

FPGA+DSP的图像目标跟踪器

张超岳 童宇 胡斌 田薇
西安应用光学研究所 陕西 西安 710065

摘要：本文介绍了一种基于FPGA与DSP架构的图像目标跟踪器设计。该设计通过集成图像采集、FPGA预处理、DSP核心算法处理、结果输出和控制等模块，实现高效且准确的图像目标跟踪。FPGA以其并行处理能力和灵活性，在预处理阶段发挥关键作用；而DSP则以其强大的数字信号处理能力，承担目标跟踪核心算法的实现。系统架构设计注重灵活性和可扩展性，各模块实现过程中充分考虑了硬件资源的优化和算法加速。

关键词：FPGA；DSP；图像目标跟踪器

引言：随着图像处理技术的不断发展，图像目标跟踪在军事侦察、智能交通、安全监控等领域的应用日益广泛。传统的图像目标跟踪系统往往存在处理速度慢、灵活性差等问题，难以满足实际应用的需求。因此，本文提出一种基于FPGA与DSP架构的图像目标跟踪器设计，旨在通过充分发挥FPGA的并行处理能力和DSP的数字信号处理能力，实现高效、准确的图像目标跟踪。该设计不仅提高系统的整体性能，还增强了其灵活性和可扩展性，为相关领域的研究和应用提供新的思路。

1 FPGA与DSP概述

1.1 FPGA的特点

现场可编程门阵列（FPGA）作为一种半定制化的集成电路，以其独特的灵活性、并行处理能力和高度的可重构性，在众多领域中展现出强大的竞争力。FPGA内部由大量的逻辑单元、可编程互连和输入输出块组成，这些元素通过软件编程的方式进行配置，从而实现了硬件电路的动态定义。这一特性使得FPGA能够快速适应不同算法和应用需求的变化，而无需重新设计硬件。此外，FPGA擅长处理高度并行化的计算任务，其内部的多个逻辑单元可以同时工作，显著提高了数据处理的速度和效率。同时，FPGA还具备低延迟的特点，因为数据在硬件电路中直接进行处理，减少了传统软件中常见的指令延迟。这些优势使得FPGA在需要高性能计算和实时响应的场景中，如图像处理、通信系统和数据加密等领域，具有不可替代的地位。

1.2 DSP的特点

数字信号处理器（DSP）是一种专门设计用于处理数字信号的微处理器，以其卓越的数字信号处理能力和高速运算性能著称。DSP的核心特点是高速处理能力和强大的浮点运算能力，这得益于其内部专用的乘法累加器和硬件实现的快速傅里叶变换等算法。这些特性使得DSP在

实时信号处理应用中，如音频处理、视频编解码和图像处理等，能够表现出色；DSP还具备低功耗的特点，这使得它在便携式设备和嵌入式系统中具有广泛的应用前景。DSP提供丰富的指令集和高效的开发工具，降低了开发的难度和成本；DSP的高集成度使其能够轻松地与其他外设和接口进行连接，构建出复杂的系统架构^[1]。

1.3 FPGA与DSP协同工作的优势

FPGA与DSP的协同工作，通过充分发挥两者的优势，实现了性能、灵活性和成本效益的全面提升。一方面，FPGA的并行处理能力和低延迟特性，使得它能够快速处理大量的并行计算任务，如图像处理中的滤波、变换等。而DSP则以其卓越的数字信号处理能力和高速运算性能，专注于处理信号的滤波、分析、识别和压缩等复杂算法。两者的结合，可以显著提高系统的整体性能和响应速度。另一方面，FPGA的灵活性和可重构性，使得系统能够根据不同的应用需求进行动态调整，而DSP的编程灵活性则允许用户根据需要对信号处理算法进行精细优化。这种灵活性不仅提高系统的适应能力，还降低开发成本和风险。另外，FPGA与DSP的协同工作还带来成本效益的提升，因为两者可以通过合理分工，共同承担系统的任务，避免了单一处理器可能带来的高昂成本。最后，这种协同工作模式还增强了系统的可扩展性和可维护性，为未来的升级和扩展提供了更多的可能性。

2 图像目标跟踪器的系统架构设计

2.1 总体架构

基于FPGA和DSP的图像目标跟踪器，这一设计是经过深思熟虑的，旨在通过集成多个关键模块，实现高效且准确的图像目标跟踪。这些模块各司其职，共同构成了整个系统的核心框架。图像采集模块作为系统的输入端，负责从外部设备捕获原始图像数据；FPGA预处理模块则对这些数据进行初步处理，以提高其质量和适用

性；DSP核心算法处理模块是整个系统的智能核心，负责执行复杂的目标跟踪算法；结果输出模块将处理后的数据以用户友好的方式呈现出来；而控制模块则作为系统的“大脑”，负责协调各个模块之间的工作，确保整个流程的顺畅进行。这样的架构设计不仅提高系统的整体性能，还增强了其灵活性和可扩展性^[2]。

2.2 图像采集模块

图像采集模块是整个图像目标跟踪系统的起始点，它扮演着至关重要的角色。该模块的主要任务是从外部设备（如高清摄像头、红外摄像头等）实时捕获原始图像数据。为了支持广泛的摄像头类型和接口标准，图像采集模块采用高度灵活和可配置的设计，确保能够轻松接入不同类型的图像源。采集到的图像数据以标准的图像格式（如RGB格式、YUV格式等）进行传输，这些格式不仅易于后续处理模块解析和处理，还保证了图像数据的准确性和一致性。图像采集模块还具备图像质量调整和同步控制等功能。通过调整图像的亮度、对比度等参数，可以确保采集到的图像数据满足后续处理的要求；同步控制功能则确保了图像数据的连续性和稳定性，避免因数据传输延迟或丢失而导致的图像失真或丢失。这些功能的实现，不仅提高图像采集的准确性和可靠性，还为后续处理模块提供高质量的输入数据。

2.3 FPGA预处理模块

FPGA预处理模块作为整个跟踪器的前端处理单元，承担着对原始图像数据进行预处理的重要任务。该模块首先接收来自图像采集模块的原始图像数据，并将其缓存到FPGA内部的存储单元中，以便后续处理。在预处理阶段，FPGA会进行一系列图像增强和预处理操作，如滤波处理（采用均值滤波、中值滤波、高斯滤波等方法）以去除图像噪声，边缘检测（利用Sobel算子、Canny算子等）以提取图像边缘信息，以及图像的缩放、旋转等操作。这些预处理操作旨在提高图像质量，使处理后的图像数据更加适合后续的目标跟踪算法处理。同时，FPGA预处理模块还具备高效的并行处理能力，能够实时处理高帧率的图像数据。

2.4 DSP核心算法处理模块

DSP核心算法处理模块是整个跟踪器的核心部分，它利用DSP强大的运算能力和丰富的指令集，执行目标跟踪的核心算法。该模块会根据不同的应用场景和目标类型，选择合适的目标跟踪算法，如基于相关滤波的目标跟踪算法、基于卡尔曼滤波的目标跟踪算法、基于深度学习的目标跟踪算法等。在算法执行过程中，DSP会对FPGA预处理模块提供的预处理后的图像数据进行深入分

析，利用算法中的特征提取、匹配和更新等步骤，计算出目标的位置、速度、轨迹等信息，DSP核心算法处理模块还具备算法优化和自适应调整等功能，以确保在不同场景和条件下都能实现准确的目标跟踪。

2.5 结果输出模块

结果输出模块是系统中至关重要的一环，它承担着将DSP核心算法处理模块计算得到的目标跟踪结果进行有效格式化和精准输出的任务。此模块紧密围绕用户需求和外部设备的特性，灵活地以多种格式（包括但不限于文本、图像和视频）展现目标的位置、速度、轨迹等关键信息。它还广泛支持各类输出方式和接口标准，例如USB、网络接口及HDMI等，为用户提供便捷的查看途径和进一步分析目标跟踪结果的可能。这种多样化的输出方式、高效便捷的输出手段以及广泛的接口兼容性，为用户提供了全面的、多角度的目标跟踪结果观察与分析手段，从而极大地增强了目标跟踪系统的实用价值和用户体验^[3]。

2.6 控制模块

控制模块作为整个系统的指挥中心，负责协调各个模块之间的工作流程和数据传输。该模块会根据用户输入的指令和参数，对图像采集模块、FPGA预处理模块、DSP核心算法处理模块以及结果输出模块进行控制和调度；控制模块还具备状态监测和故障诊断等功能，能够实时监测系统的工作状态和性能指标，及时发现并处理潜在的故障和问题。通过控制模块的协调和管理，整个图像目标跟踪器能够高效、稳定地运行，并满足不同应用场景的需求。

3 关键模块的实现

3.1 FPGA预处理模块的实现

FPGA预处理模块在图像目标跟踪系统中扮演着至关重要的角色，它负责对采集到的原始图像数据进行预处理，为后续的目标跟踪算法提供高质量的输入。该模块的实现主要包括以下几个步骤：（1）FPGA需要设计高效的图像数据接收与缓存机制。由于图像数据通常具有较高的数据量和传输速度，因此FPGA需要利用内部的高速存储单元（如BRAM）来缓存图像数据，并确保数据在传输过程中不丢失、不重复；FPGA还需要设计合理的数据缓冲区管理策略，以确保数据的连续性和完整性。（2）FPGA预处理模块需要对图像数据进行滤波处理。滤波是图像预处理中常用的一种技术，它能够有效地去除图像中的噪声，提高图像的信噪比。FPGA可以通过实现均值滤波、中值滤波或高斯滤波等算法，对图像数据进行滤波处理。这些算法的实现需要考虑算法的复

杂度、计算效率和资源占用等因素，以确保FPGA能够在有限的硬件资源下实现高效的滤波处理。（3）FPGA预处理模块还需要进行边缘检测和图像缩放等预处理操作。边缘检测是图像分析中的重要步骤，它能够提取出图像中的边缘信息，为后续的目标跟踪算法提供重要的特征信息。FPGA可以通过实现Sobel算子、Canny算子等边缘检测算法来完成这一任务。同时，为了适应不同分辨率的图像输入，FPGA还需要设计图像缩放算法，对图像进行缩放处理，以确保处理后的图像数据与目标跟踪算法的输入要求相匹配。在FPGA预处理模块的实现过程中，还要注意硬件资源的优化和算法加速。通过合理的硬件设计和算法优化，可以进一步提高FPGA预处理模块的处理速度和性能^[4]。

3.2 DSP核心算法处理模块的实现

DSP核心算法处理模块是图像目标跟踪系统的核心部分，它负责执行目标跟踪的核心算法，并计算出目标的位置、速度等关键信息。该模块的实现需要充分考虑DSP的硬件特性和算法要求，以确保算法能够在DSP上高效、准确地运行。第一，DSP核心算法处理模块需要选择合适的目标跟踪算法，根据应用场景和目标类型的不同，可以选择基于相关滤波的目标跟踪算法、基于卡尔曼滤波的目标跟踪算法或基于深度学习的目标跟踪算法等。在选择算法时，需要考虑算法的准确性、实时性和鲁棒性等因素，以确保算法能够满足实际应用的需求。第二，DSP核心算法处理模块需要对算法进行高效的实现和优化，由于DSP具有强大的运算能力和丰富的指令集，可以通过优化算法的数据路径、利用DSP的并行处理能力、减少算法中的冗余计算等方式，进一步提高算法的执行速度和性能；还需要注意算法的内存占用和功耗等问题，

以确保算法能够在有限的硬件资源下高效运行。第三，在实现DSP核心算法处理模块时，还需要设计合理的算法更新和自适应机制，由于目标跟踪算法通常需要根据实际情况进行动态调整和优化，因此需要设计算法更新机制，以便在算法性能下降或目标场景发生变化时能够及时更新算法；还要设计自适应机制，使算法能够根据目标的运动状态和场景变化自动调整参数和策略，以提高算法的鲁棒性和适应性。

结束语

综上所述，基于FPGA与DSP架构的图像目标跟踪器设计，充分利用了两者的优势，实现了高效、准确的图像目标跟踪。随着技术的不断发展，该系统有望在军事侦察、智能交通、安全监控等领域发挥重要作用。未来，将继续优化系统性能，拓展应用范围，以期在更多领域实现图像目标跟踪技术的广泛应用。

参考文献

- [1]谢凝.基于FPGA和AD9914的可变频率源设计[J].航空计算技术.2022,52(4).DOI:10.3969/j.issn.1671-654X.2022.04.025.
- [2]刘宇,姚远程,秦明伟.基于FPGA的多通道信号源设计与实现[J].测控技术.2020,(10).DOI:10.19708/j.ckjs.2020.10.011.
- [3]许剑清.基于FPGA+DSP架构的图像目标跟踪器研制[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2019.DOI:10.7666/d.D01586042.
- [4]马潇,李新祺,刘镇源,等.基于背景感知相关滤波跟踪器的目标快速跟踪方法[J].兵工学报,2024,45(2):497-503. DOI:10.12382/bgxb.2022.0708.