

## B 超中数字扫描变换器的 FPGA 设计与实现

彭勇, 陈菲, 董万利

(西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 数字扫描变换器(DSC)是医用 B 超的重要部件,有坐标变换和插值两个关键点。根据实际项目的需求,在分析 DSC 原理的基础上,确立了以双线性插值和 CORDIC 算法完成坐标变换的设计思想,并给出其在 FPGA 中的实现和硬件仿真。结果表明,其运行速度快,结构简单,满足应用需求。

**关键词:** 数字扫描变换; 双线性插值; CORDIC 算法; FPGA

中图分类号: TP391.8

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)12-0024-03

## FPGA design and implementation of digital scan converter for B-ultrasonic

Peng Yong, Chen Fei, Dong Wanli

(College of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** The digital scan converter (DSC) is an important part of the medical B-ultrasonic, coordinate transformation and interpolation are two key points in its design. According to the actual needs of the project, based on analysis of the DSC principle, this paper establishes a coordinate transformation design thinking which is completed by the bilinear interpolation and the CORDIC algorithm, and gives its implementation and hardware simulation in the FPGA. The results show that its running speed and simple structure meets the application requirements well.

**Key words:** digital scan converter; bilinear interpolation; CORDIC; FPGA

在 B 超诊断系统中,凸阵探头扫描人体横截面形成的图像是扇形的,而从探头所采集到的信号是以极坐标形式存储的矩阵数据<sup>[1]</sup>,数字扫描变换器(DSC)完成将该矩阵数据实时转化到显示器的直角坐标系。坐标转换和数据插值是 DSC 的关键<sup>[2-3]</sup>,其设计方法有多种,坐标变换常采用公式查表法或 CORDIC 算法进行实时计算完成转换。常用的插值算法包括最近邻插值、双线性插值、双立方插值、高次插值和 R-Theta 几种。这些算法各有优缺点,在应用中需根据系统方案和性能要求综合考虑选择。本文中,DSC 模块将在 FPGA 中实现,充分衡量设计的可行性和复杂度,决定采用 CORDIC<sup>[4-5]</sup>和双线性插值完成 DSC,其系统执行速度和性能均满足应用需求。

## 1 坐标变换与双线性插值

凸阵探头接收到的回波信号经处理后以极坐标形式存储于如图 1 所示回波接收存储区中,显示时需以直角坐标的形式存储于如图 2 所示显示存储区中。因此,需要一定的坐标转换将图 2 中的数据映射到图 1 中。设凸阵探头曲率半径为  $r$ , 角度为  $\alpha$ , 接收采样线条数为  $K$ , 采样点数为  $L$ , B 超图像显示的矩形区域横向分布有  $M$  个点,纵向分布  $N$  个点,超声探头实际探测物理区域

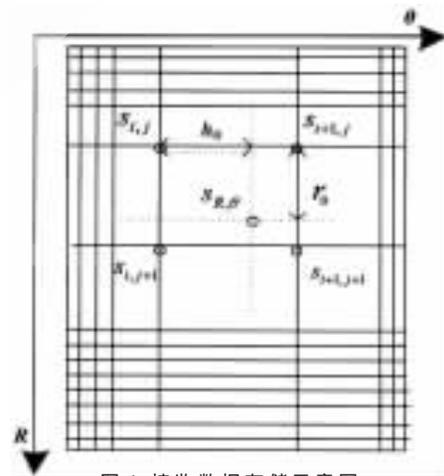


图 1 接收数据存储示意图

与显示图像像素数的横、纵向比例分别为  $w$  和  $h$ 。转换中,将显示区域中的任意一点对应到回波信号的接收区域,假设 P 点直角坐标为  $(x,y)$ ,则对应于极坐标中点 S 的转换关系如下:

$$R = \{ \sqrt{[(x-M/2)w]^2 + [yh - r\cos(\alpha/2)]^2} - r \} L/D \quad (1)$$

《微型机与应用》2013 年 第 32 卷 第 12 期

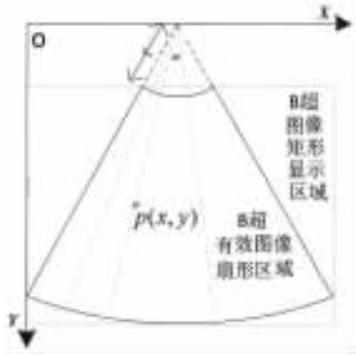


图2 显示凸显存储示意图

$$\theta = \begin{cases} \frac{k}{\alpha} \arctan\left[\frac{w}{h} \frac{M/2-x}{y-r\cos(\alpha/2)/h}\right], & x \leq M/2 \\ \frac{k}{\alpha} \left\{ \frac{\alpha}{2} + \arctan\left[\frac{w}{h} \frac{x-M/2}{y-r\cos(\alpha/2)/h}\right] \right\}, & x > M/2 \end{cases} \quad (2)$$

由于P点通过坐标转换后得到在极坐标中的点不一定正好为整数,所以需要通过双线性插值的方式得到该点数值的大小,该插值方法具有结构简单、插值效率高、便于硬件实现的特点。其基本原理为:设 $p(x,y)$ 点经公式计算后得到非整数极坐标 $s(R,\theta)$ ,与之相邻的4个整数极坐标点分别为 $s_{i,j}, s_{i+1,j}, s_{i,j+1}$ 和 $s_{i+1,j+1}$ 。 $h_0$ 和 $r_0$ 为点 $s(R,\theta)$ 到 $s_{i,j}$ 点在横向和纵向的距离,则P点值的大小为:

$$p(x,y) = (1-r_0)(1-h_0)s_{i,j} + (1-r_0)h_0s_{i+1,j} + r_0(1-h_0)s_{i,j+1} + r_0h_0s_{i+1,j+1} \quad (3)$$

## 2 Cordic 算法应用于坐标变换

分析式(1)、式(2)可知,在FPGA中完成坐标转换设计的难点在于平方/开方和反正切值的计算。利用CORDIC算法可将这两种复杂的运算转换为加减和移位操作,便于在FPGA中实现。CORDIC计算特殊函数值的核心理想是通过微旋转将任意输入 $(x,y)$ 旋转至 $x$ 轴方向,此时,旋转的角度即为 $\arctan(y/x)$ , $x$ 轴向坐标即为 $\sqrt{x^2+y^2}$ 。

如图3所示,将 $(x_i, y_i)$ 逆时针旋转 $\theta_i$ 至 $(x_{i+1}, y_{i+1})$ ,根据笛卡尔坐标旋转可得:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i \cos \theta_i - y_i \sin \theta_i \\ y_{i+1} = y_i \cos \theta_i + x_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)中的 $\cos \theta_i$ 提出,简化后得到:

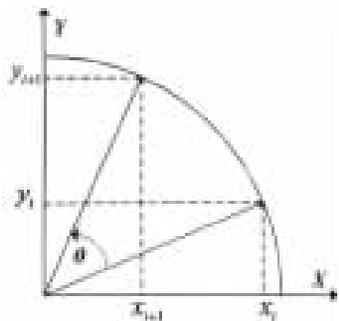


图3 坐标旋转示意图

$$\begin{cases} x_{i+1} = \cos \theta_i (x_i - y_i \tan \theta_i) \\ y_{i+1} = \cos \theta_i (y_i + x_i \tan \theta_i) \end{cases} \quad (5)$$

取 $\tan \theta_i = \pm 2^{-i}, i=1,2,3 \dots n$ 。则式(5)中乘以正切项可以通过简单的移位操作实现。而任意角度的旋转都可以通过多次“微旋转”完成,每次旋转的角为 $\theta_i = \arctan(2^{-i})$ , $\cos \theta_i$ 为常数, $y_i$ 的符号决定旋转方向(可用 $d_i$ 来表示),旋转迭代角度总和即为所求角度。从新整理可得,旋转迭代公式为:

$$\begin{cases} x_{i+1} = C_i (x_i - d_i y_i 2^{-i}) \\ y_{i+1} = C_i (y_i + d_i x_i 2^{-i}) \\ z_{i+1} = z_i + d_i \arctan(2^{-i}) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中,取 $d_i = \begin{cases} +1 & (y_i < 0) \\ -1 & (y_i > 0) \end{cases}, c_i = \cos[\arctan(2^{-i})], z_0 = 0$ 。可以看出当进行 $n$ 次迭代至 $y_n = 0$ 后,公式为:

$$\begin{cases} x_n = C_n \sqrt{X^2 + Y^2} \\ y_n = 0 \\ z_n = \theta = \arctan(Y/X) \end{cases} \quad (7)$$

可以看出,取式(1)、式(2)中 $X = y - r\cos(\alpha/2), Y = x - M/2$ ,按照上述迭代过程即可求出式(1)、式(2)中的 $R$ 和 $\theta$ 。

## 3 DSC 算法的 FPGA 设计与实现

### 3.1 整体功能设计

在基于FPGA的整个B超系统设计中,显示区域图像大小为 $512 \times 512$ ,接收原始数据大小为 $160 \times 512$ 。DSC变换器将接收后存储于SRAM的原始数据转换为扇形图像并写入该SRAM的另一个存储区域,其功能独立,通过 $fdsc\_st\_i$ 与 $fdsc\_done\_o$ 两个信号与FPGA中其他模块完成交互。

按照同步设计、接口尽量简单的原则,该模块内部整体划分如图4所示。该DSC变换器的顶层命名为 $dsc\_top$ ,内部包含 $gen\_xy, cordic\_calc, dl\_insert$ 3个子模块。 $gen\_xy$ 模块在 $fdsc\_st\_i$ 信号的触发下,产生转换所需要的直角坐标 $xdata\_w[15:0], ydata\_w[15:0]$ 。由于 $dl\_insert$ 模块在进行双线性插值时需要多个时钟周期,因此,产生 $dvalid\_w$ 信号用作数据有效指示。 $cordic\_calc$ 模块完成式(1)、式(2)的运算,首先将输入直角坐标进行简单变换,再利用CORDIC算法将直角坐标转换至极坐标

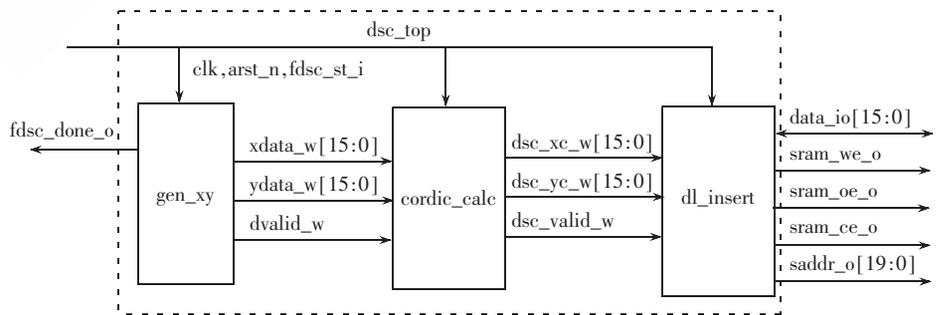


图4 DSC的FPGA设计模块划分

## 硬件纵横

Hardware Technique

得到  $dsc\_xc\_w[15:0]$ 、 $dsc\_yc\_w[15:0]$  给插值模块。其中  $dsc\_xc\_w$  和  $dsc\_yc\_w$  为有符号格式, 最高位 bit15 为符号位, bit14~bit6 为整数位, bit5~bit0 为小数位,  $dl\_insert$  模块根据该小数位按式(3)完成双线性插值。

## 3.2 CORDIC 算法完成坐标转换设计

CORDIC 算法的实现方式有两种

种:简单状态机法和全高速全流水线处理器。前者采用硬件复用/迭代的方式,它与状态机结合,在同一硬件单元上(加法器、减法器、寄存器)每个时钟周期进行一次迭代运算,待  $N$  个周期之后完成  $N$  次迭代,输出迭代结果。该实现方式最大的优点是资源消耗少,但是其两个桶形移位器设计复杂,而且根据迭代次数需要多个时钟周期才能输出一个结果。吞吐率较低,不适合该系统。由于系统规划时所选 FPGA 器件资源比较充裕,为提高系统计算速度,降低达到时序收敛难度,也为该系统后续扩展留以足够的余量,  $cordic\_calc$  模块采用全流水线结构。每次迭代的输出作为下次迭代的输入,每次迭代占用各自的硬件资源,内部基本流水线结构如图 5 所示。由 CORDIC 算法原理分析可知,CORDIC 完成坐标转换的精度取决于数据的量化宽度以及迭代次数,针对该系统数据位宽取 16 bit,迭代次数取 13 次即满足转换需求。

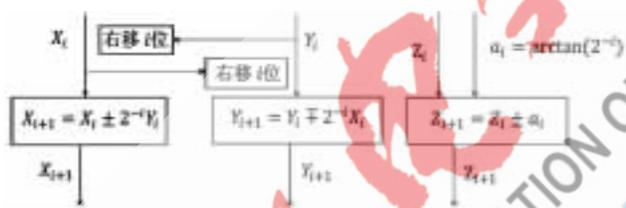


图 5 CORDIC 算法 FPGA 设计流水线结构

## 3.3 双线性插值实现

用于插值运算的 4 个原始数据均存储于 FPGA 片外 SRAM 存储器中,读取数据是顺序的,在进行乘法运算时可采用硬件复用的方式实现。插值系数计算由输入极坐标的小数位经一定的运算构成,先将各个小数乘以 64 转化为整数,在完成乘积和求和运算之后舍弃低 14 bit (两次乘法)得到真实结果。

## 3.4 结果与仿真

在 B 超诊断系统中, FPGA 选择 Altera 公司 Stratix II 系列的 EP2S60 芯片,实现工具为 Quartus II V9.1,仿真工具为 ModelSim Altera6.5b。

算法时序逻辑仿真结果如图 6 所示,超声原始图像如图 7 所示,DSC 变换后图像如图 8 所示。DSC 变换后的图像边缘平滑,无变化缺陷锯齿,满足诊断图像质量要求。

FPGA 布局布线后,最终消耗组合自适应查找表(Combinational Adaptive Look-Up Tables)771 个,专用逻辑寄存器(Dedicated Logic Registers)721 个。运行时钟频率上限 180.25 MHz,实际要求运行频率为 80 MHz,满足系

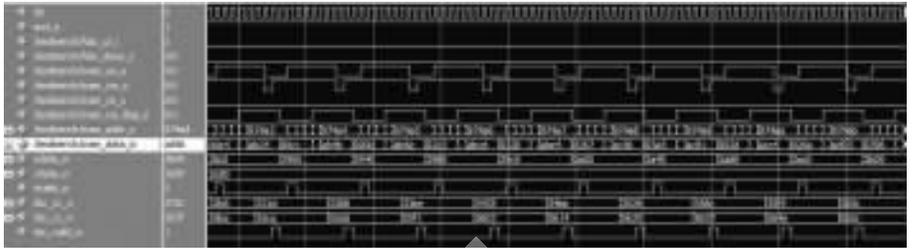


图 6 DSC 系统仿真图



图 7 超声原始图像



图 8 DSC 变换后图像

统资源与运行速度的要求。

本文在分析 B 超数字坐标变换基础上,确定了 CORDIC 计算和双线性插值的设计思路,并结合实际应用在 FPGA 中进行了仿真和实现。本设计具有结构简单、运行速度快的优点,能很好地满足项目应用要求。

参考文献

- [1] 冯若.超声诊断设备原理与设计[M].北京:中国医药科技出版社,1993.
- [2] 刘斌,侯金睿. B 超中的数字扫描变换器[J].中国医学装备,2005,2(11):30-31.
- [3] 陈宝平,赵俊岚.双线性插值算法的一种快速实现方式[J].北京电子科技学院学报,2004,12(4):21-23.
- [4] PHATAK S. Double step branching CORDIC: a new algorithm for ast sine and cosine generation[J]. IEEE Transaction on Computers, 1998,47(5):587-602.
- [5] Juang Tso-Bing, Lin Hsiu-Feng. CORDIC algorithm for vectoring mode without constant scaling factors[J]. Electronics Letters, 1999,35(12):971-972.

(收稿日期:2013-03-29)

作者简介:

彭勇,男,1985 年生,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式系统技术。

陈菲,女,1974 年生,副教授,硕士生导师,主要研究方向:嵌入式系统技术。

董万利,男,1981 年生,硕士研究生,讲师,主要研究方向:嵌入式系统技术。

《微型机与应用》2013 年 第 32 卷 第 12 期