

FPGA Implementation of Image Feature Matching Algorithm*

CHEN Chao*

(Information Center, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: Image feature matching algorithm, which is widely used in many fields, is a process of feature extraction for two images in the same scene under different conditions. Aiming at elevating the real-time performance, data accuracy and environmental adaptability, this design proposes a development platform that based on FPGA to realize the SIFT algorithm. The matching results show that SIFT algorithm that has superior adaptability to the image rotation, lighting, affine and scale variance is currently the most effective matching algorithm. SIFT algorithm selected in this design can satisfy the requirements of feature matching and has actual application value.

Key words: image feature matching; SIFT algorithm; feature points; FPGA

EEACC: 6135E; 7220

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.020

图像特征匹配算法的 FPGA 实现*

陈超

(东南大学网络与信息中心, 江苏 南京 210096)

摘要: 图像特征匹配算法是对同一场景不同条件下所获取的两幅图像进行特征提取的过程, 目前被广泛应用于多个领域。针对传统匹配算法存在的实时性差、准确度不高、环境适应能力弱等问题, 本设计提出了基于 FPGA 开发平台实现的 SIFT 算法。匹配结果表明: 该算法对于图像的旋转、光照、仿射、尺度等具有良好的不变性, 能满足特征匹配的需求, 存在一定的实际应用价值。

关键词: 图像特征匹配; SIFT 算法; 特征点; FPGA

中图分类号: P231.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2021)01-0103-05

近年来, 无人机遥感技术中的图像识别技术在航天军事、农业监测等领域发挥了不可替代的作用, 尤其是在城市规划、环境检测、地图测绘、地形勘探等方面有着更为广泛的应用^[1-2]。在恶劣工作环境下, 利用无人机图像识别系统拍摄的图像往往存在图像缩放旋转^[3]、轻微抖动^[4]、噪声干扰^[5]、非线性畸变^[6]、布局重叠^[7]、图像序列获取不完整^[8]等问题。为了减小上述影响, SIFT 算法^[9-10](Scale Invariant Feature Transform, 尺度不变特征变换匹配算法)应运而生。SIFT 算法能在保证上述大部分现象稳定运行的同时继续提高数据获取的精确度和系统鲁棒性, 极大地提高人们的工作效率。但 SIFT 算法存在阈值过多的弊端, 即计算效率低, 实时性不够理想。因此对 SIFT 算法进行优化具有重要意义。

目前 SIFT 算法大多应用在电脑主机、DSP 等平台上。由于运用 SIFT 算法进行图像配准计算较为复杂^[11-13], 在上述平台上运行效率较差, 本设计给

出了基于 FPGA (Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列) 平台实现 SIFT 算法的运行架构方案。该方案的实现能提高图像数据获取的及时性和连续性, 具有一定的推广价值。

1 SIFT 算法

SIFT 算法是 David Lowe^[14] 在 2004 年提出的用于图像处理领域的一种可扩展局部特征描述子。在应对图像平移旋转、尺度缩放、明暗变化、仿射变换等情形时, 其具有良好的不变性与抗噪能力。SIFT 算法运算复杂, 但能获得大量的特征向量, 能充分达到特征匹配的需求, 经优化后甚至可以满足系统实时性的要求。SIFT 算法流程可简要概述为如下四步。

(1) 尺度空间的构建: 在实现尺度空间时通常使用 DoG (Difference of Gaussian, 高斯差分函数) 来表示, 首先通过连续减小原始图像 (降采样) 的顺序获得从大到小不同尺寸的一系列图像。原始图像用作

金字塔的底层,每次降采样获得的新参照用作原图像的上一层。原始图像的尺寸和顶部图像的尺寸共同确定了金字塔中的层数。随后,为反映尺度连续性,对高斯金字塔进行高斯滤波。如图 1 所示,高斯模糊被用于金字塔每层中具有不同参数的图像。金字塔每层的多张高斯模糊图像被集体分为一组 (Octave)。

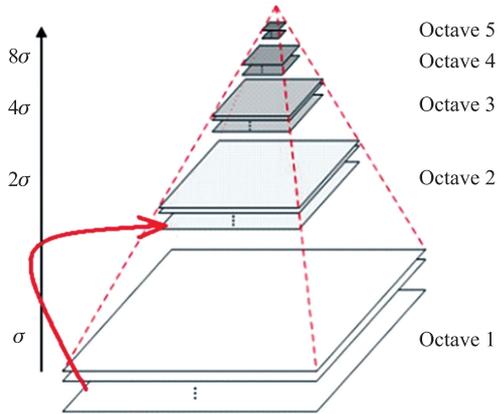


图 1 高斯金字塔示意图

最后,为得到 DoG 尺度空间,利用不同尺度的高斯差分核与输入图像 $I(x, y)$ 卷积生成高斯图像差分,如式 (1) 所示。

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (1)$$

式中: $D(x, y, \sigma)$ 为高斯图像差分, $G(x, y, \sigma)$ 为高斯滤波器,函数定义为 $\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2}$, $L(x, y, \sigma)$ 为尺度空间的尺度,函数定义为 $G(x, y, \sigma) * I(x, y)$, (x, y) 为图像的像素位置, σ 为尺度空间因子, k 为相邻尺度空间倍数的常数。

(2) 尺度空间极值检测:特征值由差异空间的局部特征值形成。通过比较每个像素及其周围每一个邻域像素点来查找差异函数的特征值,以查看它与其参照图和比例域的相邻点大小是否一致。如图 2 所示:中间检测点与相同比例的 8 个相邻值和上下相邻尺度的 9 个值相比,保证在尺度范围和二维图像范围中都检测到特征值。此外,受边缘响应的影响,由此产生的离散空间的特征值不是真正的

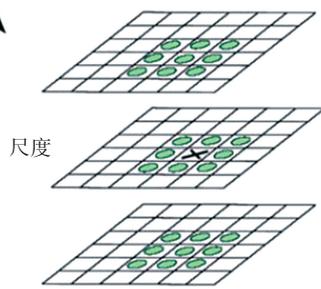


图 2 极值点检测示意图

特征值,还需对标度空间 DoG 函数进行曲线拟合,进而提高特征值的准确度和稳定性。

(3) 特征点定位:要使关键描述符具有旋转不变性,有必要为每个关键点分配参考方向。图像梯度用于找到邻域中结构的稳定方向。如果在差分金字塔中检测到特征值,则采集并处理其所在高斯金字塔相邻窗口中像素的方向分布特征和梯度。之后,处理邻域中的像素的梯度和方向以形成直方图。如图 3 所示,梯度直方图分为 8 列 (箱),范围为 0 到 360° ,每列 45° 。直方图峰值表示关键值处的邻域梯度的方向,并且特征值的主方向由直方图中的峰值方向表示。对于具有相同梯度值的多个峰的特征值,它们将处于同样的坐标和比例。在不同方向上创建不同特征值能够显著增强特征值配准的稳定性。

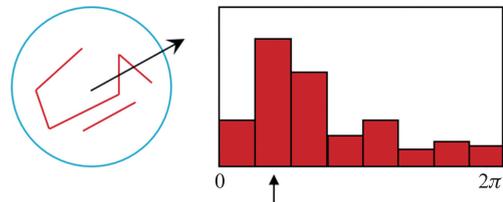


图 3 特征点梯度直方图统计

(4) 特征点方向确定及描述子生成:首先根据特征值的方向旋转坐标轴,保证旋转不变性,旋转结果如图 4 所示。

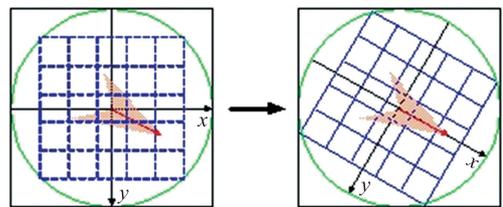


图 4 特征点邻域旋转结果

由左图坐标旋转到右图坐标转换公式如式 (2) 所示:

$$\begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2)$$

然后为每个特征点生成 SIFT 描述符。描述符使用临界点标度空间中的 4×4 窗口计算的八个方向的梯度数据,由 $4 \times 4 \times 8 = 128$ 维向量表示,如图 5 所示。

最后按特征点的尺度对特征描述向量进行规范化。如式 (3) 所示。

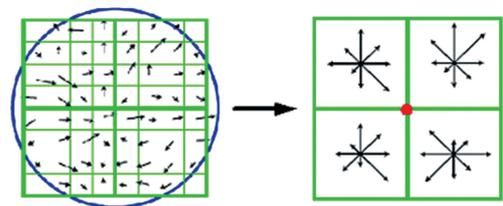


图 5 128 维 SIFT 向量生成图

$$I_j = \frac{w_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^{128} w_i}} \quad (j=1, 2, \dots, 128) \quad (3)$$

式中: I_j 表示规范化后的 SIFT 特征向量, w_j 表示未规范化的 SIFT 特征向量。

在实际应用中, SIFT 算法还需进行特征点配准。为了减少错误匹配的可能性, 采用欧氏距离来作为 SIFT 描述子相似度的判别依据。式 (4) 给出了欧氏距离的计算公式:

$$\text{dist}(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

2 SIFT 配准硬件整体构架

通过 FPGA 开发平台设计 SIFT 算法整体构架, 设计流程主要包括电路设计和输入, 时序仿真, 电路综合优化, 以及集成功能仿真, 程序板级验证, 编译和程序调试。工程师在分析要实现的电路功能时通常采用自顶向下的设计方法, 这样利于模块划分和软件维护, 提升可移植性和仿真效率。考虑到 FPGA 内部资源的特性, 并行设计思想更为重要。为此, 本设计采用 Verilog 语言进行程序编写。

如图 6 所示, 系统主要是通过 FPGA 与 PC 机实现通信。FPGA 主要完成 SIFT 关键值描述符的产生、存储、位置坐标提取、注册及通信功能等。PC 机上主要是实现图像配准结果的最终显示。

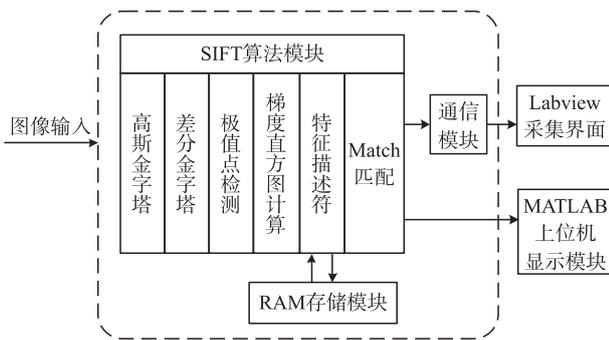


图 6 SIFT 配准硬件整体构架图

3 FPGA 通信模块设计

本设计中, 特征点描述子产生模块将产生的特征点坐标顺序储存在 FIFO (First Input First Output) 存储器中, 而通信模块的主要功能是将 FIFO 中的坐标数据读出来, 并通过串口与 PC 机通信, 最终由 Labview 界面接收和显示。

3.1 UART 传输时序和发送程序

UART 是一种用于异步通信的通用串行数据总线。在 FPGA 开发板设计中, UART 用来与 PC 进行通信, 包括数据通信, 命令和控制信息的传输等, 特

点是能进行双向通信, 能满足 FPGA 并行设计要求。

图 7 给出了 UART 传输时序图。消息帧由起始位、数据位和高位停止位组成。接收器在找到消息帧起始位时开始与发送器时钟频率同步, 表示传输数据的开始。在数据位后加上奇偶校验位, 用于校验数据传输的正确性。

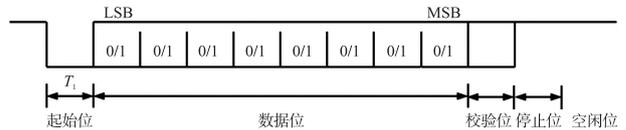


图 7 UART 传输时序图

UART 发送程序包含 3 个程序, 分别是时钟产生程序 (clkdiv.v), 串口发送程序 (uarttx.v) 和串口发送测试程序 (testuart.v)。程序 clkdiv.v 用于处理波特率为 9 600 bit/s 的时钟信号和 UART 接收信号, 这里产生的时钟 clkout 是波特率的 16 倍, 以便在 UART 接收期间接收的所有数据位有 16 个时钟样本。若对 50 MHz 的系统时钟进行分频, 则分频系数为 $50\,000\,000 / (16 \times 9\,600) = 325.52$, 取整为 326。uarttx.v 程序用于发送数据, 在接收到数据传输命令之后, 线路起始位的时间 T 被下拉, 然后数据从低位到高位顺序传输。在一帧数据传输完成之后, 发送停止位并等待下一个数据传输指令。testuart.v 程序用于校准 UART 发送模块的正确性, 通过产生串口发送数据 (0~0xFF) 和发送命令信号给串口发送模块从而请求发送。

3.2 硬件介绍

硬件设计采用 Silicon Labs CP2102 GM 芯片作为 USB 和 UART 电平转换的桥梁, USB 接口规格为 Micro USB 接口, 用户可以用一根开发板自带的 USB 线连接到 PC 上进行数据通信。串口部分的原理图如图 8 所示: RXD 从 PC 发送给 FPGA, TXD 从 FPGA 发送给 PC, 以此实现全双工传输和接收。

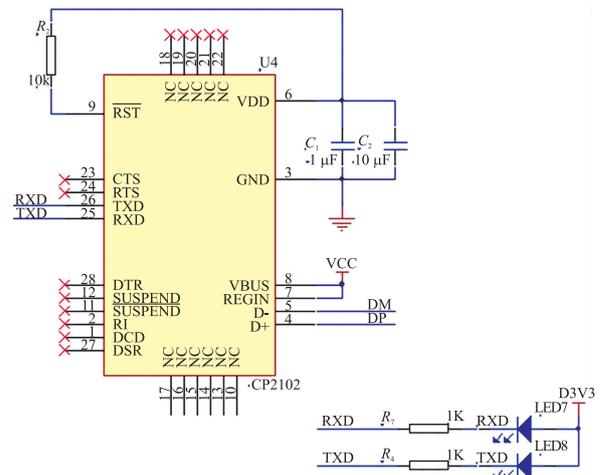


图 8 USB 转串口原理图

3.3 顶层文件原理图

图 9 给出了顶层文件原理图。各个模块间用导线连接,其中 testuart 的 dataout[7.0]和 uarttx 的 dain[7.0]之间用 Diagonal Bus Tool 连接;其他的线

用 Diagonal Node Tool 连接。再添加 2 个输入端口分别连接到 clk50 和 rst_n,同时添加一个输出端口连接到 tx,另外把每个端口的名字改成与实际的功能一致,便于后续程序的调试与扩展。

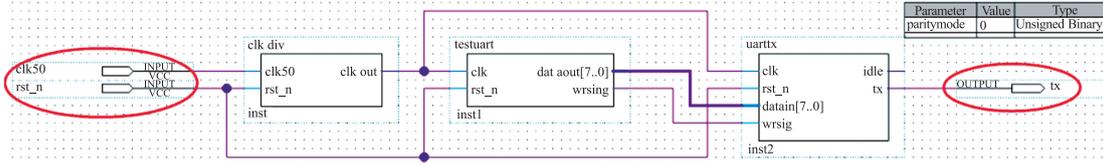


图 9 顶层文件原理图

3.4 测试结果

使用 USB 电缆连接 PC 和 FPGA 开发板,然后打开串行调试助手。在串口调试助手中,可设置波特率、校验位、数据位、停止位的一些信息。另外,将端口设置为我们在设备管理器中看到的端口号。

下载 uart_tx.sof 到 FPGA 开发板,我们可以在串口工具上看到从 FPGA 开发板不断发给 PC 的从 0 到 FF 的 16 进制的测试数据。

的要求。

图 11 给出了最终的实现平台,以 FPGA 开发板作为主控,利用通信模块建立 FPGA 开发板与 PC 机之间的通信。将存储在 FIFO 中的特征点坐标提取出来并利用串口通信方式传输到上位机界面上进行显示。

4 SIFT 配准算法 FPGA 实现与结果

4.1 Sift_top 顶层设计

SIFT 算法整体结构如图 10 所示,主要由高斯金字塔模块,差分金字塔模块,极值点检测模块等组成。基于 FPGA 开发平台实现的图像特征匹配算法以 Sift_top 作为顶层依次调用上述模块。最终通过通信模块发送特征点坐标位置至串口,并导入 MATLAB 显示最终匹配结果。



图 11 最终实现平台

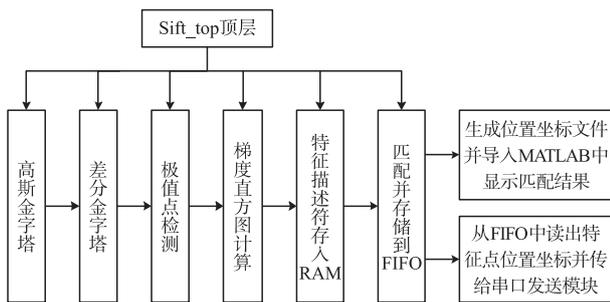


图 10 SIFT 算法程序整体构图

4.2 系统实现结果分析

首先根据特征匹配需求选择一个 FPGA 型号并对整体程序进行时序仿真。由于 SIFT 算法提高了准确度和系统鲁棒性,因此程序在时序仿真和功能仿真过程中耗时较长。从仿真结果我们可以看出硬件资源的消耗情况,从而可以判断我们选择的 FPGA 型号是否满足设计要求。

随后进行功能仿真,这个过程主要是验证程序时序仿真结果和算法整体架构是否符合 FPGA 实现

Labview 上位机界面采集的数据即为存储在 FIFO 中的特征点位置坐标,如表 1 所示。

表 1 上位机界面接收的特征点位置坐标

点号	坐标(X)	坐标(Y)
1	046	047
2	16d	0bf
3	08c	08d
4	0db	030
5	08f	091
6	153	0a7
7	0a1	0a2
8	11a	06f
9	0c6	0c6
10	112	067
11	0c6	0c6
12	113	067
13	0e4	0e4
14	15c	0af

针对本设计利用 MATLAB 平台,读取 FPGA 运行程序得到的匹配特征点的位置坐标文件,并在原

图像上进行显示,如图 12 所示。由于 FPGA 资源的限制,运行 SIFT 后得到的特征点对数量较少,但保证了特征点准确度,因此基本满足特征匹配的需求。

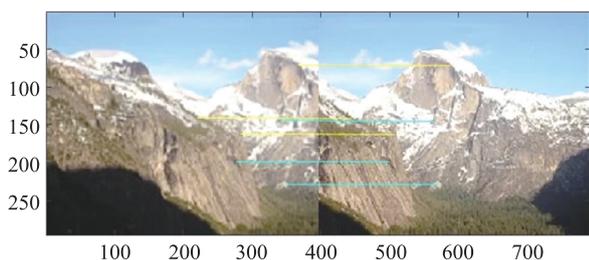


图 12 SIFT 算法 FPGA 实现结果展示图

5 结束语

本设计在研究了基于 SIFT 图像配准算法相关理论上,对其进行了 FPGA 硬件平台实现。主要完成了 SIFT 算法的 FPGA 整体结构设计以及 FPGA 显示与通信模块设计。

本设计给出了高斯滤波、尺度空间、DoG 金字塔、特征点提取等模块的设计方法与理念。不但要求熟练进行 FPGA 时序设计,还要熟悉相关配置和通信流程,才能进行二者的顺利通信。SIFT 算法中梯度直方图的计算采用双口 RAM 进行同时读取,而通讯模块设计采用串口传输方式,合理分配了 FPGA 的内部资源,提高了系统的实时性和连续性。利用 MATLAB 平台进行数据读取,并将最终配准结果进行显示。在 FPGA 开发板及上位机上实现图像实时匹配验证,匹配结果初步满足实用要求,具有一定的应用价值。



陈 超(1986—),男,毕业于东南大学仪器科学与工程学院,现于东南大学网络与信息中心,长期从事教育信息化建设工作,专业方向为系统开发、系统架构以及系统建设规划, cchen@seu.edu.cn。

参考文献:

- [1] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014(05):509-511.
- [2] 贾银江,徐哲男,苏中滨,等. 基于优化 SIFT 算法的无人机遥感作物影像拼接[J]. 农业工程学报,2017(10):131-137.
- [3] 陈晓燕. 基于 SIFT 算法在图像配准上的应用研究和实现[J]. 电子技术与软件工程,2016(5):101-102.
- [4] Li H Y, Wang Q. A Real-Time SIFT Feature Extraction Algorithm [J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(8):865-871.
- [5] 刘辉,申海龙. 改进图像配准算法在无人机遥感图像拼接中的应用[J]. 光电技术应用,2014,35(1):108-112.
- [6] 林小平,周石琳,张官亮. 一种基于蚁群算法和互信息测度的图像拼接技术[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2013,27(1):76-81.
- [7] 孙即祥. 图像处理[M]. 北京:科学出版社,2009:1-5.
- [8] 武俊,郭捷,邱卫东,等. 基于 SIFT 特征的特定目标识别管算法[J]. 信息安全与通信保密,2015(2):92-96.
- [9] Wei Yang, Liming Zhong, Liyan Lin, et al. Predicting CT Image from MRI Data through Feature Matching with Learned Nonlinear Local Descriptors [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2018, 37:977-987.
- [10] 张永梅,张晨希,巴德凯. 改进 SIFT 变换与客观评价结合的图像配准算法[J]. 计算机测量与控制,2015(6):2090-2093.
- [11] 杨艳伟. 基于 SIFT 特征点的图像拼接技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
- [12] 岳昕. 基于信息熵与 SIFT 算法的天文图像配准[J]. 计算机科学,2015(6):57-60.
- [13] Gesto-Diaz M, Tombari F, Gonzalez-Aguilera D, et al. Feature Matching Evaluation for Multimodal Correspondence [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2017, 129:179-188.
- [14] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Key-points [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.