

文章编号: 1672-8785(2014)07-0044-05

基于不变矩特征的红外成像制导跟踪算法研究

霍义华¹ 黄彪² 王雪梅¹ 雍杨¹ 罗冠泰¹ 罗镇宝¹

(1. 西南技术物理研究所, 四川成都 610041 ;

2. 总装备部重庆军事代表局, 重庆 610054)

摘 要: 随着红外成像制导技术的发展, 它对制导跟踪算法的精度和实时性的要求越来越高。制导系统已被要求在 20 ms 的时间内输出跟踪结果。某些跟踪算法虽然效果较好, 但达不到实时输出。经典的制导算法—相关跟踪算法主要基于像素灰度特征进行跟踪, 无法解决跟踪过程中由于目标的旋转、膨胀以及仿射变换带来的跟踪点漂移问题。为了解决经典相关跟踪算法无法解决图像旋转时的跟踪稳定性问题以及目标图像急剧膨胀时的跟踪点漂移问题, 研究了图像不变矩的特征。利用图像不变矩的旋转—伸缩—平移不变性, 选择合适的不变矩特征用于跟踪。通过用归一化的乘法相关函数以及基于相关系数值的模板更新策略设计跟踪算法, 解决了复杂背景及强噪声条件下不能对尺寸和形状发生变化的目标进行稳定跟踪的问题。

关键词: 跟踪; 红外目标; 不变矩特征; 旋转; 膨胀

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.07.010

Research on Tracking Algorithm for Infrared Imaging Guided Missile System Based on Invariable Moment Features

HUO Yi-hua¹, HUANG Biao², WANG Xue-mei¹, YONG Yang¹, LUO Guan-tai¹, LUO Zhen-bao¹

(1. Southwest Technical Institute of Physics, Sichuan Chengdu 610041, China;

2. Chongqing Military Representative Office of General Equipment Department, Chongqing 610065, China)

Abstract: With the development of infrared imaging guided systems, higher requirements are put forward to the precision and real-time performance of guided tracking algorithms. Currently, guided systems have been required to output tracking results within 20 ms. Although some tracking algorithms have good tracking effectiveness, they can not output their tracking results in real time. Since the classical correlating tracking algorithm is mainly based on pixel gray-level features, the tracking point drift problem caused by the rotation, expansion and translation of the target in the process of tracking can not be solved. To solve the problem that the classical correlation tracking algorithm can not operate stably when the image is rotating and the tracking point drift problem present when the target image is expanding quickly, the invariable moment features of images are studied. The features of rotation-scale-translation invariance of images are used to choose the suitable invariant moment features for tracking. The tracking algorithm is designed by using the multiplication correlating function and the template

收稿日期: 2014-04-30

作者简介: 霍义华 (1979-), 女, 山西吕梁人, 硕士, 工程师, 主要研究图像跟踪、模式识别。

E-mail: huoyihua@163.com

update function based on correlation coefficient. The problem that the infrared target of which the size and shape are changed in complex and yawp environment can not be tracked stably is solved.

Key words: tracking; infrared image; invariable moment feature; rotation; scale

0 引言

在现代高科技武器中, 精确制导是制导系统的关键技术, 它具有飞行路线机动灵活、任务规划时间短、协同作战能力强和命中目标精度高等诸多常规武器无法比拟的优点^[1]。

红外成像制导是当今精确制导发展的主流。它是利用目标与背景间红外辐射特征的不同而获取图像的。图像跟踪器通过实时识别由跟踪红外探测器摄取的红外图像、输出目标的位置和状态等信息控制伺服机构, 实现系统的末制导。

红外成像制导利用物体的辐射特性获取图像。与可见光电视制导相比, 红外成像制导能识别伪装目标, 适合在夜间、阴天和雨天等恶劣气候条件下工作。由于波长特性, 红外成像制导可得到分辨率高的目标图像。此外, 红外图像每个像素的数据可达到 16 位, 比可见光电视制导图像的 8 位数据格式更有利于跟踪, 比雷达的隐蔽性更好, 保密性更强。因此, 在近程及中远程导弹中, 红外成像常被用于末制导^[2]。

红外成像制导的主要模块由红外探测器、红外图像跟踪器以及伺服机构等组成。其中, 红外图像跟踪器是核心模块。跟踪算法的选择是导引制导武器精确命中目标的关键, 是红外成像制导武器的重中之重。

1 不变矩跟踪算法

1.1 算法原理

红外成像制导的图像跟踪器在跟踪时, 目标在红外成像系统中可能会发生形状、尺寸和方位等变化。因此, 需要提取目标在跟踪过程中保持不变的量作为目标的特征。不变矩就是保持不变的局部特征, 在目标图像的形状和灰度发生变化的情况下具有旋转-伸缩-平移 (Rotation-Scale-Translation, RST) 不变性^[3]。提

取不变矩作为不变性特征向量, 与基准图像的不变矩特征矩阵进行相关匹配定位, 可以稳定地跟踪目标。

1.2 算法的硬件平台

基于不变矩特征的红外成像制导跟踪算法是在以现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 和数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 为核心组成的硬件模块上实现的。红外探测器采集到的实时图像经 FPGA 送到 DSP; 经图像处理模块运算后, DSP 完成跟踪算法模块及图像信号的处理; 输出模块输出被捕捉目标的位置信号和调节控制信号等运算结果。基本的工作原理如图 1 所示。

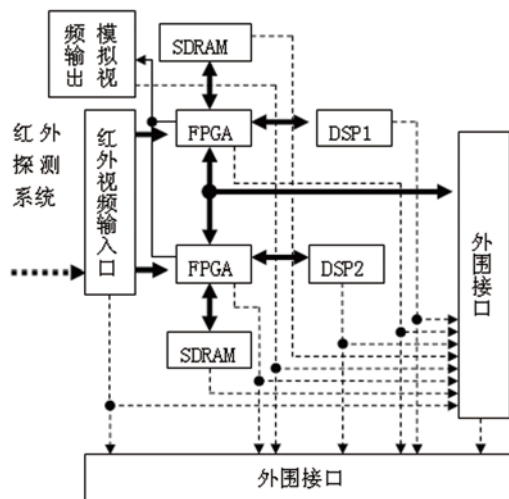


图 1 跟踪器的核心模块框图

1.3 算法的优点

制导算法对速度的要求很高, 运算必须在 20 ms 的周期内输出以控制伺服系统。所以, 算法的选择存在很大的局限。而一些跟踪性能良好的跟踪算法往往需要耗时几百毫秒甚至几秒, 远远不能适应制导系统跟踪器的需求。

与传统的制导跟踪算法根据图像的灰度特征值来解算跟踪不同, 基于不变矩的跟踪算法

提取的是图像中的不变矩特征。在导弹逼近目标时,目标图像形状会由于发生旋转、膨胀和仿射等变化而改变。从中选择变化量最小的特征,便能在一定程度上消除各种目标前后场形变对跟踪结果的影响。

1.4 算法实现

跟踪算法的框图如图 2 所示。

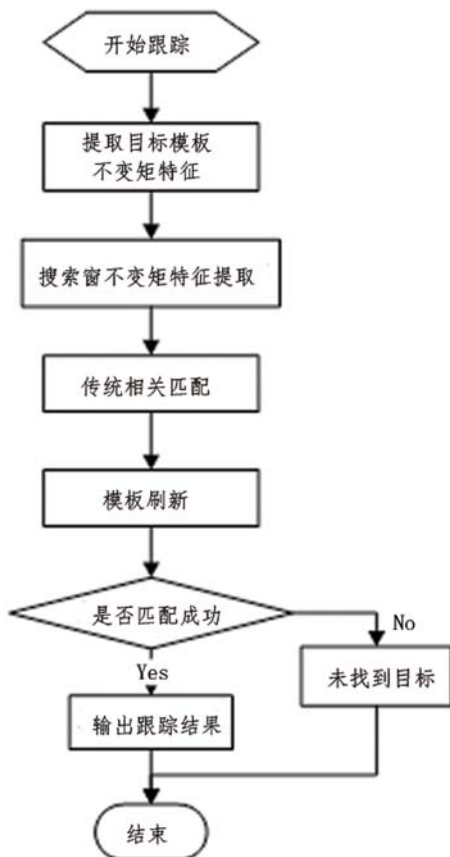


图 2 跟踪算法的框图

算法实现主要有以下几步:

- (1) 以模板图像作为处理区域, 计算不变矩;
- (2) 以搜索窗图像作为处理区域, 计算不变矩;
- (3) 在 DSP 中用汇编语言进行归一化乘法相关匹配;
- (4) 更新模板;
- (5) 根据相关系数判断是否可跟踪, 输出跟踪结果。

2 红外图像的不变矩提取

2.1 不变矩的定义

Hu 在 1961 年首先提出了矩的概念, 定义了矩和矩的基本性质^[4]。在统计学中, 矩被用来表征随机量的分布; 在红外图像处理中, 矩被用来描述一幅图像的特征。不变矩是图像经过平移、伸缩和旋转后仍然保持不变的特征量。

对于存储于二维矩阵中的数字图像, $p+q$ 阶原始矩可表示为

$$m_{pq} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N i^p j^q f(i, j) \quad (1)$$

式中, M 为图像的平行数, N 为图像的垂直列数, $f(i, j)$ 是图像在点 (i, j) 点的灰度值。 $p+q$ 阶中心矩可表示为

$$\mu_{pq} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (i - \bar{i})^p (j - \bar{j})^q f(i, j) \quad (2)$$

式中, $\bar{i} = m_{10}/m_{00}$; $\bar{j} = m_{01}/m_{00}$; $i \in M$; $j \in N$; p, q 为常数。

普通矩或中心矩仅具有平移不变性而不具备旋转、伸缩不变性。如果利用中心矩的一些线性组合表述矩特征 η_{pq} , 则可同时具备 RST 不变性^[5]。 η_{pq} 为归一化中心矩, 表示为

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{(\mu_{20} + \mu_{02})^{(p+q)/2}} \quad (3)$$

式中, $p+q=2, 3, \dots$

Hu 定义了由中心矩非线性组合构成的三阶规格化后三阶以下的七个不变矩。这些不变矩对平移、旋转和尺度变化有良好的不变性, 可表示为

$$\phi_1 = \eta_{20} + \eta_{02}$$

$$\phi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2$$

$$\phi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2$$

$$\phi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2$$

$$\phi_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]$$

$$\phi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})$$

$$\phi_7 = (3\eta_{21} - 3\eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (\eta_{30} - 3\eta_{12})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad (4)$$

式中, $\phi_1 \sim \phi_6$ 具有旋转、伸缩和平移不变性;
 ϕ_7 具有扭曲不变性。

2.2 不变矩的选择

计算不变矩时需要每个图像点进行计算, 运算量很大, 达不到 20 ms 内输出结果的实时要求, 所以必须进行简化。在工程实现中, 可对不变矩的特征进行取舍, 对图像做一些简化处理以节约运行时间, 达到实时性要求^[6]。

对图 3 所示的某红外目标提取不变矩特征, 结果见表 1。

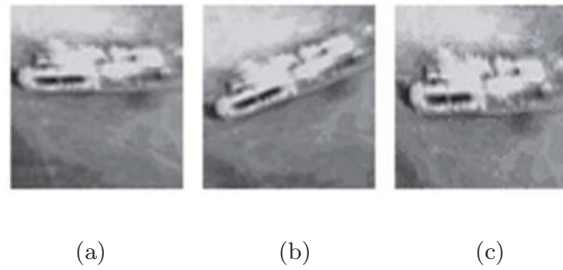


图 3 某红外模板图像的不同姿态图

表 1 某红外图像的七个不变矩特征值

	图像 a	图像 b	图像 c
不变矩 1	286.05	292.5	280.6
不变矩 2	66162	68021	64726
不变矩 3	1.1664×10^8	1.1031×10^8	1.0879×10^8
不变矩 4	1.3875×10^8	1.35×10^8	1.4435×10^8
不变矩 5	9.6469×10^{15}	8.938×10^{15}	1.0131×10^{16}
不变矩 6	3.5013×10^{10}	3.4546×10^{10}	3.5864×10^{10}
不变矩 7	-4.1789×10^{15}	-3.9681×10^{15}	-4.0681×10^{15}

由表 1 可以看出, 不变矩 1、2 在图像旋转、平移和尺度变化时变化最小。所以, 本文选用不变矩 1、2 构造不变矩特征向量。

3 相关跟踪

3.1 相关跟踪的原理

利用常规的归一化乘法相关函数和模板的不变矩特征矩阵遍历搜索窗口的不变矩特征矩阵, 计算遍历的每个点的相关值, 相关值最大的点即为最佳跟踪点的位置。相关系数矩阵 R 的定义可表示为

$$R(u, \nu) = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (f_{j+u, k+\nu} - \bar{f})(g_{j, k} - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (f_{j+u, k+\nu} - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (g_{j, k} - \bar{g})^2}}$$

$$\bar{f} = \frac{1}{MN} \sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N f_{j, k}}$$

$$\bar{g} = \frac{1}{MN} \sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N g_{j, k}} \quad (5)$$

式中, R 定义了模板和搜索窗口之间的相似程度; f 、 g 分别为搜索窗口及模板的不变矩特征矩阵, $\bar{f}$ 、 $\bar{g}$ 分别为搜索窗口及模板的不变矩特征矩阵的灰度均值; M 、 N 为模板图像的行数和列数。

由于相关系数已经作过归一化处理, 满足 $|R| \leq 1$ 。在 $[-1, 1]$ 范围之间比较两者的相似性。一般来说, $R(u, \nu)$ 越接近 1, 两者的关系越近似线性^[7]。

归一化相关匹配具有较高的适应性, 不受图像灰度值线性变化的影响, 可避免光强变化对灰度的影响。但这种算法的计算量很大, 在工程上可用 DSP 汇编语言实现, 耗时约 3 ms。

3.2 模板更新

在红外目标跟踪过程中, 当探测器等引入噪声时或被实时跟踪的目标存在云层遮挡、仿

射变换等因素时会导致形变。所以模板更新算法的设计是相关跟踪的一项关键技术。设计用于改变跟踪窗口大小和模板采样率等的更新算法,可以适应各种变换^[8]。

本文利用相关系数决定是否进行模板更新。模板更新的思想可表示为

$$M_{new} = \alpha M_{old} + (1 - \alpha) M_{curr} \quad (6)$$

式中, M_{new} 为更新后的模板, M_{curr} 为当前最佳匹配位置的图像, M_{old} 为当前模板, α 为加权系数。

R 越大,跟踪就越稳定,目标模板和当前帧图像的匹配就越好。所以可利用 R 的大小来确定当前帧是否需要更新模板。对于具体的更新算法,在模板图像为 M 行 N 列的情况下,当 $R > 0.95$ 时,不进行模板更新;当 $0.8 < R < 0.95$ 时,目标模板每帧更新一行。更新 M 帧后,模板更新完毕;当 $0.7 < R < 0.8$ 时,目标模板每帧更新两行。更新 $M/2$ 帧后,模板更新完毕;当 $R < 0.7$ 时,跟踪不可信,给出跟踪失败的标记。对于不同的项目, R 值的更新情况要根据模板大小及模板采用频率等因素来确定。更新算法中,将产生的新目标模板取代旧的目标模板,并保存相应的相关系数值。

模板更新策略还可解决目标丢失重捕的问题。跟踪时,在 DSP 内存中存储最近五帧中跟踪最好的目标模板。当目标丢失时,可通过用保存的最好的目标模板计算相关函数进行目标重捕。

采用适当的目标模板更新策略,可以有效地抑制跟踪点漂移,避免跟踪误差的累积,而且在目标丢失时可以进行目标重捕,使下一帧跟踪点回到正确的位置。

4 跟踪结果分析

以不变矩 1、2 为特征进行了相关匹配,得出的跟踪结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,在对某红外目标进行跟踪的过程中,目标发生了平移、旋转和尺度变化,利用不变矩特征的相关跟踪算法在抵抗旋转、膨胀方面效果显著,跟踪点的漂移量基本可以忽略。

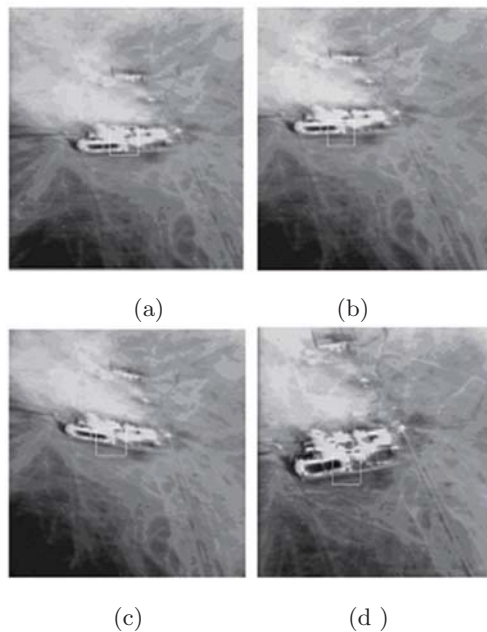


图 4 跟踪效果图

5 结论

利用图像不变矩特征具有旋转、伸缩和尺度不变性,选取适当的不变矩进行了归一化乘法相关,对模板的更新算法进行了设计,研究了用于制导系统的跟踪算法。该算法可在 20 ms 内输出结果,适用于工程应用。试验表明,该算法解决了在复杂背景和强噪声条件下不能对尺寸和形状发生一定变化的红外目标进行稳定跟踪的问题,增加了跟踪算法的稳定性。

参考文献

- [1] 汪朝群. 未来精确打击导弹武器中的导引头技术 [C]. 全国光电技术学术交流会论文集, 2004
- [2] 王立. 先进红外成像制导技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [3] 余静, 游志胜. 自动目标识别与跟踪技术研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2005(1):14-15.
- [4] Hu M K. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants [J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, IT28: 179-187.
- [5] 张坤华, 王敬儒, 张启衡. 基于扩展目标的不变矩跟踪算法 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(1):7-8.
- [6] 张伟, 吴刚, 侯晴宇, 等. 基于不变矩特征匹配的目标定位方法的研究 [J]. 光学技术, 2005, 31(3):441-442.
- [7] 杨昀, 张桂林. 一种新的相关跟踪算法的设计与实现 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 10(19):377-380.
- [8] 朱永明, 国澄明. 基于相关系数的相关跟踪算法研究 [J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(8):964-966.