目标的特征信息对目标进行分类；并根据事先知道的目标类型及威胁大小对所有目标进行优先加权处理，以确定进一步的工作内容。

4. 滤波与预测

成像跟踪系统在噪声干扰条件下所测得的目标状态参量与目标的真实状态参量之间往往存在一定偏差，因而导致相应的跟踪误差。可以用滤波方法尽可能地减小这种误差量。从滤波方法中可提出对目标状态的预测估计。将估值理论应用于成像跟踪系统中就是要研究提高系统跟踪精度及智能化程度的具体方法以及估值运算的现实可行程度。

跟踪机构的分析、设计和研究，属于控制系统的范畴，具有一般的意义，对此本书不作具体讨论。

三、成像跟踪系统的组成

成像跟踪系统由摄像头、图像显示器、图像信号处理电路、伺服机构等部分组成。通常在成像跟踪系统中还含有图像识别部分。成像跟踪系统结构图如图 0—1 所示。

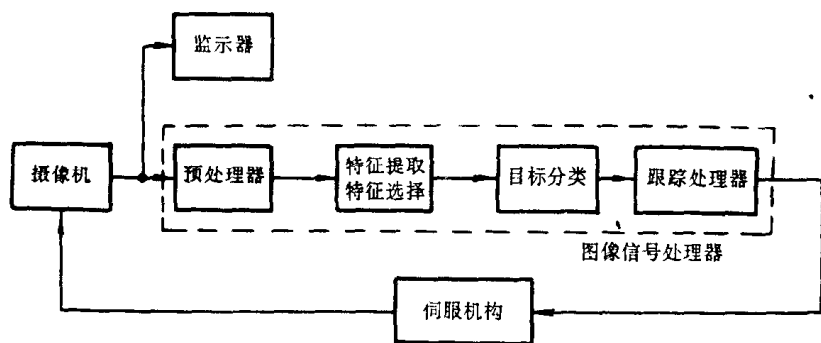


图 0-1 成像跟踪系统结构图

现就各部分一般情况作如下概述：

1. 摄像头

摄像头是对景物摄像的装置。视辐射源的特性不同，有毫米波摄像头、红外摄像头、可见光摄像头、激光摄像头等类型，甚或还有声成像装置。对辐射成像装置来说，通常均采用以甚小的瞬时视场在空间扫描的方式去摄取景物图像。成像跟踪系统中的摄像头在于给跟踪机构提供有关目标状态的信息，与观察系统要求不尽相同。成像跟踪系统并不苛求景物的纹理细节，空间分辨能力及辐亮度（或温度）分辨能力视整个系统的精度及灵敏度而定。

2. 图像监视器

图像监视器是用来显示景物图像以供观察用的。它通常采用模拟信号处理方式成像，供跟踪及识别用的信号均采用数字信号处理方式，因此需要通过 A/D 变换器将由摄像头摄取的时序模拟信号转换成数字信号后再行加工处理，A/D 变换器的容量及速度视摄像机的每帧总像素数、总灰度数及帧速决定。

3. 预处理器

预处理器用来对图像信号进行预先处理以改善图像质量或减少运算量。图像预处理的具体内容要针对具体系统的要求而定，归纳起来大致有以下诸方面：

(1) 去噪处理：可能采用的方法如邻域平均、低通滤波、中值滤波、匹配滤波、卡尔曼滤波等；

(2) 图像校正：有图像的几何校正、图像信号量化的归一化等；

(3) 数据压缩：有分层搜索、灰度压缩、图像投影、幅度排序等，邻域平均及滤波也是数据压缩的有效手段；

(4) 图像增强及补偿：有图像整体增强、高频补偿、直方图均衡化、对数变换、去图像信号均值处理等。

对具体系统来说，采用哪些预处理步骤要视摄取的图像信号质量及系统工作要求而定。

4. 特征提取及特征选择

从景物的原始灰度图像中提取图像的描绘特征是图像处理的重要步骤。从特征描绘的方法考虑，有线特征描绘和区域特征描绘两类。从这些描绘中可以得到目标的形状特征（面积、周长、长宽比、圆度、密度等）及目标的灰度矩（形心及高阶矩、不变矩等）。上述特征可以在图像处理过程中同时得出，然后根据图像识别及跟踪的需要，按照特征选择原则（如特征评价函数法等）在上述特征中选择一些有用的特征进行进一步的运算，以达到压缩特征维数、简化运算的目的。

5. 目标分类

根据经过选择的目标特征，按照一定的分类准则（如最小距离法、最小平均损失法、树分类法等）对目标进行分类以识别目标。对成像跟踪系统来说，通常只需辨明目标的类型，因而根据其形状特征便可以判定，并不需要了解有关景物图像中更多的细

节，所以成像跟踪的识别通常指统计识别方法。

6. 跟踪处理器

这是有关成像跟踪的关键部分，有关跟踪模式、跟踪状态估计以及滤波预测等运算都是跟踪处理器所包含的内容。跟踪处理器输出的信号量为跟踪系统相对于目标状态的误差信号量。

7. 伺服机构

由跟踪处理器送来的目标误差信号，先经伺服机构中的控制处理器处理，以便得出所要求的控制信号去控制、调节整个跟踪系统的工作状态，并驱动跟踪机构跟踪目标。

第一部分 基础篇

第一章 图像生成^[1,2]

§ 1-1 成像几何学

大多数的成像装置是采用一组透镜在图像平面或焦平面上产生景物的图像的。景物与图像的几何成像关系可用图 1-1 的摄像机模型来表示。图像平面位于透镜的后方且图像被倒置。为便于分析与更直观起见,可将图像平面转置到景物的同一侧,如图 1-2 所示。由此得到的是相同的图像,区别仅在于未倒置。

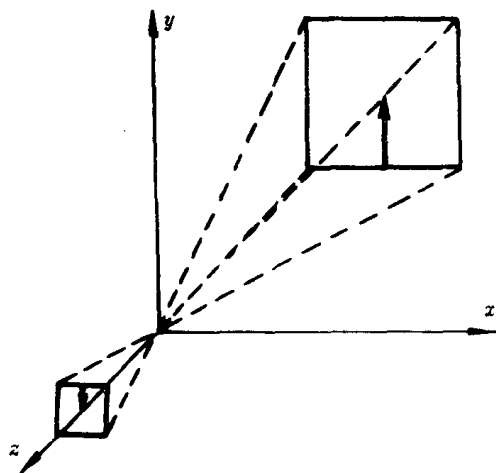


图 1-1 摄像机模型

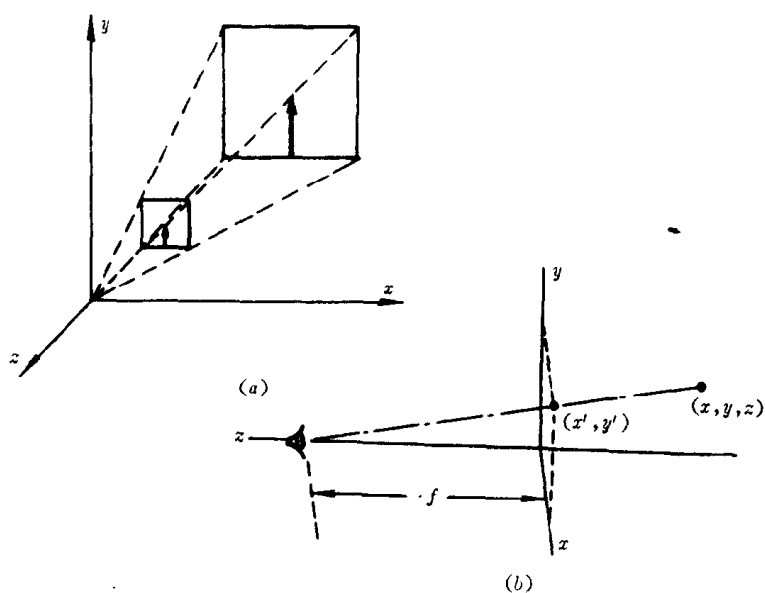


图 1-2 转置模型

设置三维坐标系如图 1-3 所示。图像平面重合于 $x-y$ 平面。视点(透镜中心)位于 z 轴上 $z=f$ 处 (f 为透镜的焦距)。

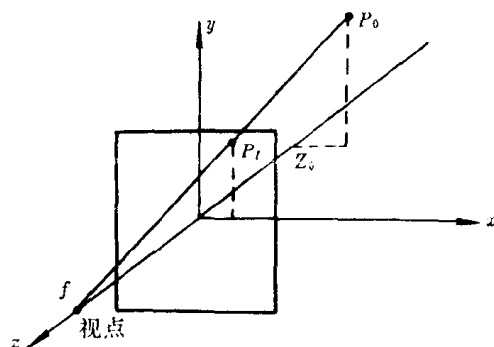


图 1-3 成像三维坐标系

根据图 1-3, 可得到物点 P_0 与像点 P_i 的几何关系, 有

$$\frac{x_l}{f} = \frac{x_o}{f - z_o} \quad (1-1a)$$

$$\frac{y_l}{f} = \frac{y_o}{f - z_o} \quad (1-1b)$$

$$z_l = 0 \quad (1-1c)$$

一种有用的处理方法是赋予图像点 P_l 以深度表示, 其坐标 z_l 取与 x_l 、 y_l 相同的形式, 即定义

$$z_l = f \frac{z_o}{f - z_o} \quad (1-1d)$$

由此, 图像点 P_l 的坐标为

$$(x_l, y_l, z_l) = \left(\frac{fx_o}{f - z_o}, \frac{fy_o}{f - z_o}, \frac{fz_o}{f - z_o} \right) \quad (1-2)$$

上式称作直接透视变换。显然这是非线性变换。

利用广义坐标系可将上述透视变换化为线性变换以便于运算。一点的坐标向量 $V = (x, y, z,)$ 在广义坐标系中记作为

$$V = (wx, wy, wz, w) \quad (1-3)$$

式中 w 为任意常数。若已知 V , 只要将 V 中的前三个坐标值除以 w , 即可得到普通坐标系中该点的坐标。广义坐标有下述性质:

$$KV \underline{\Delta} V \quad (1-4)$$

即 KV 与 V 表示的是同一点。式中 K 是任意常数。

下面讨论在广义坐标系中物点与像点之间的线性变换。设物点坐标为 $V_o = (x_o, y_o, z_o, 1)$, 由物点到像点的变换矩阵为

$$A_{ol} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

则像点坐标为

$$V_l = A_{ol} V_o^T = \left(x_o, y_o, z_o, \frac{f - z_o}{f} \right)$$

$$= \left(\frac{fx_0}{f-z_0}, \frac{fy_0}{f-z_0}, \frac{fz_0}{f-z_0}, 1 \right) \triangleq (x_l, y_l, z_l, 1) \quad (1-6)$$

上式中的前三个坐标即是普通坐标系中的坐标（如式（1-1a）、（1-1b）与式（1-1d）所示）。

取 $A_{lo} = A_{ol}^{-1}$ ，易得到

$$A_{lo} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

则有

$$\begin{aligned} V_o &= A_{lo} V_l^T \\ &= (x_l, y_l, z_l, \frac{f+z_l}{f}) \\ &= (\frac{fx_l}{f+z_l}, \frac{fy_l}{f+z_l}, \frac{fz_l}{f+z_l}, 1) \\ &\triangleq (x_o, y_o, z_o, 1) \end{aligned} \quad (1-8)$$

由式（1-6）与式（1-8）可见，在广义坐标系中， V_o 与 V_l 之间是线性变换关系。矩阵 A_{ol} 称为透视变换矩阵。引入 $z_l = fz_0/(f-z_0)$ 这个参数，不是作为实际像点的坐标，而是为了使 A_{ol} 成为可逆方阵。

由式（1-6）可见，当物点相对视点的距离增大时（即 $-z_0$ 增大），像点坐标亦即像尺寸减小。因此，沿负 z 轴延伸的平行线所成的像将被畸变以致最终汇于一起。

§ 1-2 成像亮度

成像几何学用以解决物点与像点的位置关系。本节讨论图像的灰度（或亮度）与景物辐射及成像系统之间的关系。参看图1

—4。设图像平面上某小面元 dA_i 的信号量为 g ，成像系统所汇聚于该面元的辐射通量为 $d\Phi_i$ ，有

$$g = kd\Phi_i \quad (1-9)$$

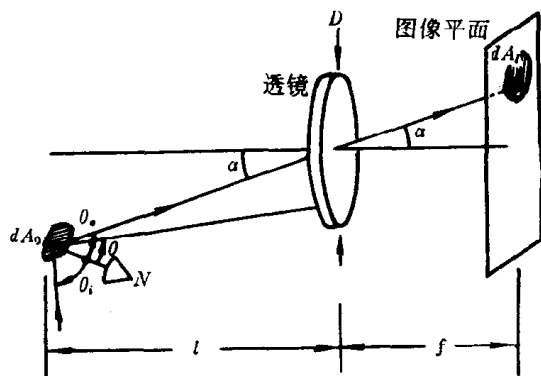


图 1-4 成像亮度模型

式中 k 为成像器件的转换系数。 $d\Phi_i$ 是由景物小面元 dA_o 所产生。设 dA_o 的辐射亮度为 $L(\theta)$ ，则 dA_i 接收到的由 dA_o 发出的辐射通量为

$$\begin{aligned} d\Phi_i &= \tau \int_{\Omega} L(\theta) dA_o \cos\theta d\omega \\ &= \tau dA_o \int_{\Omega} L(\theta) \cos\theta d\omega \end{aligned} \quad (1-10a)$$

式中， Ω 是入瞳对 dA_o 所张的立体角； τ 为透过率； π 为 dA_o 的辐射方向角。对于朗伯辐射体或漫反射体， $L(\theta) \equiv L$ ，则有

$$d\Phi_i = \tau dA_o L \int_{\Omega} \cos\theta d\omega \quad (1-10b)$$

当 dA_o 距成像系统较远时，可近似取 $\theta \approx \theta_o$ ，可有

$$d\Phi_i = \tau dA_o L \cos\theta_o \int_{\Omega} d\omega$$

$$\begin{aligned}
&= \tau dA_o L \cos \theta_0 \frac{\pi \frac{D^2}{4} \cos \alpha}{\left(\frac{l}{\cos \alpha} \right)^2} \\
&= \frac{\pi}{4} \tau L D^2 \cos^3 \alpha \frac{dA_o \cos \theta_0}{f^2} \quad (1-10c)
\end{aligned}$$

dA_o 与 dA_i 对透镜中心所张的立体角相等, 即

$$\frac{dA_o \cos \theta_0}{(l/\cos \alpha)^2} = \frac{dA_i \cos \alpha}{(f/\cos \alpha)^2}$$

有

$$\frac{dA_o \cos \theta_0}{l^2} = \frac{dA_i \cos \alpha}{f^2} \quad (1-11)$$

将上式代入式 (1-10c), 得到

$$d\Phi_i = \frac{\pi}{4} \tau L \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cdot \cos^4 \alpha dA_i \quad (1-10d)$$

由式 (1-9), 有

$$g = k \frac{\pi}{4} \tau L \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cos^4 \alpha dA_i \quad (1-12)$$

上式表明, 图像某像元的灰度正比于所对应景物单元的辐射亮度, 正比于系统相对孔径的平方, 且与像元的偏轴角 α 呈余弦四次方关系。实际的成像系统应选择合适的焦距与焦平面尺寸, 使 α 小到可略的程度; 或对系统加以校正以减小 α 对图像灰度的影响。

§ 1-3 成像装置

一、光导摄像管

在电视摄像机中广泛采用光导摄像管。其原理如图1-5所示。辐射图形被投射到光导层上。光导层可以看作为一个像元阵列, 其中每一个像元等效为一个电阻与一个电容的并联。电子束从