

基于多核 DSP 的 3 通道偏振图像 FMT 配准方法

李志勇 卢松升

(宿州学院信息工程学院 宿州 234000)

摘要: 为提高 3 通道偏振图像处理的实时性,以 Fourier-Mellin 变换为基本配准算法,在型号为 TMS320C6670 的多核 DSP 硬件平台上,设计并实现了一种 3 通道偏振图像配准的并行处理方法。根据图像配准中数据的空间及相关度不同,将 FMT 算法优化为高内聚、低耦合的多运算任务,设计了一种基于数据流的并行计算结构,克服了原始 FMT 算法中串行计算低效、数据耦合较高的问题。根据 DSP 的多核和多协处理单元的处理特性,设计了分组异构、组内异构等并行任务分配方法,保证了较高的系统负载均衡。实验结果表明,在配准精度达到水平偏差小于 1 pixel,旋转偏差小于 0.2° 的前提下,平均配准时间达到约 16.2 ms,能够满足偏振成像探测的实时应用需求。

关键词: 多核 DSP;偏振图像配准;FMT 算法;并行计算

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

3-channel polarization images FMT registration method based on multi-core DSP

Li Zhiyong Lu Songsheng

(School of Information Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China)

Abstract: In order to improve the real-time performance of 3-channel polarization images processing, a parallel processing method for 3-channel polarization images registration is designed and implemented on the multi-core DSP hardware platform TMS320C6670 based on Fourier-Mellin transform. According to the different data space and correlation degree in images registration, operations of FMT algorithm are optimized as multiple operation tasks with high cohesion and low coupling, and a parallel computing structure based on data stream is designed, which overcomes the problems of low efficiency and high data coupling in the original FMT algorithm. According to the processing characteristics of multiple cores and multiple coprocessors of DSP, the parallel task allocation methods such as grouping isomerism and intra-group isomerism are designed. While load balance of the system is ensured, the multi-parallel computing tasks are allocated accurately and efficiently. The experimental results show that the average registration time is about 16.2 ms under the condition that the registration accuracy is less than 1 pixel and the rotation error is less than 0.2° , which can meet the real-time application requirements of polarization imaging detection.

Keywords: multi-core DSP; polarization images registration; FMT algorithm; parallel computing

0 引言

与传统的可见光强度成像相比,可见光偏振成像具有获取目标信息特征更丰富的优势,它能通过对多个偏振通道的图像融合处理,得到偏振光强度、偏振度和偏振角等目标偏振征^[1]。当每个偏振通道由各自独立的偏振滤光片及图像传感器形成时,不同偏振图像之间会出现一定的相对平移、旋转和比例缩放等,使得所获得的偏振图像之间存在坐标位置等差异,导致像素不配准,进而降低偏振信息的准确度,因此需要进行多通道图像配准^[2]。图像配准的算法

有多种,如尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)算法^[3]、加速稳健特征(speeded up robust features, SURF)算法^[4]、ORB(oriented FAST and rotated BRIEF)^[5]算法、相位相关法^[6]、傅里叶梅林变换(Fourier-Mellin transform, FMT)^[7]、最小二乘法^[8]等。一些研究专注于提高配准精度,如姜骞等^[9]在 SIFT 基础上,运用轮廓中线特征主方向,加强尺度和视角不变性,降低了配准误差;张书波等^[10]设计了一种采用比值一致性约束的图像配准算法,克服较多图像配准算法主要依靠阈值调节的不足,提高了匹配正确度和鲁棒性。在保证较高匹配率的同时,

还有些研究着力于提高匹配效率,如罗久飞等^[11]提出了一种基于加速稳健特征的自适应阈值匹配定位算法,运算时间较 SURF 最多可减少 40%;张绍荣等^[12]提出了基于加速分割检测特征(FAST)角点检测和快速视网膜关键点(FREAK)描述符的无人机景象配准算法,运行时间比 SURF 算法更快。

尽管各种图像配准算法逐步得到优化,但随着应用场景的要求提高,图像配准的大运算量仍然是一个急需解决的问题。为此,有一些研究学者开展了硬件加速研究。例如,曹国刚等^[13]采用 Intel 处理器的 16 核,实现了差异进化算法的并行化,在三维医学图像配准中加速比达到 14.23;张楠等^[14]和刘晨等^[15]采用图形处理器(graphics processing unit,GPU)实现了 FMT 的并行运算,在高分辨率图像配准上取得了较高的处理效率;赵智祚等^[3]采用现场可编程门阵列(field-programmable gate array,FPGA),设计了多支路单层流水线的 ORB 并行计算结构,耗时减少了 57.50%;万钊良等^[7]将多核数字信号处理器(digital signal processor,DSP)组成处理器阵列,较大地提高了基于最小二乘数据项的图像配准的并行处理效率。白清等^[16]在国内首次将 DSP 的 6 个核应用于偏振探测系统,使包括配准在内的偏振图像处理的加速比达到约 4.0。上述硬件加速研究方法各有特点,但在应用于偏振图像配准时,存在一些不合适或不足。文献[13]只是简单地把多核当作多线程来使用,不适用于单组多通道的静态图像配准;文献[14]、[15]主要采用单指令多数据流技术实现并行,在如何紧密协调不同运算之间的数据关系,保证负载均衡方面还有提升空间。文献[16]将原始图像数据分块后直接平分给多核处理,缺少数据分配规划,并且需要一个核进行多核协调控制,没有充分发挥硬件处理效率。

在某型 3 通道偏振成像探测系统研究中,为了保证系统解析静态图像的偏振信息的高实时性,本文在参考上述文献研究基础上,以多核 DSP 为硬件处理器,优化原始 FMT 算法的串行计算结构,提出一种 3 通道偏振图像配准的并行计算处理方法,克服上述相关研究在偏振图像配准上的不足,为最终实现系统的小型化、高速化提供技术支持。

1 偏振成像处理硬件及配准算法选择

根据 3 通道偏振图像的采集及处理需求,设计了偏振成像处理硬件平台,其结构和组成如图 1 所示。3 个偏振成像器同时输出 3 个偏振通道的 8 bit 灰度格式图像,经过图像采集单元的数据同步校正,利用双端口先进先出(first input first output,FIFO)缓存将图像数据打包传输给数据处理单元^[17]。数据处理单元承担 3 通道图像配准、信息融合、目标检测等处理任务。为满足小型、高速的系统指标需求,并加快开发周期,数据处理单元以多核 DSP 为主处理器。目前,国内外的多核 DSP 型号较少。其中,美国 TI 公

司的 C66X 系列多核 DSP 芯片的浮点和定点运算性能很高,技术相对成熟可靠。在 C66X 系列中,4 核 DSP 芯片 TMS320C6670(以下简称 C6670)的评估模块(evaluation module,EVM)的性价比高,本文选择其作为偏振图像的数据处理单元。

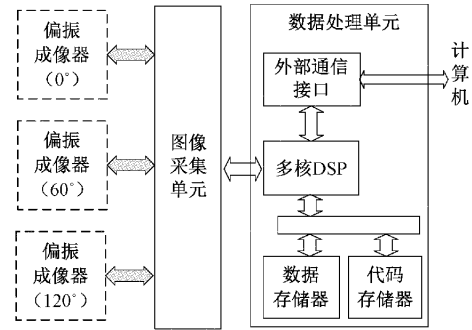


图 1 偏振成像处理硬件平台结构与组成

结合相关文献研究,并在偏振图像数据处理单元上,对 SIFT、SURF 等图像配准算法进行综合分析后,选择了 FMT 算法,因为其有以下相对优势:

1) 主体运算是快速傅里叶变换(fast Fourier transform,FFT),可以得到 C6670 的 FFT 协处理器(FFT coprocessor,FFTC)的直接支持;

2) 关键方法是相位相关法,强调轮廓和边缘信息,忽略低频分量,对于不同偏振图像之间存在的光照变化、局部差异、噪声等具有很好的鲁棒性;

3) 采用对极变换方法,在校正图像间的旋转和尺度差异时具有快速优势;

4) 在旋转、缩放及平移系数求解这 3 个运算环节具有较强的可分解性及相似性,便于并行处理。

2 偏振图像配准并行计算任务设计

3 通道偏振图像配准是以 0°通道偏振图像为基准,同时对 60°和 120°两个通道的偏振图像进行配准,图像分辨率为 1 024×1 024。基于 FMT 算法原理,结合 C6670 的硬件处理资源及其并行编程方法^[18],设计了并行计算任务。根据偏振图像配准中多路数据流的节奏变化,将并行计算任务初步划分为两个数据处理阶段,如图 2、3 所示。

每个数据处理阶段分别由多条并行计算支线构成。在每条并行计算支线中,以图像像素的行或列为数据的基本单位,按照不同运算之间数据相对独立的原则,将 FMT 算法结构设计成具有多个独立运行的子计算任务(用大写字母从 A 到 K 分别标识)的并行计算结构。每个子计算任务与对应的图像数据空间紧密相关,为后续的任务分配准备了量化依据。某些运算之间的数据耦合度较高,因而内聚到一个子计算任务中,在图 2、3 中用虚线框标识。从图 2、3 可看出,在同一处理时间层次上,不同并行计算支线的子计算任务的运算操作相同,但是处理的数据对象不同,

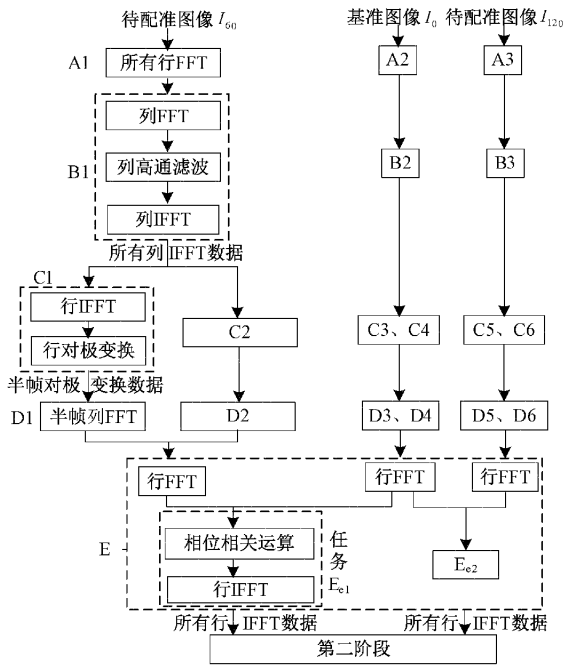


图 2 偏振图像配准第一阶段并行计算任务设计

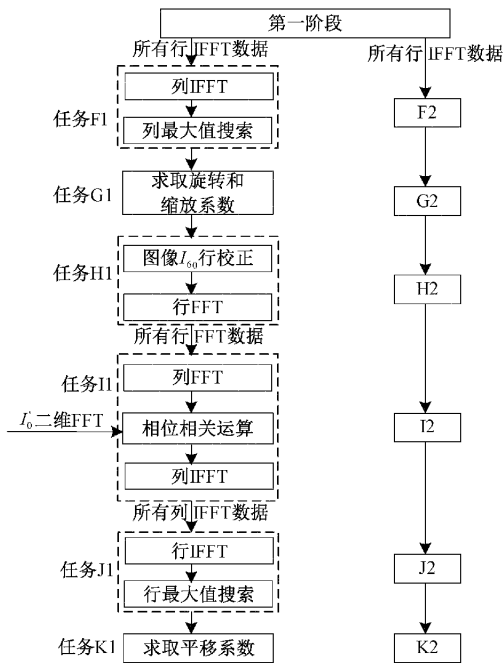


图 3 偏振图像配准第二阶段并行计算任务设计

为加以区别,在这些子计算任务的字母后面加上数字标识。例如,图 2 中,图像的二维 FFT 分解为先后行的两次一维 FFT。A1、A2、A3 这 3 个子计算任务都是执行 FFT 运算,数据分别来源于 3 个通道偏振图像的行像素。在子计算任务 B 中,每完成一列像素的 FFT 后,对该列像素依次执行高通滤波、快速傅立叶反变换 (inverse FFT, 简称 IFFT)。需要说明的是:子计算任务 E 是图像数据流从三路向两路转换的关节点,为保证负载均衡,特别划分了 Ee1

和 Ee2 两个子节点任务,其分配见第 3.2 节说明。

3 偏振图像配准并行计算任务分配

上述偏振图像配准并行计算任务需要分配给具体的硬件处理资源。为此,预先测试分析了 C6670 的核和 FFTC 的处理特性,以执行 1 024 点 FFT 为例,FFTC 耗时 t_{fB0} 约 2.042 μ s,单核耗时 t_{fB1} 约 4.218 μ s。单核执行 1 024 点高通滤波时间 t_{H0} 约 3.012 μ s。据此,针对不同的并行计算任务内容,主要设计了以下两种方法实施任务分配。

3.1 分组异构并行

在这种方法中,将 C6670 的核和 FFTC 分成处理能力不同的多个处理组,以预先设计的各计算的数据量阈值为各组同步节点,通过中断通知方式保持处理同步,借助数据缓存实现数据交互。以子计算任务 B 分配为例,C6670 的 4 个核都能承担其中所有运算,而 FFTC 不能执行其中的高通滤波。在这种异构多核结构处理问题中,难以平均分解数据量,也不能同时对各数据进行相同处理,只能有序划分数据并分步实施。其中的关键是在 CPU 核进行高通滤波时,保证 FFTC 同时也在工作。为减少分配复杂性,根据处理性能相同原则,将 4 个核、2 个 FFTC 各自分成 2 个处理组,称为 B_{core} 组和 B_{FFTC} 组。

子计算任务 B 分配的数据量以图像列为基本单位,3 个通道的图像数据量共为 3 072 列。如图 4 所示,第 1 步, B_{core} 组承担 x_{BC1} 列的数据从 FFT 到 IFFT 的列处理, B_{FFTC} 组承担 x_{BF1} 列的 FFT 处理;第 2 步, B_{core} 组对 x_{BF1} 列中已完成的 FFT 处理结果 x_{BF2} 列进行高通滤波。同时, B_{FFTC} 组继续对 $(x_{BF1} - x_{BF2})$ 列进行 FFT;第 3 步, B_{FFTC} 组对完成高通滤波的 x_{BC2} 列数据进行 IFFT 处理, B_{core} 组对 $(x_{BF1} - x_{BF2})$ 列进行滤波,并对其中的 x_{BF3} 列进行 IFFT 处理。

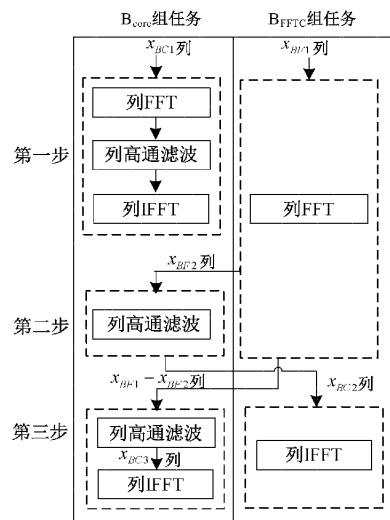


图 4 子计算任务 B 的分组异构并行分配图

接下来求解分配给各运算的数据量。负载均衡的目标是使 B_{core} 组和 B_{FFTC} 组的总处理时间 T_{BC} 和 T_{BF} 的差值尽

量小,反映到图 4 中,则是使第 2 步、第 3 步并行运算的结束时间接近。以每列 1 024 pixel 为基本处理数据单位,按照图 4 的分配流程,建立 T_{BC} 和 T_{BF} 之间的代数等式,代入已知的各组处理单元的数量、FFT 和高通滤波处理时间 $t_{f\beta 0}$ 、 $t_{f\beta 1}$ 和 t_{H0} ,通过初始假设及多次迭代运算,得出图 4 中各运算相关数据量的大小,例如, $x_{FC1} = 556, x_{BF1} = 2\ 516$ 。限于篇幅,具体推导在此不赘述。

3.2 组内异构并行

在这种方法中,将 C6670 的核和 FFTC 分成处理能力相同的多个处理组,以预先设计的流水线方式并行工作,不需要进行中断交互。以子计算任务 E 分配为例,要求同时完成三通道图像中位置相同的一行像素的 FFT,才能实施相位相关运算。并且来自基准图像的行 FFT 结果要同时提供给任务 E_{e1} 和任务 E_{e2} 这两个相对独立的子任务。从并行性分析,一次行 FFT 至少需要 3 个处理器同时运行,相位相关运算至少需要两个处理器同时运行,行 IFFT 至少需要两个处理器同时运行。为保证负载平衡,在上述最少量处理器运行时,其它处理器也必须运行。

首先,采用数据分解方法,将数据处理任务平分给两个处理器组。每个处理器组包括两核和一个 FFTC。共需要分配 7 个运算,其中相位相关运算只能分配给两个核。剩下的运算要根据不同处理器处理时间进行分配。在 1 个指令周期内,C6670 的乘法器能完成 1 次单精度浮点复数乘法,S 单元能完成 1 次开平方根,可用于加速 1 024 点相位相关运算,使 1 次相位相关运算耗费时间约 $1.551\ \mu\text{s}$ 。在 $t_{f\beta 0} < t_{f\beta 1}/2$ 的情况下,每个核还能再承担在相位相关运算之后的 1 行像素的 IFFT。这样,每个核的理论处理时间 $T_{EC} = 5.769\ \mu\text{s}$,FFTC 的理论处理时间 $T_{EF} = 6.126\ \mu\text{s}$,可以采用流水线方式并行工作。最终,设计任务 E 的组内异构并行计算流程如图 5 所示,其中矩形框 P 表示相位相关运算。任务 E 的处理时间是 FFTC 对 3 帧图像的 512 行数据的 FFT 处理时间,即为 $T_{EF} = 3 \times 512 \times t_{f\beta 0} = 3\ 136.512\ \mu\text{s}$ 。

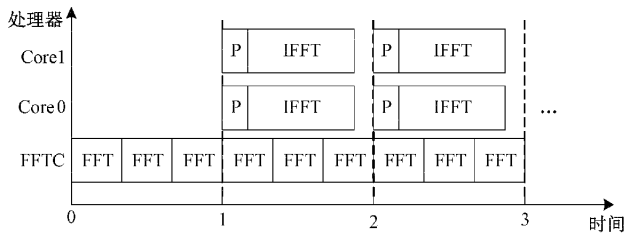


图 5 子计算任务 E 的组内异构并行计算流程图

4 实验测试

在室内条件下进行了偏振图像配准实验测试。在 C6670 的单核和多核条件下,采用 C 语言和汇编语言混合方式编程。C 语言用于编写需要可读性强的主体逻辑框架,汇编语言用于编写 FMT 算法。

4.1 配准偏差测试

需要说明的是,此测试并不是为了证明 FMT 算法相对于其它算法的优势,只是验证本文设计的 FMT 并行处理方法是否保持了原始算法的配准精度,并达到系统应用要求的指标:水平位移偏差为亚像素,旋转校正偏差小于 0.25° 。考虑实际的 3 通道偏振图像之间的几何偏差不大,以水平位移范围小于 10 pixel,旋转范围小于 5° 为样本实际偏差区间,取 10 组 3 通道偏振图像,按本文并行算法进行处理后进行统计分析,每组平均结果按从小到大顺序排列,如表 1 所示。分析表 1 可知,水平位移校正偏差最大为 0.74 像素,旋转校正偏差最大为 0.17° ,水平位移均方根误差为 0.656,旋转均方根误差为 0.122,精度能满足应用要求。

表 1 基于 FMT 的偏振图像配准测试平均结果

样本组	水平位移校正偏差/ pixel	旋转校正偏差/ ($^\circ$)
1	0.57	0.05
2	0.59	0.09
3	0.60	0.11
4	0.61	0.11
5	0.64	0.12
6	0.65	0.13
7	0.67	0.13
8	0.73	0.14
9	0.73	0.16
10	0.74	0.17

一组实际偏差较小的偏振图像在配准前后分别进行融合的结果比较如图 6 所示,其拍摄场景是放有一块与草皮灰度接近的金属板的足球场局部。其中, 60° 偏振图像水平位移偏差为: $x = -5, y = 4$ 。旋转角度为 -0.5° ; 120° 偏振图像相对水平偏移为: $x = 3, y = -4$ 。旋转角度为 -0.8° 。

以 0° 偏振图像为基准,用图像质量评价指标 MSE (mean squared error)、PNSR (peak signal to noise ratio) 和 SSIM (structural similarity) 分析配准前后的图像,结果如表 2 所示。可以看出 60° 、 120° 偏振图像配准后的 MSE 指标比配准前都有所降低,表明图像配准有效,但是由于不同偏振图像之间的光强有区别,因此 MSE 值仍然较大,下降变化不明显,PNSR 指标相差变化不大。这是因为偏振图像融合不主要依赖于光强,所以 MSE 和 PNSR 不能作为衡量偏振图像配准效果的主要指标。SSIM 指标是从亮度、对比度、结构等多方面评价图像相似度,因此比 MSE 和 PNSR 能更合理的反映偏振图像配准效果。从表 2 中可知,配准后比配准前的 SSIM 大,而且数值较高,相对更接近 1.0。

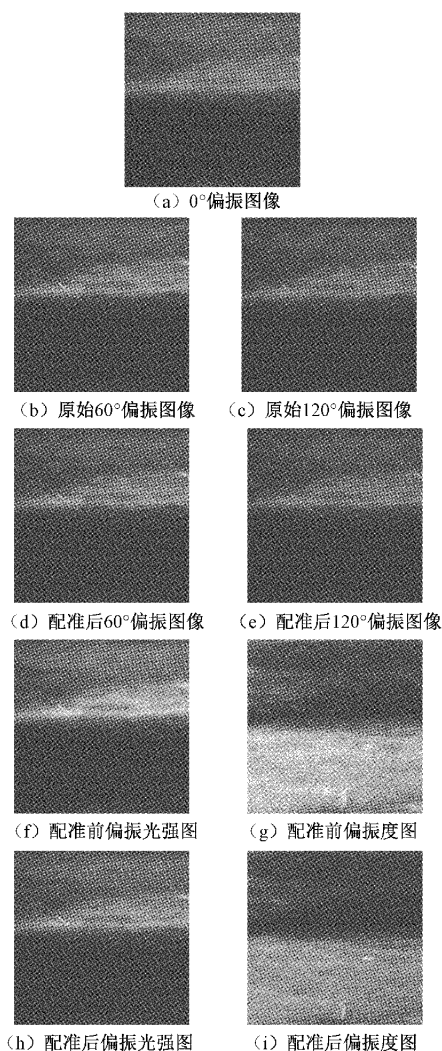


图 6 一组偏振图像配准前后的融合处理结果

表 2 配准前后偏振图像质量评价

比较图像	MSE	PNSR	SSIM
60°原始图像	192.91	29.02	0.88
60°配准图像	182.58	25.51	0.93
120°原始图像	250.74	24.14	0.86
120°配准图像	245.41	24.23	0.92

进一步地,针对偏振图像融合结果的偏振光强图(简称 I 图)和偏振度图(简称 P 图),采用无参考的空间域图像质量评估指标 BRISQUE 衡量,结果如表 3 所示。结合图 6 的(f)和(g)可看出,由于存在位置偏差,不同目标产生重叠,在配准前融合得到的 I 图和 P 图的偏振信息出现畸变,产生较多的前景噪声,从而使真正的目标信息不显著。当配准后再融合,I 图的 BRISQUE 值是配准前的约两倍,而 P 图的 BRISQUE 值小于配准前的一半,这正符合 I 图信息丰富、P 图突出目标的偏振探测优势。同时,人眼也能观察到配准后的 I 图和 P 图的灰度变化均匀,细节准确,特别是

相对图 6(g),可以看到在图 6(i)中间偏右位置上的草地中,金属板目标的灰度信息较白而显著。

表 3 配准前后融合图像质量评价

比较图像	BRISQUE
配准前 I 图	19.25
配准后 I 图	38.53
配准前 P 图	34.75
配准后 P 图	10.66

4.2 配准时间测试

本文对 50 组偏振图像进行配准后,统计得到平均处理时间。为了便于与其它不同文献的结果比较,首先按照本文硬件条件统一换算不同处理平台的处理性能,其中,根据 FFT 运算在 FMT 算法中的占比约 50%,使两个 FFTC 近似为 1 个核,也即本文所用核的数量可视为 5 个;其次,本文是对 1024×1024 分辨率图像同时进行两次配准,再考虑图像数据量大小与处理时间增减的关系近似为线性关系,据此与其它文献不同的图像数据量进行等比例换算后,比较结果如表 4 所示。

表 4 偏振图像配准处理时间比较

来源文献	处理条件	平均处理时间/ms
[8]	C6678,32 核,主频 1.25 GHz	74.4
[14]、[15]	GPU,4 核,主频 1.05 GHz	30.8
[16]	C6678,6 核,主频 1.25 GHz	18.500
本文	C6670,单核,主频 1.2 GHz	71.825
本文	C6670,4+1 核,主频 1.2 GHz	16.206

表 4 中,文献[8]采用了 4 片型号 TMS320C6678(简称 C6678)的 8 核 DSP,以最小二乘算法为主对 4096×4096 分辨率图像进行了 1 次图像配准,原始处理时间是 93 ms,换算后可知本文的单核处理时间比文献[8]快,这与各自的算法复杂度不同有关,但也间接说明本文的 FMT 算法与 DSP 结合的高效。文献[14]、[15]同样采用 FMT 算法,原始处理时间是 22 ms,按数据量、主频统一换算后,其结果比本文慢。文献[16]是采用傅里叶变换对 6576×4384 分辨率偏振图像进行了 2 次配准,在考虑本文采用的 FMT 算法运算量约为其 1.5 倍后,进行了换算,从表 4 可以看出,本文的处理时间比文献[16]的少约 2 ms,但在各自采用处理算法不同的情况下,只将处理时间作为参考,可以看作结果相近,但本文采用的 DSP 核比文献[16]少 1 个,功耗更低。

本文的 1 组 3 通道偏振图像配准的理论设计运算时间约为 15.353 ms,由于数据传输延迟等因素,实际平均值要低些,是 16.206 ms。C6670 的四核加双 FFTC 处理结果与

单核相比,加速比为 $71.825/16.206 = 4.432$,比理论最大值 5 要小,这主要受 3 个因素影响。1)FTTC 与核的性能不同;2)实际不能完全保证各核及 FTTC 处理负载平衡;3)核间、核与存储器之间数据传输增加了延迟。

5 结 论

本文通过对原始 FMT 算法的运算和数据结构优化,建立了适用于 3 通道偏振图像配准的并行计算结构,并在图像数据分解及流水线处理的基础上,设计了基于分组异构、组内异构的偏振图像配准并行任务分配方法,充分发挥了多核 DSP 芯片 C6670 的四核及双 FTTC 硬件处理优势,保证了良好的系统负载平衡。实验结果表明,对 3 通道的静态偏振图像配准的并行处理达到了很高的实时性。本文并行计算任务是以数据量为划分依据而设计的,可以适用于更高分辨率的图像。此外,本文只是实现了原始 FMT 算法的并行计算,下一步将改进算法,增强鲁棒性,并继续保证处理实时性。

参考文献

- [1] 罗海波,张俊超,盖兴琴,等. 偏振成像技术的发展现状与展望[J]. 红外与激光工程, 2022,51(1):109-118.
- [2] 赵鹏翔,刘宾,潘晋孝. 基于 Stokes 矢量的多视角水下偏振成像算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2021,40(3):77-82.
- [3] 杨白雪,张晓丹. 尺度不变特征变换的图案匹配研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(2):53-58.
- [4] 史国川,拓浩男. SIFT 和 SURF 算法在偏振图像匹配中的应用研究[J]. 舰船电子工程, 2020,40(10):93-95,148.
- [5] 赵智祎,孙婷,李峰,等. 基于嵌入式 FPGA 加速 ORB 算法的遥感影像配准方法[J]. 中国空间科学技术, 2021,41(5):125-135.
- [6] GILLES R, SYLVAIN L. Registration of visible and near infrared unmanned aerial vehicle images based on Fourier-mellin transform [J]. Precision Agriculture, 2016,17(5): 564-587.
- [7] 万钺良,王建立,张楠,等. 一种基于相位相关与子图像的偏振图像配准方法[J]. 液晶与显示, 2019,34(5): 530-536.
- [8] BERG R, KÖNIG L, RÜHAAK J, et al. Highly efficient image registration for embedded systems using a distributed multicore DSP architecture[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2018,14(2): 341-361.
- [9] 姜骞,刘亚东,方健,等. 基于轮廓特征的电力设备红外和可见光图像配准方法[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(11):252-260.
- [10] 张书波,钟廷勇,贾宇明. 能量制约耦合比值一致性约束的图像匹配算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020,34(3):9-16.
- [11] 罗久飞,邱广,张毅,等. 基于自适应双阈值的 SURF 双目视觉匹配算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(3): 240-247.
- [12] 张绍荣,张闻宇,李云,等. 基于 FAST 角点和 FREAK 描述符改进的无人机景象匹配算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020,34(4):102-110.
- [13] 曹国刚,张晴,张培君,等. 基于多核并行化差异进化算法的图像配准方法[J]. 计算机工程与应用, 2017,53(20):166-172.
- [14] 张楠,李振伟,杨文波. 并行图像配准算法在幸运成像中的应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2015,34(4):49-54.
- [15] 刘晨,刘后标,贾可,等. 基于相位相关法的实时模板定位方法[J]. 计算机应用, 2015,35(S1):252-254,266.
- [16] 白清,袁艳,苏丽娟. 多核并行 DSP 光场偏振图像快速处理技术[J]. 计算机工程与应用, 2017,53(14):183-190,213.
- [17] YU W Y, XIE Y Z, LI B Y, et al. Spaceborne synthetic aperture radar imaging mapping methodology based on FPGA-DSP hybrid heterogeneous architecture[J]. The Journal of Engineering,2019,2019(21):7313-7317.
- [18] 姜康,王明泉,张俊生,等. 基于 DSP 的 ART 算法实现研究[J]. 国外电子测量技术, 2021,40(3):113-117.

作者简介

李志勇,副教授,博士,主要研究方向为嵌入式处理系统、机器视觉。

E-mail:2639267061@qq.com

卢松升,教授,博士,主要研究方向为计算机系统应用。

E-mail:lusongsheng@163.com