

基于DSP的无人机遥感影像SIFT算法设计与实现

孙 鹏^{1,2}, 肖 经¹, 赵海盟^{2,3*}, 刘 帆², 晏 磊^{2,3}, 赵红颖²

(1. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室(北京大学), 北京 100871;

3. 广西高校无人机遥测重点实验室(桂林航天工业学院), 广西 桂林 541004)

(* 通信作者电子邮箱 zhaohaimeng@guat.edu.cn)

摘 要: 为了满足尺度不变特征变换(SIFT)算法临场处理大尺寸无人机(UAV)组网遥感观测影像的实时快速需求, 提出一种基于数字信号处理器(DSP)内核的硬件乘法器来处理单精度浮点型像素数据乘法的算法实现方案。首先, 根据DSP内核的硬件乘法器的数据输入、输出特性, 重构SIFT算法的图像数据结构和图像函数, 以实现硬件乘法器对SIFT算法单精度浮点型像素数据的乘法计算; 其次, 采用软件流水技术重新编排迭代计算, 以增强算法的并行计算能力; 最后, 将在算法计算过程中产生的动态数据迁移至第三代双倍速率同步动态随机存储器(DDR3)中, 以提升算法数据的存储空间。实验结果表明, DSP平台的SIFT算法可以实现对1 000×750的UAV遥感影像的高精度快速处理, 所提方案满足无人机组网遥感影像临场处理对SIFT算法的实时快速要求。

关键词: 数字信号处理器; 乘法器; 图像数据结构; 迭代计算; 临场快速处理

中图分类号: TP391.75 **文献标志码:** A

Design and implementation of SIFT algorithm for UAV remote sensing image based on DSP platform

SUN Peng^{1,2}, XIAO Jing¹, ZHAO Haimeng^{2,3*}, LIU Fan², YAN Lei^{2,3}, ZHAO Hongying²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration and 3S Applications (Peking University), Beijing 100871, China;

3. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Remote Sensing (Guilin University of Aerospace Technology), Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: To satisfy the requirement of real-time and rapid processing of Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) algorithm for remote sensing images of large-scale Unmanned Aerial Vehicle (UAV) network on the scene, an implementation scheme of the algorithm by using the hardware multiplier of Digital Signal Processor (DSP) kernel was proposed to process the multiplication of single-precision floating-point pixel data. Firstly, according to the characteristics of data input and output of the hardware multiplier with DSP kernel, the image data structure and the image function of SIFT algorithm were reconstructed in order to make the hardware multiplier perform the multiplication calculation of single-precision floating-point pixel data of SIFT algorithm. Secondly, the software pipelining technology was adopted to rearrange the iterative computation, so as to enhance the parallel computing ability of the algorithm. Finally, the dynamic data produced in the algorithm calculation process were transferred to the Double Data Rate 3 synchronous dynamic random access memory (DDR3) to enlarge the storage space of the algorithm data. Experimental results show that the SIFT algorithm on DSP platform is able to achieve high-precision and fast processing for 1 000×750 remote sensing images of UAV, and the scheme satisfies the requirement of real-time and rapid processing of SIFT algorithm for remote sensing images of UAV network on the scene.

Key words: Digital Signal Processor (DSP); multiplier; image data structure; iterative calculation; rapid processing on the scene

0 引言

尺度不变特征变换 (Scale-Invariant Feature Transform, SIFT) 算法^[1]在无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 遥感影像特征点提取和匹配领域内扮演着重要角色, 随着时间推

移得到不断的发展和完善。

数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 是一种适用于密集型数据运算与实时信号处理的微处理器^[2]。现阶段, 在高性能 DSP 平台上实现部分复杂图像处理算法成为了 DSP 应用研究的一个热点。在高性能 DSP 平台上实现完整的

收稿日期: 2019-10-09; 修回日期: 2019-11-19; 录用日期: 2019-11-21。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB0503003); 国家自然科学基金资助项目 (61841101, 61764002)。

作者简介: 孙鹏 (1992—), 男, 河南邓州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式系统设计、数字图像处理; 肖经 (1978—), 男, 江西泰和人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 光通信、光传输; 赵海盟 (1980—), 男, 陕西咸阳人, 高级工程师, 主要研究方向: 航空航天遥感、智能仪器设备; 刘帆 (1995—), 女, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要研究方向: 遥感数字图像处理; 晏磊 (1956—), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士, 主要研究方向: 高分辨率成像、遥感定标; 赵红颖 (1971—), 女, 吉林长春人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 遥感成像。

SIFT 算法,可以减轻对主计算机中央处理器(Central Processing Unit, CPU)、图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)和高速缓存等资源的占用,特别是对图像算法处理过程中的定点、浮点迭代运算相比计算机平台处理速度更快。同时,DSP平台具有体积小、功耗低和便于集成等优点^[3],采用DSP实现无人机遥感影像临场数据快速处理具有很大的优势。

前期,已经有一些人在DSP上进行了SIFT算法的部分研究。许飞等^[4]在EVM6670L平台上运行SIFT算法时,基于进程间通信(Inter-Process Communication, IPC)模块实现4核处理器协同处理;刘颜开等^[5]在TMS320C6678平台上实现8核协同处理SIFT算法。以上研究,既没有使用本文采用的DSP内核的硬件计算单元直接处理单精度浮点型像素数据的乘法计算,也没有充分发挥DSP的软件流水特长,对计算过程并未进行高质量的重新编排;此外,研究中处理的图像尺寸太小,远远小于本文实验采用的大尺寸无人机遥感图像,因此无法适应于无人机组网遥感影像的临场快速处理。

1 Rob-hess SIFT 算法

SIFT算法是第一个通过稳健的描述子将一定程度的不变量与尺度、旋转、放射变换和光照联系起来描述局部特征的方法^[6]。它被认为是计算机视觉研究的一个热点^[7-8],也具有计算密集的特征^[9-10]。

本文的参考对象为Rob-hess基于OpenCV(Open source Computer Vision library)和C语言编译环境编写的通用SIFT算法程序。Rob-hess SIFT算法实现特征点提取的主要过程如图1所示。

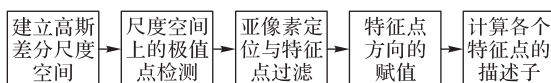


图1 Rob-hess SIFT算法的特征点提取流程

Fig. 1 Feature point extraction flowchart by Rob-hess SIFT algorithm

2 SIFT算法在DSP平台上的实现

2.1 方案设计

德州仪器C66x系列DSP内核硬件的组成如图2所示。

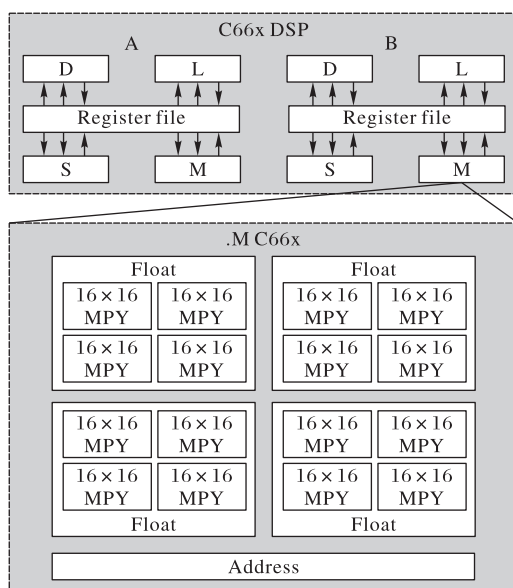


图2 C66x DSP内核

Fig. 2 C66x DSP kernel

主要数据计算模块包括支持单精度浮点型数据运算的硬件乘法器(Hardware Multiplier, MPY)、累加器和双数据通道^[11]。

为了充分发挥DSP内核计算性能,本文重新设计了SIFT算法的图像数据结构、软件流水和动态数据存储。首先,重构图像数据结构和图像函数使得硬件乘法器可以直接参与单精度浮点型像素数据的乘法计算;其次,采用软件流水技术重新编排算法的循环计算,以增强算法计算的并行能力;最后,迁移算法产生的动态数据至片外第三代双倍速率同步动态随机存储器(Double Data Rate 3 synchronous dynamic random access memory, DDR3),以提升动态数据的存储空间。具体实现流程如图3所示。

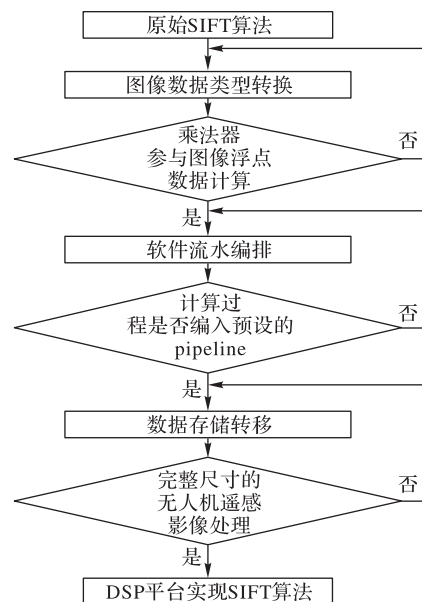


图3 DSP平台上SIFT算法的总体设计

Fig. 3 Overall design of SIFT algorithm on DSP platform

2.2 图像数据类型转换

硬件计算单元直接参与数学计算可以提升计算的速度。但是,原始SIFT算法使用char型地址空间存储图像像素数据,使得DSP内核的单精度浮点型硬件乘法器不能够直接计算算法单精度浮点型像素数据的乘法。

为了使DSP内核的硬件乘法器能够直接参与单精度浮点型像素数据的乘法计算,需要根据硬件乘法器的输入、输出特性对图像数据结构和图像函数进行重构,具体实现流程如图4所示。

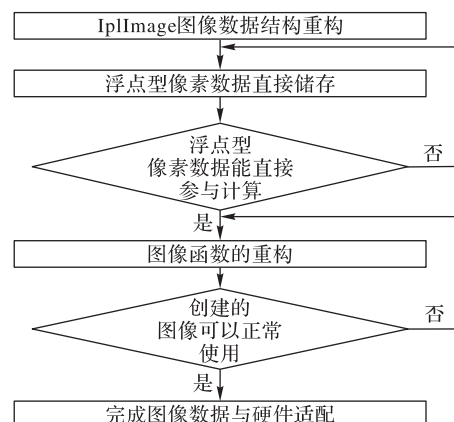


图4 图像数据重构流程

Fig. 4 Reconstruction flowchart of image data

1) IplImage 图像数据结构的重构。

在 SIFT 算法原始 IplImage 图像数据结构中, char 型、float 型像素数据都存储于 char* 型指针 imageData 指定的地址空间。一个 char 型图像像素数据存储于一个 char 型存储空间内, 一个 float 型像素数据需要存储于 4 个 char 型存储空间内。由于, DSP 内核单精度浮点型硬件乘法器不能够参与 char 型存储空间内数据的计算, 无法发挥 DSP 优良的单精度浮点型数据计算能力。

为了使单精度浮点型硬件乘法器可以直接计算 SIFT 算法 float 型像素数据的乘法, 本文对算法的 IplImage 图像数据结构进行重构。

首先, 在 IplImage 结构中新增 float* 型指针 imageData1, 并使用该指针为 float 型像素数据分配存储空间; 其次, 在算法浮点运算段启用 imageData1 指针直接存储像素点的 float 型像素数据, 实现 float 型像素数据的存储空间类型由 char 型转变为 float 型; 最后, 对图像浮点型像素数据的计算过程进行调整, 并在编译软件中启用硬件乘法器处理该型像素数据的乘法计算。新 IplImage 结构中图像单精度浮点型像素数据访问形式如下。

新 IplImage 结构中图像 gray32 第 row 行、第 col 列像素点的浮点型像素数据访问形式如式(1)所示:

$$\text{float_val} = *(\text{gray32} \rightarrow \text{imageData1} + \text{gray32} \rightarrow \text{widthstep} * \text{row} + \text{col}) \quad (1)$$

新 IplImage 结构中图像 gray32 第 n 个浮点型像素数据的访问形式如式(2)所示:

$$\text{float_val} = *(\text{gray32} \rightarrow \text{imageData1} + n) \quad (2)$$

其中: gray32 为一个 IplImage 型结构体图像的起始地址; row、col 和 n 为被定义的 int 型变量; gray32->widthstep 为 gray32 图像中每一行像素数据存储时占用的存储空间; gray32->imageData1 为新数据结构中图像单精度浮点型像素数据的起始地址。

2) 图像函数的重构。

原始 SIFT 算法程序调用 cvCreateImage 函数创建图像结构的首地址并根据图像头信息为结构体的像素数据分配适当存储空间。在图像创建过程中, 调用的子函数主要包括创建图像头信息的函数 cvCreateImageHeader 和为像素数据分配存储空间的函数 cvCreateData。

原始图像像素数据存储空间的首地址由像素数据空间分配函数 cvCreateData 提供。为了使新增加的 imageData1 指针能够指向合法的存储空间, 需要对函数 cvCreateData 进行重构。当输入的图像像素数据类型为 32 位 float 型时, 函数 cvCreateData 的子函数 ialloc 开始分配存储空间并将返回的地址强制转换为 float* 型; 然后, 将得到的 float* 型地址传递到指针 imageData1。具体实现方式如式(3)所示:

$$\text{img} \rightarrow \text{imageData1} = (\text{float} *) \text{ialloc}((\text{size_t}) \text{img} \rightarrow \text{imageSize}) \quad (3)$$

其中: img->imageSize 为图像像素数据需要占据空间的大小(单位: 字节), 由图像的行、列和像素点数据类型决定; img->imageData1 为图像 img 的单精度浮点型像素数据在新 IplImage 结构中存储后返回的起始地址; ialloc 为空间分配函数, 在完成空间分配后会返回 void* 型起始地址(该地址可以被强制转换为其他类型)。

2.3 软件流水编排

2.3.1 编排设计

德州仪器 C66x DSP 内核具有 8 路超长指令字 (Very Long Instruction Word, VLIW)、浮点数据路径^[12]和 8 组单精度浮点型硬件乘法器, 内核主频高达 1.25 GHz (Giga Hertz), 浮点性能高达 20 GFLOP (Giga Floating-point Operations per Second)。由于, 其指令集架构 (Instruction Set Architecture, ISA) 是基于 VLIW 架构, 每个指令加载包的长度为 256 位^[13]。因此, 在

C66x 内核 DSP 平台上使用的单指令多数据流 (Single Instruction Multiple Data, SIMD) 指令可以同时执行最多 8 条 32 位指令。

使用软件流水技术对算法程序重新进行编排, 使得编译器可以更加均衡地使用芯片内核的硬件资源; 同时, 部分无关联性指令的不同执行阶段可以被同时执行, 缩短各指令执行时的等待间隔, 可以更充分地发挥系统的并行计算能力。

软件流水编排的实质是: 降低函数指针之间的关联性以增强计算的并行性能; 将算法的子函数内嵌入主程序; 对多层循环体进行简化与展开; 使用软件流水技术将数据计算段编排到预设的 pipeline 中; 同时, 结合 CCS (Code Composer Studio) 5.5 集成开发环境的 DSP 软件流水优化功能, 优化流水编排的层级, 最大化使用硬件资源。采用四级流水编排前后的指令执行情况如图 5 所示。

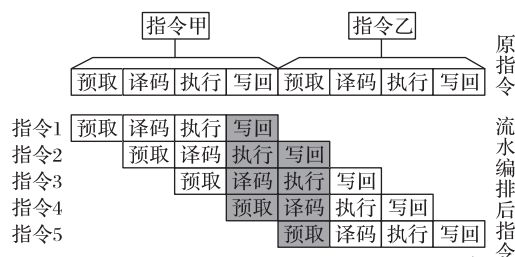


图5 指令执行对比

Fig. 5 Comparison of instruction execution

在图5中, 指令甲、乙与指令1、2、3、4、5为处理器的相同执行指令。没有进行软件流水编排时, 指令乙只能在指令甲完成写回操作后才可以得到执行。对算法程序运行重新编排后, 程序中指令1的写回、指令2的执行、指令3的译码和指令4的预取操作可以被同时执行, 缩短了指令的执行间隔。该处为流水编排后循环核的开始; 指令2的写回、指令3的执行、指令4的译码、指令5的预取也会同时执行, 为循环核的一部分; 循环核左侧部分为流水循环填充 (pipeline loop prolog); 循环核右侧部分为流水循环排空 (pipeline loop epilog)。图5中, 同样的时钟周期内, 原始程序仅可以执行甲、乙两条完整指令, 而流水编排后的程序可以执行5条完整指令, 算法程序的计算速度得以提升。

流水编排的具体实现流程如图6所示。

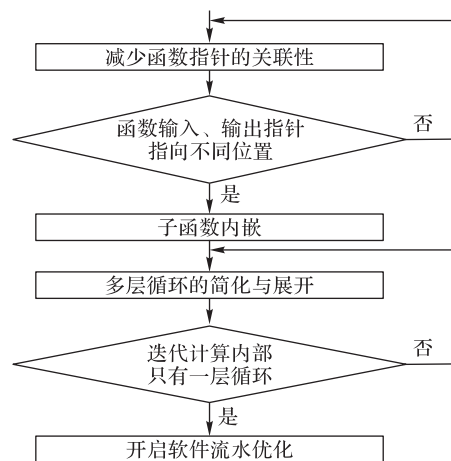


图6 软件流水编排流程

Fig. 6 Flowchart of software pipeline arrangement

2.3.2 具体实现

为了减少计算过程中输入、输出数据指针的关联性, 在函数中使用 restrict 和 const 关键字以声明函数非关联性指针指向不同内存块。当函数输入、输出指针存在关联性且在计算

独立时,需要对程序的输出指针进行调整;建立过渡内存块,并将输出指针指向过渡区块;完成计算后,再将过渡区块的内容拷贝到原始程序指定的内存块中。邻近插值函数变化如下。

原始源代码:

```
void resizeImg(IplImage*gray,IplImage*Big)
```

插入关键字后源代码:

```
void resizeImg(const IplImage*gray, IplImage*Big)
```

以上源代码中,gray 为输入指针,Big 为输出指针。在源代码中使用 const 关键字以声明输入、输出指针为非关联性指针且指向不同的内存块。

由于含有子函数的循环体无法通过优化器编排为一个 pipeline。因此,需要将迭代计算调用的子函数内嵌入主程序循环体内。

此外,DSP 集成开发环境的编译器优化循环计算时,只在循环计算的内层中形成一个 pipeline。因此,需要对多重循环计算进行简化和展开,使得计算可以更加充分地编入预设的 pipeline。图像归一化的计算变化如下。

原始源代码:

```
for (row3 = 0; row3 < height1; row3++)
{
    for (col3 = 0; col3 < width1; col3++)
    {
        gray->imageData1[row3 * width1 + col3] =
            gray8->imageData[row3 * width1 + col3]*alpha;
    }
}
```

简化后源代码:

```
for (row3 = 0; row3 < height1*width1; row3++)
{
    gray->imageData1[row3] =
        gray8->imageData[row3]*alpha;
}
```

以上源代码中,row3 和 col3 是被定义的 int 型变量; height1 和 width1 为图像的每列、行像素点数目;alpha 为一浮点数;gray8->imageData 为归一化前图像像素数据起始地址;gray->imageData1 为归一化后图像像素数据起始地址。原始的算法计算程序只能将图像每一行像素数据的计算纳入 pipeline,而简化后的计算程序可以将图像所有像素数据的计算都纳入 pipeline,从而缩短了指令间等待时间。

软件编译器优化设置可以改善软件流水性能^[14]。编译器优化选项使用如下:

- 1) 启用 Assume no irregular alias or loop behavior,以声明程序中没有使用 aliasing 技术。
- 2) 设置 Optimization level 为 3,即选择 -o3 以进行文件级别的优化。
- 3) 启用 Program mode compilation,即使能 -pm 以配合 -o3 使算法实现程序级别优化。
- 4) 设置 Specify call assumptions when optimizing 为 3,选择 -op3 以控制程序的优化级。
- 5) 设置 Optimize for code size 为 2,选择 -ms2 以缩小代码的部分尺寸。
- 6) 设置 Generate optimizer information file at level 为 2,选择 -on2 以生成优化信息文件。

2.4 数据存储迁移

SIFT 算法具有占用存储空间大的特征,处理 1 000×750 彩色正射影像时,主要内存占用情况如图 7 所示。分析图 7 可知:SIFT 算法处理 1 000×750 彩色影像时,构建高斯差分金字塔过程中需要的存储空间最大,约为 168 MB;考虑到 SIFT 算法计算过程中的其他变量和特征点情况,处理 1 000×750 彩色影像所需要的实际存储空间应大于 168 MB。芯片内部的 SHRAM(shared memory)存储空间为 64 MB,不能够满足算

法运行过程中的存储需求。



图 7 主要内存分布

Fig. 7 Main memory distribution

为了使 DSP 平台 SIFT 算法可以处理 1 000×750 彩色正射影像,需要将算法的动态数据从芯片内部的 SHRAM 转移至片外 DDR3 存储器。由于原始 DDR3 存储器内各子存储空间,也无法支持 SIFT 算法的数据存储,因此需要将 DDR3 存储器中不连续的原始子存储空间进行合并,以拓展存储器中的连续存储空间。

为了完成上述的存储迁移,需要调整存放链接器的配置信息 CMD(算法工程中后缀为 .cmd 文件)。具体调整细节为:根据平台板载存储空间重新编写 CMD 文件中的 SECTIONS(目标存储器模型段)和 MEMORY(硬件资源描述段)。

1) CMD 文件的 SECTIONS 编写。

德州仪器 C66x DSP 内核的片内内存与 CPU 保持相同的时钟频率。但是,片内存储空间过小,不适应大量数据的存放。在本文研究的过程中,使用 DSP 平台搭载的 DDR3 存储器存储 SIFT 算法计算产生的动态数据,改变动态数据存储空间的具体方式如下。

在新创建图像结构体分配内存时,直接采用了 malloc 函数,同时,需要调整 CMD 文件中 SECTIONS(目标存储器模型段)的描述代码,详细源代码变化如下。

原始 CMD 文件中动态内存的存储器模型描述源代码:

```
.system > SHRAM
```

重新编写 CMD 文件中动态内存的存储器模型描述源代码:

```
.system > DDR3
```

2) CMD 文件的 MEMORY 编写。

CMD 文件的 MEMORY 代码段用于描述系统实际硬件资源配置。为了充分使用 DDR3 存储器的存储空间,需要将存储器内不连续的硬件描述区域合并为一个以 DDR3 为名称的连续存储空间,具体的硬件描述源代码变换如下。

原始 DDR3 存储器地址空间的硬件描述源代码:

```
DDR3: origin = 0x80000000 length = 0x10000000
```

```
DDR3A: origin = 0x90000000 length = 0x10000000
```

```
DDR3B: origin = 0xA0000000 length = 0x10000000
```

合并后 DDR3 存储器地址空间的硬件描述源代码:

```
DDR3: origin = 0x80000000 length = 0x7FFFFFFF
```

在以上代码中,DDR3、DDR3A、DDR3B 分别为 DDR3 存储器内子存储空间的名称;origin 表示该子存储空间的起始地址;length 表示该子存储空间的有效长度;DSP 平台实际搭载的 DDR3 存储器起始地址为 0x80000000,有效长度为

0x7FFFFFFF(容量为2 GB),该容量远大于SHRAM内64 MB存储空间。

通过重新编写CMD文件SECTIONS和MEMORY,将DSP硬件平台DDR3存储器内不连续的存储空间转变为连续的存储空间,并将SIFT算法的动态数据迁移至该段连续的存储空间内,为算法处理较大尺寸的图像打下了基础。

3 实验与结果分析

3.1 硬件平台设计

根据上述方案,选择德州仪器66AKH12处理器作为DSP硬件平台主处理器,平台如图8所示。66AKH12是基于KeyStone II架构的高性能处理器,主处理器内部集成了8核的C66x内核组和4核的ARM(Advanced RISC Machine)A15内核组^[15]。XDS(Extended Debugging Simulator)200mini模块为仿真器;MiniUSB(Universal Serial Bus)接口固定在仿真器上,用于与外部连接。

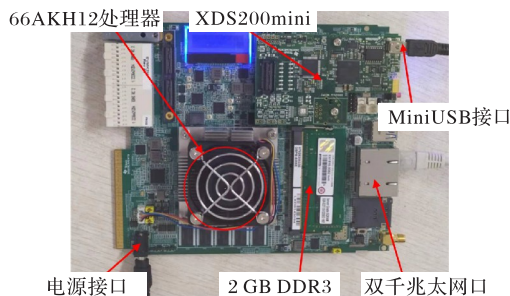


图8 DSP测试平台

Fig. 8 DSP test platform

在实验中,设置C66x内核组的0核作为处理器核,配置DSP的时钟频率为1.2 GHz。测试平台通过硬件 Board to Board连接器连接至XDS200mini模块,并使用MiniUSB电缆将XDS200mini连接至PC。PC平台的CCS 5.5软件集成开发环境用于程序的调试、加载和中断等。运行设计如图9所示。测试图像为一无人机遥感任务采集的正射彩色影像,原始影像尺寸为1 000 × 750,如图10所示。



图9 硬件运行设计

Fig. 9 Hardware running design

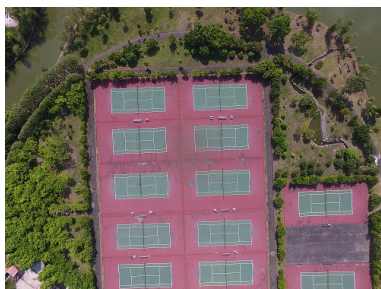


图10 测试图像

Fig. 10 Test image

3.2 结果分析

1) 算法精度分析。

DSP为32位处理器,原始SIFT算法程序的处理平台为64位处理器。由于,32位处理器与64位处理器数据总线位数的不同,在数据长度为64位double型数据的计算过程中会产生

相应的计算误差;而且,在不修改计算数据的数据类型时,该部分的计算误差会一直存在。由于在构建高斯尺度空间的计算过程中进行了大量的double型数据的乘法、加法和减法迭代计算,因此DSP平台SIFT算法程序与原始SIFT程序所提取特征点坐标、尺度、方向的小数部分和128维特征描述子也会存在相应的差异。不同平台SIFT算法的实际处理情况如图11所示。

	DSP端输出信息	原始输出信息	信息误差
特征点的x坐标	DSP端SIFT	原始SIFT	(DSP-原始)
特征点的y坐标	feat1	feat1	#VALUE!
特征点的尺度	x=472.438128	x=472.438132	#VALUE!
特征点的方向角	y=86.290646	y=86.290634	#VALUE!
特征点的编号	scl=1.630189	scl=1.630192	#VALUE!
	ori=3.141319	ori=3.141319	#VALUE!
	ii=0	ii=0	#VALUE!
	11	11	0
	8	8	0
	0	0	0
	0	0	0
	3	3	0
	7	7	0
	24	24	0
	45	45	0
	16	16	0
	feat1	feat1	#VALUE!
	x=703.565379	x=703.565359	#VALUE!
	y=272.404609	y=272.404621	#VALUE!
	scl=3.085656	scl=3.085653	#VALUE!
	ori=3.140876	ori=3.140876	#VALUE!
	ii=1	ii=1	#VALUE!
	0	0	0
	0	0	0

图11 不同平台的特征点处理结果

Fig. 11 Processing results of feature points on different platforms

图11中A、B列分别为DSP平台SIFT算法程序和原始SIFT算法程序提取的特征点信息,C列为DSP平台SIFT算法程序提取的特征点数据与原始算法提取数据之差。在A、B列中feat1为1 000×750测试图像(如图10所示)的名字。x、y为提取特征点的坐标信息,scl为特征点的尺度,ori为特征点的方向角,ii为特征点的编号;从第8行到第135行数据为特征点0的128维特征描述子;分析C列可以发现,算法在不同平台上提取特征点0的描述子信息误差为0,特征点0坐标、尺度的小数部分存在细小的误差(此误差由处理器之间硬件差异造成)。由于EXCLE表格中第2行到第7行的特征信息数据不是单一数值,因此,在进行不同平台特征点信息逐差计算的过程中,此处系统自动使用“#VALUE!”以表示“引用单元格错误”。由于图11无法展示全体特征点的特征信息,因此使用表1对该信息进行统计。

表1 特征点信息(1000 × 750)

Tab. 1 Information of feature points (1000 × 750)

算法	特征点数量	相同坐标特征点数量	相同描述子比例/%
原始平台SIFT算法	3 324		
DSP平台SIFT算法	3 324	3 324	99.97

分析表1可以发现,处理测试的1000 × 750图像时,本研究的DSP平台SIFT算法程序与原始算法程序的处理结果保持高度一致;两个平台提取的特征点数量和特征点坐标信息保持一致,在3 324个相同坐标特征点所对应的特征描述子中,相同描述子比例的高达99.97%;可见DSP平台SIFT算法程序对图像特征点的识别、描述能力与原始算法程序基本保持一致。由于使用特征点信息进行图像匹配时,处理过程对图像特征点的坐标、尺度、方向角和128维特征描述子的误差要求远大于本研究算法程序的提取误差,因此,该算法程序完全满足临场实时快速处理无人机组网遥感影像的精度需求。

2) 耗时分析。

DSP平台SIFT算法的运行时间由CCS 5.5软件自带

Count Event 模块统计。详细实验结果如图 12 所示。

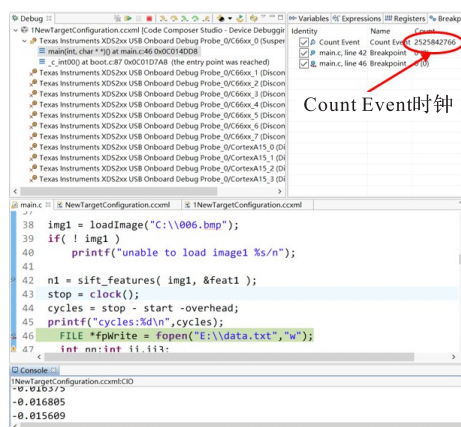


图 12 DSP 平台运行的 SIFT 算法

Fig. 12 SIFT algorithm running on DSP platform

实验中,处理器为 C66x 内核组的 0 核,主频为 1.2 GHz。当程序运行至图 12 第 42 行时,受到中断点的限制,板载仿真在此处暂停;此时,Count Event 模块统计的时钟显示图像预处理耗时,此处耗时不计入 SIFT 算法的总耗时。点击继续运行后,Count Event 模块自动清零并开始重新统计 CPU 运行时钟数据,SIFT 算法程序开始被执行;当程序运行至第 46 行时,板载仿真进入暂停,此时 Count Event 模块统计的时钟显示 SIFT 算法处理 1000×750 影像所消耗的 CPU 时钟数据。由图 12 分析可得,在特征点提取过程中,DSP 平台 SIFT 算法程序共消耗 2 525 842 766 个 CPU 时钟周期,约为 2.53 GHz。结合 DSP 主频配置和表 1 分析可得:在确保提取到高质量特征点坐标、尺度、方向和特征描述子前提下,DSP 平台的 0 核运行本文的 SIFT 算法程序处理测试的 1000×750 图像需要运行 2.108 s,满足在单核处理器平台上临场实时快速处理无人机组网遥感影像的时间要求。

4 结语

本文基于 DSP 平台的软硬件资源实现了具有完整功能的 Rob-hess SIFT 算法。通过对图像数据结构、图像函数的重构、软件流水的重新编排和动态数据存储空间的迁移,实现了对大尺寸无人机遥感图像的高精度快速处理。实验结果表明,本文算法的精度、运行耗时和处理图像的尺寸满足临场处理需求。

下一步,可以对数据的输入输出接口进行深入设计,实现无人机遥感影像数据在 PC 和 DSP 间的快速交互。同时,在 DSP 开发的过程中,进行多任务调度实现可以进一步提升处理速度。

参考文献 (References)

- [1] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]// Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE, 1999:1150-1157.
- [2] 孙科林. 基于多核 DSP 的实时图像处理平台研究[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (SUN K L. Research on real-time image processing platform based on multi-core DSP [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012: 1-2.)
- [3] 赵立双. 基于 DSP 的单目视觉定位方法关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011. (ZHAO L S. Research on key technologies of monocular visual odometry based on DSP [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011:6-7.)
- [4] 许飞,刘威. 多核 DSP 下的 SIFT 算法优化[J]. 信息通信, 2012 (5):42-43. (XU F, LIU W. SIFT algorithm optimization based on multi-core DSP [J]. Information & Communications, 2012 (5):

42-43.)

- [5] 刘颜开,陈远知. 基于 C6678 的 SIFT 算法并行计算研究[C]// 第九届全国信号和智能信息处理与应用学术会议. 北京:计算机工程与应用, 2015:12-16. (LIU Y K, CHEN Y Z. Research on parallel computing of SIFT algorithm based on C6678 [C]// Proceedings of the 9th National Conference on Signal and Intelligent Information Processing and Application. Beijing: Computer Engineering and Applications, 2015:12-16.)
- [6] 高聪. 基于 SIFT 算法图像配准的 FPGA 实现[D]. 成都:电子科技大学, 2013. (GAO C. FPGA implementation of image registration based on SIFT algorithm [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013:3-4.)
- [7] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社, 2000:26-32. (JIA Y D. Machine Vision[M]. Beijing: Science Press, 2000:26-32.)
- [8] 章毓晋. 图像工程(上册)—图像处理[M]. 北京:清华大学出版社, 1999:10-20. (ZHANG Y J. Image Engineering (I) - Image Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999:10-20.)
- [9] QASAIMAH M, SALEH H, MOHAMMAD B, et al. A novel SIFT architecture and ASIC implementation for real time SOC application [J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2019, 99 (2):325-338.
- [10] 宋海涛,何文浩,原魁. 一种基于 SIFT 特征的机器人环境感知双目立体视觉系统[J]. 控制与决策, 2019, 34(7):1545-1552. (SONG H T, HE W H, YUAN K. A stereo vision system based on SIFT feature for robot environment perception [J]. Control and Decision, 2019, 34(7): 1545-1552.)
- [11] 夏际金,赵洪立,李川. TI C66x 多核 DSP 高级软件开发技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2017:6-8. (XIA J J, ZHAO H L, LI C. Advanced Software Development Technology for TI C66x Multi-core DSP [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 6-8.)
- [12] DAMODARAN R, ANDERSON T, TRAN J, et al. A 1.25 GHz 0.8W C66x DSP Core in 40 nm CMOS [C]// Proceedings of the 25th International Conference on VLSI Design. Piscataway: IEEE, 2012:286-291.
- [13] 王俊,张玉玺,杨彬. DSP/FPGA 嵌入式实时处理技术及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2015:67-68. (WANG J, ZHANG Y X, YANG B. The Real-time Processing Technology and Application on Embedded Platform with DSP or FPGA [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2015:67-68.)
- [14] 苏保禹. 基于 TI-C6678 的多核 DSP 图像处理系统研究[D]. 成都:中国科学院大学, 2014. (SU B Y. Research on image processing system based on multi-core DSP TI-C6678 [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 45-46.)
- [15] 朱慧. 基于 C66AK 多核处理器的 H. 264 到 HEVC 视频转码软件设计[D]. 杭州:浙江工业大学, 2016. (ZHU H. Software design of H. 264 to HEVC video transcoder based on C66AK multi-core processor [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016:17-18)

This work is partially supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFB0503003, the National Natural Science Foundation of China (61841101, 61764002).

SUN Peng, born in 1992, M. S. candidate. His research interests include embedded system design, digital image processing.

XIAO Jing, born in 1978, Ph. D., associate professor. His research interests include photo-communication, light transmission.

ZHAO Haimeng, born in 1980, senior engineer. His research interests include aerospace remote sensing, intelligent instrumentation.

LIU Fan, born in 1995, M. S. candidate. Her research interests include remote sensing digital image processing.

YAN Lei, born in 1956, Ph. D., professor. His research interests include high resolution imaging, remote sensing calibration.

ZHAO Hongying, born in 1971, Ph. D., associate professor. Her research interests include remote sensing imaging.