

# 实时双模图像跟踪系统技术研究

王虎元 刘永昌

(陕西青华机电研究所, 西安 710111)

**摘要** 利用一种可用于红外成像、可见光成像实时双模图像跟踪系统的硬件设计原理和软件设计特色,讨论了基于分割的质心跟踪算法、基于提边的差分跟踪算法和特征匹配跟踪算法的特点,在此基础上,提出并分析了双模置信度与融合跟踪算法,最后简述了伺服系统控制策略及实验结果。

**关键词** 图像制导, 双模, 图像跟踪, 特征匹配

## 1 引言

研究利用红外成像、可见光成像实现实时双模自动目标跟踪系统是当前精确制导技术的主要发展方向之一,它具有智能化程度先进,制导精度高,作用距离大,抗干扰能力和抗遮挡能力强等优点,其中目标图象的识别和跟踪算法是该系统的关键环节<sup>[1]</sup>。从最近各种国际会议与刊物发表的相关文献来看,各国政府对成像自动目标识别和跟踪算法研究投入的人力、物力大大增加,面对激烈竞争的国际形势,我国也投入了很大力量,并取得了显著的进展。通过对国外先进技术的跟踪与创新,我们对图像制导的跟踪算法进行了更深入的研究和优化,突出了实时、可靠、灵活的特点,提高了在复杂背景、干扰存在的情况下正确跟踪目标的概率。

本文以研究开发实时双模图像跟踪系统为背景,分析比较了该系统的跟踪算法,这些算法还具有多目标跟踪及在短暂遮挡后正确再捕获目标的能力。同时,算法各功能单元的相对独立性和模块化使系统具有良好的重构能力。该系统还可以进一步扩展,不但可对可见光、红外信号还可以对毫米波、激光和微波等信号进行处理和分析。

## 2 系统硬件原理

### 2.1 硬件设计思想

图像跟踪系统要求有很高的可靠性和实时性,采用双处理器并行结构完全可以达到所要求的指标,因此,在硬件设计上采用多功能、双处理器、并行流水线结构,提高了系统的模块化程度,容易增加新功能,实现系统的修改和升级,具有良好的重构能力和可开发性<sup>[2]</sup>。

### 2.2 硬件工作原理

系统采用具有流水线功能的4片IMSA110器件进行目标图像预处理,选取两片高速,多功能TMS320C30数字信号处理器(DSP)完成目标图像处理任务,多路模数转换器(A/D)采集多种传感器的输入信号,两路数模转换器(D/A)输出俯仰和偏航两路的控制信号,主控器协调各部分的运行(图1)。

系统工作原理:由传感器获取的图像信号经过视频预处理后送到下一级转换成数字量,然后分成两路,一路经IMSA110进行图像预处理,另一路直通过去,这两路信号经多路转换器后分别存入两块

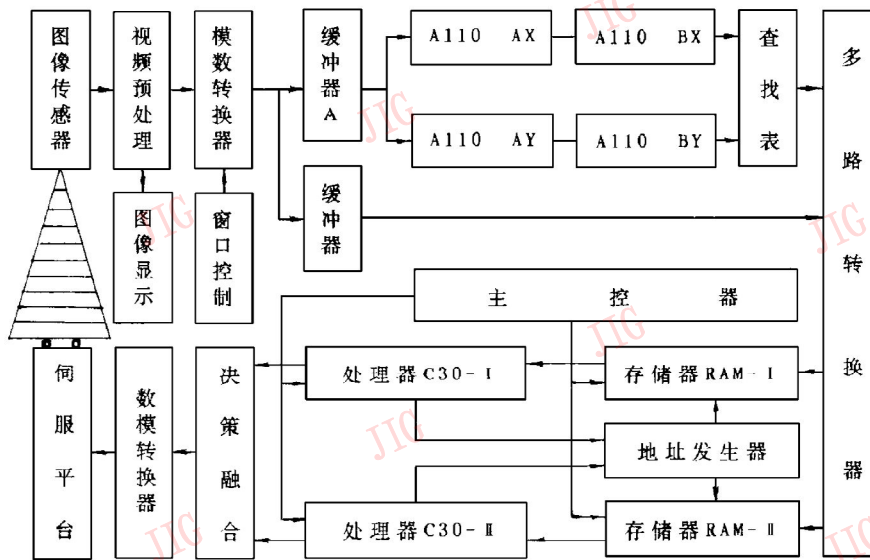


图 1 系统硬件结构

Fig. 1 Structure of system hardware.

存储器,当主控制器分别对两片 C30 加载各自的跟踪软件并启动它们独立运行后,存储器中的图像数据就成为 C30 的处理对象,经过计算,置信度判断和融合后,得出目标图像的位移视差,将视差信号经数模转换器转换后送去驱动伺服平台,使平台上的传感器对准正在跟踪的目标图像,由于传感器被放置在伺服平台上,所以当平台动作时,进入传感器的图像信号也随之变化,这种变化被 C30 计算并转化为位移视差再次送往伺服平台,如此反复,从而形成了闭环图像跟踪系统<sup>[3]</sup>。

### 3 软件设计的技术特色

#### 3.1 实时流水线图像预处理

图像预处理是指对原始图像进行灰度校正、噪声滤波和畸变校正,减少各种随机干扰造成的影响,为后续处理提供所需的图像信息。利用 IMSA110 流水线型二维数字信号处理器,可以实时完成一维或二维图像卷积和相关、图像增强、边缘检测和直方图均衡。

#### 3.2 双模并行处理

双模并行处理是指两种跟踪算法分别驻留在两片数字信号处理器(DSP)TMS320C30 上,处理来自同一个信号源的信号,这两种算法各有特点,相互可以取长补短,发挥各自的优势协调工作,提高跟踪精度和速度,增强跟踪的可靠性和置信度。这种跟踪模式还可以同时有数种不同的传感器信号输入,分别

由不同的 DSP 进行处理。

#### 3.3 抗短时遮挡效应

由于外界环境的复杂和各种随机干扰可能会使跟踪系统在跟踪过程中短时被遮挡,这很可能会丢失正在跟踪的目标,为了避免这种情况的发生,软件在设计上加入了记忆功能和对其运动方向、速度的预测功能,抗遮挡时间一秒钟左右。

#### 3.4 自适应阈值分割功能

自适应阈值分割就是当目标图像灰度值发生变化时,跟踪算法能自动地感知,并能及时采取措施适应这种变化,计算出正确的阈值,从而使目标图像能从目标背景中分割出来,以便确定出目标的位置。由于采用了梯度均值和 IMSA110 查找表(LUT)重置相结合的方法,使跟踪系统的自适应性得到改善。

#### 3.5 置信度判断功能

根据不同环境特性和导弹距目标的远近情况,两个加载不同算法的 C30 自动切换算法计算出两组结果,再由 PC 机或 C30 自身计算出两种算法各自的置信度,然后确定采用哪一个结果,这样可以大大提高可靠性和适应性。在整个跟踪过程中,由于目标的面积是由小到大连续变化的,不可能发生突变。目标的运动轨迹也是连续的,不可能有位置误差的突变,所以我们可以根据这两方面的变化确定算法所得结果的置信度。

### 3.6 自适应波门

波门实际是跟踪器真正的处理窗,它小于视场,可在视场内搜索目标并一直套住目标。反坦克导弹在攻击目标过程中,目标图像会在视场内的垂直方向或水平方向产生位移,同时目标图像的大小也会由小到大变化,为了一直套住目标图像不致丢失,波门应具有自动处理目标变化的能力。

## 4 跟踪算法设计

### 4.1 基于分割的质心算法

基于自适应分割的质心算法是以自适应分割图像预处理为基础确定目标中心位置的算法。首先对 IMSA110 的各个寄存器根据要求进行适当设置,同时不断地将自适应阈值分割功能所得到的分割阈值  $Y1$  和  $Y2$  写入 IMSA110 的 LUT 中,以使预处理得到的二值图能及时的提供给下一步处理,假设原始图像为  $\{F(x,y), x,y=0,1,\dots,N-1\}$ , 二值图像为  $\{G(x,y), x,y=0,1,\dots,N-1\}$ , 则有如下表示

$$G(x,y) = \begin{cases} 1, Y1 \leq F(x,y) \leq Y2 \\ 0, \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

为了计算出位移视差为  $(\Delta x, \Delta y)$ , 可将波门中的目标沿  $X$  方向和  $Y$  方向投影。在波门坐标系中,目标的坐标  $(x1, y1)$  计算公式如下所示:

$$x1 = \left( \sum_{0 \leq x \leq L} x G_x(x) \right) / \sum_{0 \leq x \leq L} G_x(x) \quad (2)$$

$$y1 = \left( \sum_{0 \leq y \leq L} y G_y(y) \right) / \sum_{0 \leq y \leq L} G_y(y) \quad (3)$$

第  $k-1$  帧的目标坐标  $(x1_{k-1}, y1_{k-1})$  与第  $k$  帧的目标坐标  $(x1_k, y1_k)$  之差即为目标的位移视差,

$$\Delta x = x1_k - x1_{k-1} \quad (4)$$

$$\Delta y = y1_k - y1_{k-1} \quad (5)$$

为了进一步对计算出来的位移视差的可靠性进行分析,下面引入几个特征值,

#### ① 目标区域的面积

$$S1 = \sum_{0 \leq x \leq L} G_x(x) = \sum_{0 \leq y \leq L} G_y(y) \quad (6)$$

#### ② 目标区域的长度

$$L1 = \max(x) - \min(x), G_x(x) > 0 \quad (7)$$

#### ③ 目标区域的宽度

$$W1 = \max(y) - \min(y), G_y(y) > 0 \quad (8)$$

#### ④ 目标运动的速度

$$V1 = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} / 0.02 \quad (9)$$

#### ⑤ 目标运动的方向

$$D1 = \text{tg}^{-1}(\Delta Y / \Delta X) \quad (10)$$

为了加入抗短时遮挡功能,可对这些特征值作相应的处理。根据目标运动轨迹、面积及长宽比的相对连续性,经过分析比较,可以大大提高正确跟踪目标的概率。

### 4.2 基于提边的差分法

基于提边的差分法就是将提边与差分相结合形成的一种算法(图 2),这种对差分法进行改进以后的算法,有一定的实用价值。简单差分法是一种有局限性的方法,它是通过比较目标在两个不同时刻的画面,区别出由于物体运动而造成的区域差别。在实际计算过程中,差分是指将两帧相邻目标图像逐点相减,并将结果记录下来形成差分图,在这个差分图上,如果值大于给定的阈值,则相应像素取“1”,否则取“0”,于是出现了运动造成的非零区,利用运动产生的区域就可检测出运动目标,推算出目标的位移视差,这种差分法是假定目标背景不动,只有目标在动。为了克服局限性,使其能在目标和背景都在运动(但运动的速度不一样)时也能检测出目标的运动,于是产生了基于提边的差分法。由于差分法是将前后两帧图像相减以区别运动区和静止区,这样得到的运动区域的中心是目标物体在前后两帧图像位置的中心点。对于运动比较慢的目标这种位置的差别意义不大,但对运动比较快的目标物体,要想得到目标的确切位置,同样需要改进差分法。首先,对 IMSA110 各寄存器设置适当的参数,使其处于提取边缘的运算状态,并选择适当的阈值,从而产生二值化的提边图像。其次,对同样的相邻两帧图像实施差分运算,并通过 IMSA110 阈值分割形成二值图,从而生成了一帧差分二值图。再次,将提边生成的二值图和差分生成的二值图逻辑乘,生成目标的边缘图像,这样增强了运动区域中后一幅图像的运动边缘。最后,利用投影法计算出目标的位移视差  $(\Delta x, \Delta y)$ , 投影方法见 4.1。

该算法特点:

①对于背景不动,目标运动的情况,简单的差分运算在检测目标位置时是行之有效的;

②对于背景和目標同时运动的情况,引入边缘提取算法,并与差分法相结合可以改善其跟踪效果;

③当目标运动速度比较快时,加入逻辑乘,并选择合适的阈值,通过投影可以计算目标的位置坐标。

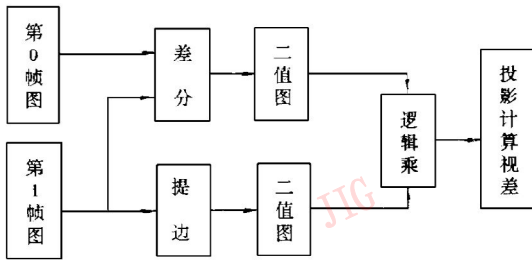


图 2 基于提边的差分算法图

Fig. 2 Sketch of the differential algorithm based on extraction edge.

### 4.3 特征匹配算法

特征匹配就是在一帧图像中选择一组在运动中具有不变性质的特征点与下一帧图像中的同类特征点作匹配,从而获得运动目标的移动偏差。在这种算法中,特征点的选取是十分重要的,它应具有对目标的大小、位置、方向和照度变化不敏感的特点,例如,灰度局部极大值点、局部边缘点、角点、孤立点等。特征点匹配算法可以使处理的数据量大大减少,由一帧的特征去寻找下一帧特征的可能匹配数目大大少于互相关算法,由于特征点的精心选取,使得在照度改变和目标发生几何变化时,其匹配精度的影响减小到最小。由于这种方法继承了相关算法精度高的优点,又舍弃了它计算量大的缺点,因而可以快速、可靠、精确地跟踪目标。

在图像  $\{f(x_i, y_j, t_{k-1}), i, j = 0, 1, \dots, N-1\}$  中,取互不重叠的处理窗口  $W_{m,n}$ ,  $m, n$  分别表示窗口的行和列包含的像素数,对每个位于  $W_{m,n}$  中的像素  $f(x_i, y_j, t_{k-1})$ ,取四个不同的方向;水平、垂直、左对角线和右对角线,求这个像素在每个方向上与相邻像素灰度差的平方之和。

取算子  $O(i, j) = \min \{S_h, S_v, S_{ld}, S_{rd}\}$ , 在  $W_{m,n}$  内求坐标  $(i^*, j^*)$ , 使得

$$O(i^*, j^*) = \max_{(i,j) \in W_{m,n}} \{O(i, j)\} \quad (11)$$

在  $W_{m,n}$  窗口内取得的位置  $(x_i^*, y_j^*)$  具有这样的特点,以  $(x_i^*, y_j^*)$  为中心,与它的 4 个方向邻点像素的灰度方差都很大。移动  $W_{m,n}$  位置,互不重叠地作上述处理。在相邻两帧图像  $f_{k-1}$  和  $f_k$  中分别求得含有  $M$  个特征点的特征点图像

$$\{F_i^{k-1}(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, M\}$$

$$\text{和} \quad \{F_i^k(x'_i, y'_i), i = 1, 2, \dots, M\}$$

其中  $k-1$  和  $k$  分别表示第  $k-1$  帧和第  $k$  帧图像。

为了寻找相互匹配的特征点,假设位置偏差

$(\Delta x, \Delta y)$  的变化范围是

$\Delta x \in [-r, r], \Delta y \in [-r, r]$ 。对  $f_{k-1}$  中的每一个特征点

$$F_i^{k-1} (i = 1, 2, \dots, M)$$

在  $f_k$  中的以下范围内去寻找匹配特征点,假定此区域内共有  $T$  个特征点,其位置在  $\{(x^t, y^t), t = 1, 2, \dots, T\}$ , 则  $F_i^{k-1}$  在  $f_k$  中可能的位置偏差共有  $T$  个 ( $T < M$ ), 记为  $(\Delta x^t, \Delta y^t) = (x_i - x^t, y_i - y^t), t = 1, 2, \dots, T$ 。匹配可能性的估计为:

$$\begin{aligned} Q_i(\Delta x^t, \Delta y^t) &= \sum_{(x,y) \in W(x_i, y_i)} [f(x, y, t_{k-1}) \\ &\quad - f(x + \Delta x^t, y + \Delta y^t, t_k)] \quad (12) \end{aligned}$$

式中  $i = 1, 2, \dots, M; t = 1, 2, \dots, T$ 。  $W(x_i, y_i)$  是以  $(x_i, y_i)$  为中心的图像窗口(取  $5 \times 5$  邻域),  $Q_i(\Delta x^t, \Delta y^t)$  是  $f_{k-1}$  中以第  $i$  个特征点位置  $(x_i, y_i)$  为中心的  $W(x_i, y_i)$  窗口内灰度曲面与  $f_k$  中以可能匹配特征点位置  $(x + \Delta x^t, y + \Delta y^t)$  为中心的  $W$  窗口内灰度曲面拟合程度的大小,如果  $Q_i(\Delta x^t, \Delta y^t)$  很小,说明这两个灰度曲面十分贴近,从而  $(\Delta x^t, \Delta y^t)$  作为  $(x_i, y_i)$  的位移偏差的可能性很大。从  $T$  个  $Q_i(\Delta x^t, \Delta y^t) (t = 1, 2, \dots, T)$  中找出最小值所对应的那个特征点  $F_i^k$  的位置偏差  $(\Delta x^t, \Delta y^t)$ , 同样可得到与  $M$  个  $F_i^k$  相匹配的  $M$  个特征点  $F_{k-1,i}$ , 并对应着  $M$  个位置偏差  $\{(\Delta x_i, \Delta y_i), i = 1, 2, \dots, M\}$ , 求其平均值,最后确定出目标的位置偏差,其算法如下:

$$\begin{aligned} \Delta X &= \sum \Delta x_i / M, \\ \Delta Y &= \sum \Delta y_i / M \quad (13) \end{aligned}$$

### 4.4 双模置信度与融合算法

双模置信度判别与融合以上述算法为基础,引入了置信度判别功能,使两种算法并行处理,并行判断,并将判断结果送到下一级进行决策融合,最后联合推断结果。整个过程是进入图像探测系统的视频信号经 A/D 采样数字化后,一路直接进入 C30-I 执行一个跟踪算法,另一路送给预处理单元进行边缘提取、二值化、图像增强等预处理操作后送给 C30-II 继续完成某一跟踪算法。每个处理器根据自己的算法都对目标坐标的估计值和跟踪置信度测量值进行计算,主控器对置信度变量进行检查,并决定哪一个跟踪器将控制导引头。主控器对不适当的跟踪器进行重新装定。每个跟踪器对目标在导引头视场中的位置进行估计。每个跟踪器输出结果的信赖

程度均由跟踪置信度指标来规定。跟踪置信度指标低就意味着这个跟踪器满足不了要跟踪目标的目标/背景/时间曲线的要求。这时主控器就对该跟踪器

进行重新装定。使用两个不同的跟踪单元进行优势互补,抵消了各自的不足(图 3)。

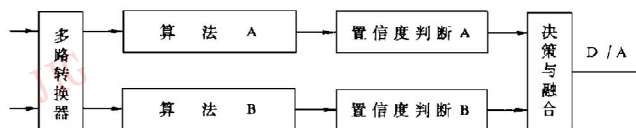


图 3 双模置信度判断与融合算法图

Fig. 3 Sketch of dual-mode confidence and fusion algorithm.

该算法特点:①由于采用了两种不同的算法,使各自的优点可以互补,各自的不足可以互相抵消,因而更适合在复杂环境下工作,增强了系统的适应性。②置信度和融合的引入,提高了系统的智能化程度,使运算量增大的同时目标识别和跟踪的可靠性也得以改善。③这种算法对硬件平台的性能和软件设计的技巧要求比较高,但它是一种值得研究的算法。

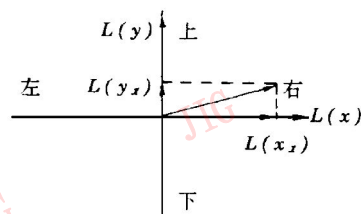


图 4 力的合成

Fig. 4 Composition of forces.

### 5 伺服系统控制策略

伺服系统控制策略是指对伺服系统的动作进行合理、匹配控制的方法。控制策略来源于伺服系统控制理论与处理器运算结果之间的完美结合,是实现系统闭环的关键环节,随伺服系统的不同可以采用不同的控制策略。此处信号处理器对伺服系统采用线性控制(也可采用对数控制或阶梯控制),并且俯仰作用力和偏航作用力各自独立,假定 D/A 在偏航方向的输出电压使陀螺产生的作用力为  $L(x)$ , D/A 在俯仰方向的输出电压使陀螺产生的作用力为  $L(y)$ , 视场中心的坐标为  $(0, 0)$ , 目标的坐标为  $(x, y)$ , 则有以下式:

$$L(x) = \begin{cases} k_x x, & |x| \geq r \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (14)$$

$$L(y) = \begin{cases} k_y y, & |y| \geq r \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

式中  $k_x, k_y$  和  $r$  是正常数,  $2r$  是以  $(0, 0)$  为中心的正方形边长, 图 4 表示  $L(x)$  与  $L(y)$  的矢量合成关系, 图 5 表示视场与目标位置关系, 当前目标被拉回视场中心所需作用力大小如图 4 所示

### 6 实验结果

通过对坦克、直升机及卡车等目标的外场跟踪试验, 在能见度不太好的情况下, 该跟踪系统对地面 Te-59 式坦克的最大跟踪距离为 2km, 对空中 Mi-17

式直升机的最大跟踪距离为 3km, 即使目标的运动姿态发生变化, 仍能可靠跟踪, 结果表明: 该系统对红外/可见光目标能有效地识别跟踪, 跟踪响应用时间 20ms, 跟踪精度 1 个像素点, 跟踪速度  $20^\circ/s$ , 完全不满足总体技术要求。

### 7 结束语

本系统设计由于结构灵活, 技术先进, 智能化程度高, 使得系统可重组性能很强, 可靠实用。该系统不仅能实现单传感器信息的双模处理算法, 而且能实现多传感器的信息融合算法。它是一个开放式的制导信息处理开发系统, 具有更深层次的发掘和研究价值。

跟踪器算法的研究比较复杂, 随着现代科技的迅速发展, 人们也在不断地探索跟踪方法, 使图像跟踪技术的发展向着高分辨率、高速度、自适应和多跟踪模式的智能方向发展, 它在许多科技领域上均能得到广泛应用。

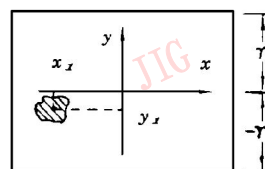


图 5 视场示意图

Fig. 5 Sketch of field of vision.

## 参考文献

- 1 毛二可. 精确制导信息处理技术研究中的一些问题. 见陈定昌主编. 精确制导技术文集, 1995: 347—353.
- 2 雷万云, 卫旭国. 复合制导信息实时处理系统. 见陈定昌主编. 精确制导技术文集, 1995: 405—411.
- 3 Gadgil S B. Real-time TV tracker for missile guidance. SPIE, 1992, 1699: 51—57.
- 4 Rosenfeld A. Image analysis and computer vision: 1994. CVIU, 1995, 62(1): 90—143.
- 5 Hassan MH. Real-time signal and image thresholding using advanced low-pass filtering. SPIE, 1988, 977: 30—38.
- 6 刘永昌, 李保平. 图像制导跟踪算法研究. 中国计算机应用, 成都: 成都科技大学出版社, 1994. 10.
- 7 Huang T S. Image sequence processing and dynamic scene analysis. NATO ASI Series F2, Springer—Verlag, 1983.



王虎元 1988年毕业于南京理工大学电子工程系, 获工学学士学位, 现在陕西青华机电研究所工作, 工程师, 主要从事图像信息处理的硬件、软件设计和开发等工作, 获部级科技进步二等奖 1 项, 发表论文 4 篇。

## Research on System Techniques of Real-Time Dual-mode Image Tracking

Wang Huyuan Liu Yongchang

(Shaanxi Qinghua Electro-Mechanical Research Institute, Xi'an 710111)

**Abstract** In this paper, the hardware designing principle and the software designing characteristic of tracking system of real-time dual-mode image used for visible or infrared light are introduced. The features of the mass centroid tracking algorithm, the characteristic matching algorithm and the differential tracking algorithm have been discussed. On the basis of these, the dual-mode confidence and fusion tracking algorithm are presented, and analysed. Finally, the controlled tactics of the servo system is briefed.

**Keywords** Image guidance, Dual-mode, Image tracking, Characteristic matching