

# 实时图像仿射变换系统的研究与实现

王金辉, 陈冰, 王建庄

(华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

Research and Implementing of Real-time Image Affine Transform System

WANG Jin-hui, CHEN Bing, WANG Jian-zhuang

(State Key Laboratory of Digital Manufactory Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**摘要:**讨论了仿射变换原理,阐述了仿射变换系统的方案设计,给出了系统的功能框图并详细介绍主要模块的功能以及实现方法;最后给出该系统在医疗装备中的运用结果。结果表明,系统能够很好地满足图像仿射变换的实时性要求,图像质量好。

**关键词:**实时图像;仿射变换;FPGA

**中图分类号:**TP274

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-2257(2012)02-0059-04

**Abstract:** This paper discusses the principle of affine transform at first, and then describes the system scheme. Functional block diagram of the system and details of functionality and implementation of the main modules are given out. Finally, the paper lists an application in the medical equipment. The results showed that: the system can satisfy the real-time image affine transformation requirements with good image quality.

**Key words:** real-time image; affine transformation; FPGA

## 0 引言

图像的仿射变换包括了图像的平移、旋转以及放缩。利用平移、旋转以及放缩等操作,可以将原始图像变换为更加方便人眼观察或者利于机器识别、应用的图像。它的一种实际应用是对图像的几何失真进行校正<sup>[1]</sup>。此外,它在图像识别,图像配准<sup>[2]</sup>场合也起到了重要作用,已广泛应用于军事、航空和医学等方面。例如,郑广等<sup>[3]</sup>就把图像仿射变换作为

智能阅卷的一种新方法。

实时数据处理系统需具有能够处理大量数据的运算能力,以保证系统的实时性。当前,设计人员经常采用哈佛结构的 DSP 芯片作为数字信号处理的处理器。它具有处理速度快、成本和功耗低的特点。因此,DSP 芯片以其适应于高速数字信号处理的内部结构,在图像处理领域发挥着重要的作用<sup>[4]</sup>。但是在实时图像处理中,DSP 仍有它的瓶颈。实时图像要求每秒输出数十张的画面,通常为 24~30。实时图像处理的数据量非常大,因此它既要求 DSP 有高速的数据处理能力,也需要能快速的传输数据。对于 DSP 芯片而言,其片内的存储空间相当有限,必须通过外扩存储器的办法来缓存待处理的数据,这样必然会增加 DSP 读取数据的时间,同时也削弱了 DSP 高速运算能力。而且,DSP 只有一个 CPU 进行运算,如果需要对图像进行模板操作,将会非常的耗费资源并且难于保证实时性。当然,有设计人员提出了采用 DSP 阵列的方法来实现并行算法,提高运算能力、改善实时性。相比 DSP,基于 LUT(查找表)的 FPGA(现场可编程门阵列),没有固定的硬件结构。它具有丰富的可编程逻辑资源,存储块和 DSP 模块供调用,有非常大的设计自由度。利用 FPGA 高速,并行计算的特点,我们通过采用流水线的处理方式<sup>[5]</sup>,能够很大程度上提高系统的实时性,从而满足实时图像的要求。

本文在 ALTERA 公司的 CYCLONE2 系列 FPGA 上面硬件实现了图像的仿射变换。经验证,能够满足实时图像的处理要求。

## 1 仿射变换

实时图像的每一帧都可以看作由成行列的像素点组成。因此,可以通过建立坐标系,给每个像素点

收稿日期:2011-09-20

《机械与电子》2012(2)

定一个坐标。仿射变换实际上就是这种坐标变换,即根据图像变换的原理,得到变换前后图像坐标间的映射关系。实现坐标变换的时候,有2种方式:向后映射,即输入图像映射到输出图像;向前映射,即输出图像映射到输入图像。这里采用第2种方式。这样,可以避免出现在图像缩小时,输入图像的多行映射到输出图像的同一行的情况。

具体实现的时候,我们遍历变换后图像的每个坐标点。通过仿射变换,得到变换前的坐标。然后利用插值算法,得到每个坐标点的像素值,从而完成图像的仿射变换。

假设输出图像中,像素点的坐标为 $[x', y']$ ;输入图像中,像素点的坐标为 $[x, y]$ 。仿射变换可以统一表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

任何仿射变换都可以由式(1)变换而来。 $a_{11} \sim a_{23}$ 不同的取值,对应了不同的变换类型:

$$\text{平移} \begin{bmatrix} 1 & 0 & a \\ 0 & 1 & b \end{bmatrix}$$

$$\text{旋转角度} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{行列方向放缩} \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \end{bmatrix}$$

射变换可以由平移、旋转和放缩多个操作级联而成。

## 2 FPGA 硬件实现

整个系统的功能框图如图1所示。

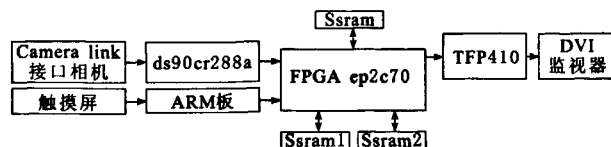


图1 系统功能框图

### 2.1 视频信号输入与输出

Camera link 接口相机输入为4对按LVDS(低电压差分信号)传输的信号。利用接收器芯片ds90cr288a,可以将4对信号还原为28个数据信号,其中包括24个像素值信号、帧有效信号、行有效信号、数据有效信号以及一个备用信号。相机被设置为30帧/秒帧频,像素频率40 MHz,图片格式为1000×1000。经过简单的前期处理,包括行场有效信号的处理,有效数据的提取,得到1000×1000

个有效像素值。通过先进先出存储器(FIFO),依次输入仿射变换单元。

同样,仿射变换完成后,数据也将通过先进先出存储器(FIFO)输出。需要将其进行显示。首先,将数据写入到片外的sdram中。根据运用需求,需要在显示的图片左右两端添加背景。因此,在sdram的其它地址里面填充数据,从而将图片扩充为1280×1024大小图片。然后根据DVI的显示格式,生成行场同步信号,一并输出给DVI监视器,输出的像素时钟为108.3 MHz。

### 2.2 人机界面

整个系统的人机界面由ARM+触摸屏完成。ARM与FPGA之间由GPIO口互联。它负责提供控制命令以及仿射变换必要的参数。实现方法为:首先利用Matlab或其它工具生成正弦余弦值的表,并将其填入代码中。然后,在操作时,在触摸屏上输入所需变换的角度,系统能够根据角度值查表,从而很容易得到所需的计算参数。与在FPGA上用Cordic算法计算正余弦值的方法相比,实现简单而且设计有更大的自由度。

这里运用中是为了方便人眼观察诊断,对旋转角度的分辨率要求不高,制作正余弦值查找表时角度分辨率为1°。实际上,在处理时,FPGA定义了14位的寄存器来分别存放正余弦值,即1位整数+13位小数的定点表示方法,因此其正余弦值的分辨率可以达到0.00012。

### 2.3 仿射变换单元

仿射变换单元是整个设计的核心部分,如图2所示,它可分为3个部分:Ssram控制器、地址生成以及关键的插值。

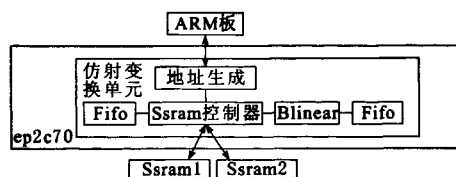


图2 仿射变换单元

#### 2.3.1 乒乓操作

实现图像的仿射变换需要先将图像缓存下来。FPGA含有丰富的存储资源,但是毕竟有限。因此,用片外存储器Ssram来进行存储。Ssram选用的是ISSI公司的IS61LPS102418A,规格为1024K×18bit。整个系统中,每个像素点的灰度值用16位表示,图像的有效范围是1000×1000。即每帧图像的大小为16 MB。正好存放在一片Ssram

中。因此,这里采用2片Ssram乒乓操作来同时进行视频图像的写入和读出。

乒乓操作是FPGA设计中常用到的数据流处理方法。它将数据流按节拍,输入到不同的数据处理单元,并且能够依据节拍,得到数据处理单元处理后的数据流。输入数据流和输出数据流都是连续不断的,没有任何停顿。

如图3所示,二选一选择器决定视频流的流向。在写片A的时候,依次将各个像素点的灰度值按顺序写入;与此同时,根据坐标变换得到的地址,在片B中读出对应地址的灰度值。当完成一幅图片写入片A的时候,改变二选一选择器的方向。将新的一幅图片写入片B;与此同时,根据坐标变换得到的地址,从片A中读出对应的数据。Ssram控制器工作在160 MHz的时钟下,是像素时钟的4倍。从而能够在一个像素的时钟内,读出4个像素点的像素值供双线性插值使用。

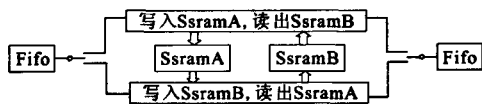


图3 Ssram乒乓操作

### 2.3.2 地址生成

经分析,地址计算整个的数据处理是“单向的”,而且没有反馈或者迭代运算,前一个步骤的输出就是下一个步骤的输入。因此,可以考虑使用流水线结构设计方法提高系统的工作频率。高速数字系统设计中广泛运用同步流水线技术,具有同步流水线结构的设计能够在不增加过多的硬件代价的前提下,有效地提高数字电路处理数据的速度。而且,这样也能够大大地降低系统设计的复杂度。

可以通过在每一个处理步骤之间添加寄存器的方法来设计同步流水线。整个系统的最高频率由耗时最多的步骤决定。地址生成的过程为:

- 遍历新图像中的每一个坐标点。因为旋转中心在图像的中心,因此将坐标原点移植到图像中心。
- 利用ARM板提供的正余弦值以及式(1),可以计算得到变换前对应的坐标。

地址生成这部分的运算可以用图4来表示。

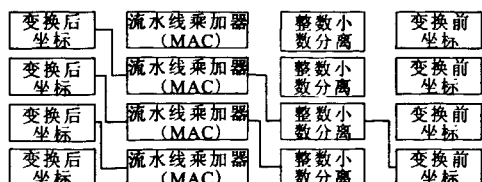


图4 流水线结构

由式(1)分析,所需计算的值包括 $x$ 和 $y$ 。因此,需要例化2个乘加器来分别计算 $x$ 和 $y$ 。乘加运算的参数 $a_{11} \sim a_{23}$ 来自于ARM。在人机界面上,通过触摸屏设置输入图像平移量,图像旋转角度以及图像放缩的系数。ARM板对上述各种变换系数进行叠加后,将最后的参数通过GPIO口传递给FPGA,避免在FPGA内部还要进行三角函数运算等较复杂的运算。FPGA接收这些参数后,由乘加器计算出仿射变换后的地址。计算后得到的 $x, y$ 值通常都不是整数坐标。结果的整数部分用于计算变换前像素点的坐标,小数部分用于插值计算。

### 2.3.3 插值

图像插值是图像处理的重要内容。传统的插值方法侧重于图像的平滑,以减少锯齿,块状等图形走样的现象。包括最邻近插值、双线性插值和双三次插值。但是传统方法的问题在于损失了图像细节,常导致图像边缘的模糊<sup>[6]</sup>。为了保留图像的边缘信息,有2种方法:对传统插值方法后的图像用增强边缘算子处理;采用新的、基于边缘的插值算法。即对原始图像进行边缘检测,然后将边缘部分、平缓部分区别对待,使用不同的插值方法。这种方法得到的图像,有很好的视觉效果。

因为双线性插值的方法能够很好的避免锯齿、马赛克的效应,得到图像质量好,而且又便于硬件实现,因此采用这种方法来实现实时图像的仿射变换。

假设坐标变换后得到点为 $(x', y')$ ,其中 $x' = x + dx; y' = y + dy$ 。它邻近的4个点分别如图5中所示。双线性插值算法用这4个点的灰度值来转换,权重与各自离点 $(x', y')$ 的距离有关。它实现了取平均的效果,有低通滤波的作用。因此可以很大程度上,避免锯齿的出现。计算公式为:

$$\begin{aligned} f_{x0} &= f(x, y) \times (1 - dx) + f(x + 1, y) \times dx \\ f_{x1} &= f(x, y + 1) \times (1 - dx) + f(x + 1, y + 1) \times dx \end{aligned} \quad (2)$$

$$f = f_{x0} \times (1 - dy) + f_{x1} \times dy$$

硬件实现时,与前面计算变换地址一样,也采用乘加器设计。而且根据逻辑复用的思想, $f_{x0}$ 与 $f_{x1}$ 的计算在时间上错开,因此可以用同一个乘加器来实现。既不影响工作频率,又节约了资源。

采用定点方式进行计算。 $d_x, d_y$ 来自于生成地址的小数部分,系统里用13bit来表示。

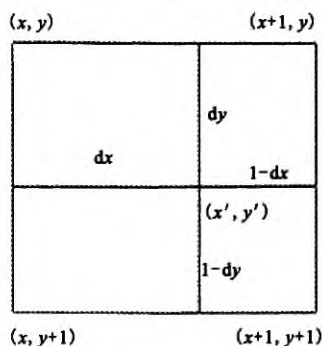


图5 双线性插值算法示意图

### 3 数据分析

为了对结果进行验证,作一幅测试图片辅助测试。1 000×1 000 大小的图片,每行内容为 0 到 999 的递增变化。然后利用 quartus2 自带的测试工具 signaltap 完成数据采集,并对数据进行分析。

如图 6 所示,遍历每个坐标点(STX,STY)。然后根据公式,得到仿射变换对应的坐标(XZ\_X,XZ\_Y)。SRAM2 正在依次将数据填入地址中,数据与地址很好的对齐。同时,SRAM1 正在根据生成的地址读数据。根据 SRAM 手册可知,数据滞后于地址 2 个时钟,可见数据正是我们写入的数据。

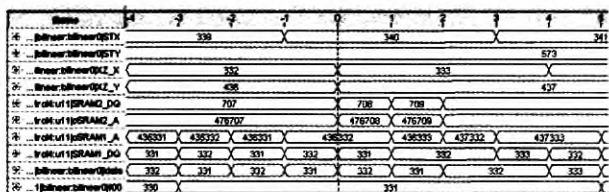


图6 乒乓操作

如图 7 所示,仿射变换单元利用 SRAM 读出来的数据完成插值运算。根据双线性插值算法,我们需要 4 个点的灰度值来完成插值。图中 idata 为根据生成地址,从 SRAM 读出的数据。

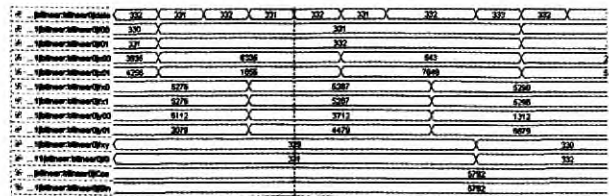


图7 双线性插值计算

根据流水线结构,将它依次送入 f00 和 f01。x00,x01,y00,y01 都为插值参数,来自于地址生成得到的小数部分。从图 7 可以看出,每 4 个时钟周期可以完成一次插值运算。因为工作时钟周期是像

素周期的四分之一,因此实际上就是一个像素时钟周期内可以完成一次插值运算,可以满足实时性。

系统设计中,FPGA 采用 altera 公司 cyclone2 系列的 EP2C70F896C6 芯片,能够提供足够丰富的逻辑资源和时钟资源。采用模块化的设计方案,单独设计各个测试模块,测试能够完成相应功能后,组合在一起。各个模块的设计中都选用了流水线结构,提高系统工作频率,满足实时性要求。而外接一片 ARM 的结构,既可以作为人机界面用,也可以帮助计算参数,为将来实现投影变换等图像处理操作提供便捷。目前,系统已经运用于南京某医疗装备公司。如图 8 所示为实时医疗图像的变换结果。从图 8 来看,变换后图片质量好,没有锯齿或者马赛克效应出现。



图8 实时图像仿射变换的输出结果

### 4 结束语


图像采集和显示的分辨率呈跨越式发展,需要处理的数据量也将大大增加。FPGA 以其可编程、并行运算的结构特点,将发挥更加重要的作用。本文研究基于 FPGA 的实时图像仿射变换系统,下一阶段将把重点放在高清图像传输上。

### 参考文献:

- [1] 章毓晋. 图像工程[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] 韩国良. 几何变换及配准和运动估计的几何代数方法研究[D]. 东营:中国石油大学(华东),2008.
- [3] 郑广,秦敏,付冬,吕秀鉴. 基于图像识别的客观题阅卷研究[J]. 仪器仪表学报,2006,(27):783-784.
- [4] 刘治,李建,田伟. DSP 在图像处理中的应用[J]. 山东电子,2004,(1):57-59.
- [5] 刘怡,等. FPGA 双线性插值图像变换系统的设计与实现[J]. 中国测试技术,2008,(34):65-67.
- [6] 符祥,郭宝龙. 图像插值技术综述[J]. 计算机工程与设计,2009,30(1):141-144.

作者简介:王金辉 (1987-),男,福建龙岩人,硕士研究生,研究方向为高速数字电路设计、图像处理;陈冰 (1977-),男,黑龙江青冈人,讲师,博士,研究方向为运动控制和工业以太网。

《机械与电子》2012(2)

作者: [王金辉](#), [陈冰](#), [王建庄](#), [WANG Jin-hui](#), [CHEN Bing](#), [WANG Jian-zhuang](#)  
作者单位: [华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室](#), 湖北武汉, 430074  
刊名: [机械与电子](#)   
英文刊名: [Machinery & Electronics](#)  
年, 卷(期): 2012(2)  
被引用次数: 1次

## 参考文献(6条)

1. [章毓晋](#) [图像工程](#) 2005
2. [韩国良](#) [几何变换及配准和运动估计的几何代数方法研究](#)[学位论文] 2008
3. [郑广](#); [秦敏](#); [付冬](#); [吕秀鉴](#) [基于图像识别的客观题阅卷研究](#) 2006(27)
4. [刘治](#); [李建](#); [田伟](#) [DSP在图像处理中的应用](#)[期刊论文]-[山东电子](#) 2004(01)
5. [刘怡](#) [FPGA双线性插值图像变换系统的设计与实现](#) 2008(34)
6. [符祥](#); [郭宝龙](#) [图像插值技术综述](#)[期刊论文]-[计算机工程与设计](#) 2009(01)

## 引证文献(1条)

1. [郭佳](#), [李辉](#), [王成](#), [李思众](#) [一种基于互信息的图像配准算法](#)[期刊论文]-[传感技术学报](#) 2013(7)

引用本文格式: [王金辉](#), [陈冰](#), [王建庄](#), [WANG Jin-hui](#), [CHEN Bing](#), [WANG Jian-zhuang](#) [实时图像仿射变换系统的研究与实现](#)[期刊论文]-[机械与电子](#) 2012(2)