

文章编号: 1672-2892(2011)01-0078-05

## 一种基于 FPGA 的图像观瞄系统消像旋设计

冉欢欢<sup>1</sup>, 刘建高<sup>2</sup>, 高升久<sup>1</sup>, 黄自力<sup>1</sup>

(1.西南技术物理研究所, 四川 成都 610041; 2.电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要:** 针对现代武器观瞄系统显示图像旋转干扰操作手瞄准的问题, 提出了一种基于 FPGA 的消像旋设计方案。该方案根据从平台姿态传感器获得的旋转姿态信息, 对显示图像进行反向旋转, 从而消除显示图像的旋转, 方便操作手瞄准。该方案同时扩展了无极变焦功能, 解决了操杆与显示分辨率不一致的问题, 提高了武器观瞄系统的瞄准精确度。

**关键词:** 消像旋; 无极变焦; 现场可编程门阵列; 图像观瞄系统

**中图分类号:** TN911.73; TP391

**文献标识码:** A

## A design for eliminating display rotation of image-watching-aiming-system based on FPGA

RAN Huan-huan<sup>1</sup>, LIU JIAN-gao<sup>2</sup>, GAO Sheng-jiu<sup>1</sup>, HUANG Zi-li<sup>1</sup>

(1.Southwest Institute of Technology Physics, Chengdu Sichuan 610041, China; 2.College of Optic-Eletric & Information, UESTC, Chengdu Sichuan 610054, China)

**Abstract:** To tackle with the problem that the rotation of displaying image disturbs the operator in modern weapon aiming system, this article proposes a kind of design for eliminating display rotation of image-watching-aiming-system based on Field Programmable Gate Array(FPGA). This scheme obtains rotation carriage information from the plat roof carriage sensor, rotates the displaying image reversely, eliminates the rotation of displaying image, and conveniences the aiming of operators. This scheme also expands the ability of changeable focus successively, solves the inconsistency of resolution ratio between the displaying and the operational stick, and improves the perfect precision of aiming.

**Key words:** eliminating display rotation; successive changeable focus; Field Programmable Gate Array; image-watching-aiming-system

随着图像精确观瞄/制导技术的发展, 越来越多的机动平台如: 飞机、坦克配备了图像观瞄系统。由于机动平台本身的运动, 操作手在观瞄的时候, 看到图像处在不断的平动、膨胀及旋转运动中, 瞄准难度大<sup>[1]</sup>。在使用机载远程图像精确制导武器时, 操作员在锁定目标过程中, 即便一个像素的偏差也可能导致武器跟踪上错误的目标。消除图像的旋转, 一方面可以提高操作手锁定目标的精确度; 另一方面可以提高锁定速度, 减少武器平台本身的危险。目前, 武器操纵杆的方向分辨能力一般为 500 个单位, 小于电视画面的横向像素分辨能力, 与图像传感器的分辨能力不一致。因此无极变焦成为了许多观瞄系统的设计需求。针对图像消像旋的应用需求<sup>[2-3]</sup>, 文献[4]中提供了一种基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)+数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)的消像旋解决方案, 该方案在接收到图像后, 先进行 2×4 倍的硬件插值处理, 再用最近邻插值法进行显示, 采用了多达 8 片 SRAM 的硬件缓存结构, 大大增加了观瞄系统的体积和功耗。为了在不增加观瞄系统体积和功耗条件下, 进一步提高武器平台观瞄系统的瞄准精确度, 本文提出了一种基于 FPGA 的图像显示消像旋方案, 该方案针对逐行倒相扫描(Phase Alternating Line, PAL)制电视图像的特点, 对旋转坐标公式进行了校正, 并且针对 FPGA 资源的特点对运算结构进行优化, 占用资源少, 便于集成和升级。与文献[4]不同, 该方案先对 PAL 制电视图像进行存储, 在显示图像时, 依据当前显示点的坐标实时获取与原始图像最近的 4 个点进行线性插值运算, 显示效果与先进行 128×256 倍硬件插值再进行最近邻插值的方法相同。该方案还扩展了无极变焦功能, 进一步提高武器观瞄系

统的瞄准精确度,同时该方案已经过 ALTERA 公司的 EP2S90F1020I4 以及 EP3SE110F1152 的芯片平台的验证,具有很高的可靠性与适应性。

## 1 电视图像消像旋原理

以 PAL 制电视图像的中心(360,288)为坐标原点,横向为  $X$  轴,右方向为  $X$  轴正方向;纵向为  $Y$  轴,下方向为  $Y$  轴正方向,建立直角坐标系(如图 1 所示)。假设当前显示坐标为  $(x',y')$ ,对应于原始图像坐标  $(x,y)$ ,2 点连坐标原点形成的夹角为  $\theta$ ,则原始图像点的矢量表示为:  $x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$  (其中  $\mathbf{i}, \mathbf{j}$  分别为  $X$  轴、 $Y$  轴的单位矢量),旋转后的图像点(即当前显示的坐标点)的矢量表示为:  $x'\mathbf{i} + y'\mathbf{j}$ 。则:

$$x'\mathbf{i} + y'\mathbf{j} = [x \cos \theta - y \sin \theta]\mathbf{i} + [y \cos \theta + x \sin \theta]\mathbf{j} \quad (1)$$

由式(1)<sup>[5-6]</sup>可得旋转坐标式为:

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

在已知  $(x',y')$  的条件下

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (3)$$

由于在 PAL 制式的电视图像中,长宽比为 4:3,1 行像素个数为 720,1 列像素个数为 576 个,据此可以计算得到像素的左右间距与上下间距的比值为 3.2:3,并不完全相等,直接使用式(3)的结果将会使旋转之后的图像发生扭曲。在实际运算中,需先将像素位置坐标进行归一化,旋转完成后再进行反归一化。修正后的旋转坐标计算方法如式(4)所示。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \frac{3}{3.2} \sin \theta \\ -\frac{3.2}{3} \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (4)$$

在实际的应用当中,消像旋往往需要与电子变焦相结合,电子变焦的功能可以通过在式(4)的右边乘以一个比例因子  $k$  得到如式(5)所示的表达式。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = k \begin{bmatrix} \cos \theta & \frac{3}{3.2} \sin \theta \\ -\frac{3.2}{3} \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (5)$$

当由式(5)计算所得的结果是整数时,当前显示点  $(x',y')$  的图像数据可以由原始图像  $(x,y)$  的数据直接得到,当式(5)计算的结果不是整数时,  $(x',y')$  的图像数据可以通过邻近 4 个点的灰度数据经过插值得到。通常采用如式(6)的双线性插值方法。

$$w = (1-q, q) \begin{bmatrix} w_0 & w_1 \\ w_2 & w_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1-p \\ p \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中:  $w$  是插值计算的结果;  $1-q, q, 1-p, p$  为插值系数;  $w_0, w_1, w_2, w_3$  为邻近 4 个像素点的灰度值,下文对其取值有详细描述。

## 2 FPGA 实现方案设计

本文所设计的实现方案框图如图 2 所示。其中操控模块(Dominate module)照箭头 1 所示接收上位机的指令,为旋转坐标运算模块(CORDIC module)提供所需的角度数值,旋转坐标转换模块(Coordinate rotary module)、存储

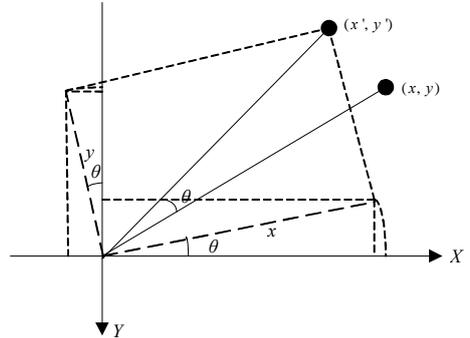


Fig.1 Illustration for decomposed calculating of coordinate rotation  
图 1 旋转坐标分解计算图示

控制模块(Memory control model)以及插值模块(Insert data model)是按帧转移或场转移的方式工作。旋转坐标运算(CORDIC)模块,根据由操控模块提供的旋转角度值 $\theta$ ,计算出坐标转换所需的 $\sin \theta, \cos \theta$ 值。箭头 2 输入的是当前显示像素坐标,输入电视图像灰度值以及对应的像素坐标。旋转坐标运算模块根据当前显示像素位置坐标计算出在旋转前图像中的位置参数,参数的整数部分提供给存储控制模块,小数部分提供给插值模块。存储控制模块一方面根据外部的图像数据流的像素坐标将输入数字电视图像的灰度值存放在一片静态 RAM 中;另一方面根据坐标转换模块提供坐标 $(X'', Y'')$ ,以 4 倍于存储的速度依次将坐标为 $(X'', Y''), (X''+1, Y''), (X'', Y''+1)$ 和 $(X''+1, Y''+1)$ 的亮度数据从另一片静态 RAM 中读出,送给插值模块,且 2 片 RAM 的读写操作交替进行。插值模块根据像素点坐标位置的小数部分以及存储模块所提供的数据进行双线性插值,从箭头 3 处输出当前显示像素的灰度值。

在电视图像中奇场图像的位置比偶场高 1 行,为了便于坐标旋转计算,将奇偶场的像素位置进行统一编址:奇场的行地址的最低位添 0,偶场的行地址最低位添 1。再将原始图像左上角为原点的坐标系平移,使得坐标系原点居于图像正中,各像素点坐标出现如式(7)的转换:

$$\begin{cases} (x, y) = (X - 360, Y - 288) \\ (x', y') = (X' - 360, Y' - 288) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $X, Y$ 为原始图像中像素点坐标原点在图像左上角坐标系中的坐标; $X', Y'$ 为显示图像中像素点坐标原点在图像左上角坐标系中的坐标。在图像旋转像素点位置时,先根据 $(X', Y')$ 计算 $(x', y')$ ,然后根据式(5)计算出 $(x, y)$ ,最后根据式(7)计算出 $(X, Y)$ 。

在 FPGA 内部进行定点运算要比浮点运算方便得多,而定点运算的精确度不如浮点运算,设计的时候需要采取一定的措施来保证足够的精确度。以图像中心为原点, PAL 制图像的归一化前坐标范围 $x$ 轴 $(-360, 359)$ , $y$ 轴 $(-288, 287)$ 可以使用 10 位有符号数表示,为保证在插值运算时的精确度, $x, y$ 与 $\sin \theta, \cos \theta$ 相乘的中间结果用 16 位有符号数保存, $\frac{3.2}{3}$ 用定点数因子 $\frac{546}{512}$ 替代, $\frac{3}{3.2}$ 用因子 $\frac{120}{128}$ 替代,实际的硬件处理为乘以相应的分子后,分别截去末尾的 9 位与 7 位,避免了使用除法硬件结构,节约资源的同时,也提高了计算速度。

图像存储控制模块与 CCD 工作模式相适应,具有 2 种工作模式:场转移模式与帧转移模式。场转移模式时, CCD 每场都生成输出的图像, 2 片 RAM 的读写控制每场切换一次;帧转移模式时, CCD 每次产生一帧图像,分作两场输出,图像存储 RAM 的读写每帧切换一次,由奇偶指示信号 field 的下降沿触发切换操作。存储一帧图像,共有 576 行图像数据,需要 10 位行地址,存储一场数据时,只有 288 行数据,需要 9 位行地址。在帧转移模式时,由于整帧图像进行了统一的编址存储,因此如式(8)所示,可直接使用坐标转换模块产生读取地址与插值因子。

$$\begin{cases} Y'' = \lfloor Y \rfloor \\ \sigma_y = Y - Y'' \end{cases} \quad (8)$$

式中: $Y''$ 为访问物理行地址; $\sigma_y$ 为纵向插值因子,为 8 位有效的小数; $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整因子。在场操作时,奇场相同地址的数据要比偶场的相同地址的数据在位置上高出 1 行。于是,当前显示奇场图像时,用偶场的图像即一帧图像的奇数行图像经过相应的插值计算得出;同样,当前显示偶场图像时,用奇场的图像即上一帧图像的偶数行图像经过相应的插值计算得出。所以显示奇场时,旋转坐标变换时产生的行坐标 $(Y)$ 需要进行如式(9)的处理,才能产生用来访问 RAM 的物理行地址以及相应的插值因子;显示偶场时,行坐标 $(Y)$ 需要进行如式(10)的处理来获取 RAM 访问物理行地址以及相应的插值因子。

$$\begin{cases} Y'' = \lfloor \frac{Y-1}{2} \rfloor \\ q = \sigma_y = \frac{Y-1}{2} - Y'' \end{cases} \quad (9)$$

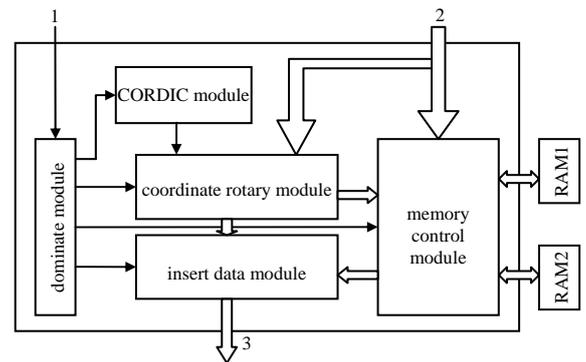


Fig.2 Diagram for eliminating TV-display rotation

图 2 电视消像旋方案设计框图

$$\begin{cases} Y'' = \lfloor \frac{Y'}{2} \rfloor \\ q = \sigma_y = \frac{Y'}{2} - Y'' \end{cases} \quad (10)$$

CCD 帧转移、场转移工作模式,对列坐标没有区别,相应的列坐标运算较为简便,  $X''$  物理列地址及  $\sigma_x$  横向插值因子由式(11)可得:

$$\begin{cases} X'' = \lfloor X \rfloor \\ p = \sigma_x = X - X'' \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\sigma_x$  为 7 位有效的小数;  $\sigma_y$  为 8 位有效的小数。式(6)中,  $w_0, w_1, w_2, w_3$  为  $(X'', Y''), (X''+1, Y''), (X'', Y''+1), (X''+1, Y''+1)$  坐标对应的灰度数值。

### 3 实验结果

FPGA 根据上位机指令,选择图像存储方式,同时根据上位机指令以及奇偶场指示 FIELD 信号,选择旋转计算后  $Y$  坐标的处理方式。在按式(7)进行插值定点运算时,最后得到的结果有 23 位,供视频 DA 输出只需 8 位,直接截去末尾 15 位将出现较大的取舍误差,引起局部的水纹状干扰,因此在视频输出的数据中采取四舍五入处理,缩小取舍误差,消除水纹干扰。

为缩短消像旋/无极变焦的计算延迟,除在 FPGA 内部使用并行运算结构外,还提高了相关运算的计时频率。 $X'', Y'', \sigma_x, \sigma_y$  计算的时钟频率为 108 MHz,计算流水 6 级,式(6)的插值运算时钟频率受 SRAM 访问速度的限制,为 54 MHz,数据访问计算流水 6 级,总计算延迟 166.7 ns,相对于 13.5 MHz 的像素显示刷新速率,相当于 2.25 个像素的延迟。图 3 是模拟 PAL 制电视信号输入观瞄系统后,未经消像旋/电子变焦处理,在监视器上显示画面的照片,图 4 是观瞄系统对原始电视图像经过  $30^\circ$  旋转,并进行  $2 \times 2$  放大的显示图像照片。在实验中,对静止电视画面进行  $360^\circ$  的连续旋转,图像显示效果证明该设计消除了图像边缘显示的锯齿效应、局部的水纹状图像扰动以及旋转中图像景物拉伸扭曲的现象。

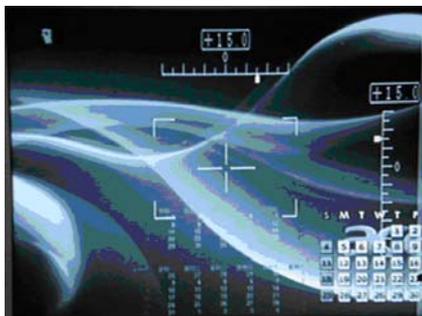


Fig.3 Photo of primal TV display  
图 3 原始图像的显示照片

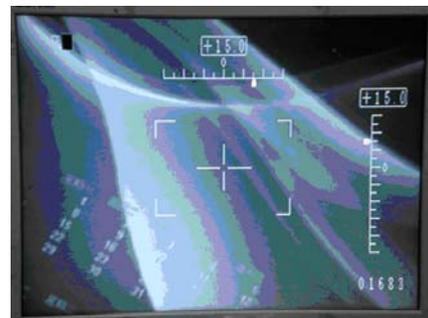


Fig.4 Photo of rotated and amplified TV display  
图 4 旋转放大后的显示照片

### 4 结论

本文针对武器观瞄平台对图像消像旋的需求,利用 FPGA 设计了低成本的图像消像旋方案,并且通过实验验证。该方案利用 FPGA 在并行运算方面的优势,依据当前图像的显示坐标,实时运算当前显示点与原始图像的位置关系,并依据该关系对原始图像进行双线性插值运算,在完成对图像消像旋的同时,扩展了无极变焦功能。由于对原始图像坐标点的运算和双线性插值运算均采用了并行运算的结构,相对于先对图像插值存储后再依据显示点的位置直接读取数据的方案,该方案避免了存储大量图像,在很大程度上减小了图像存储所需的内存,有效降低了图像消像旋系统的体积和成本。同时由于采用了可编程逻辑器件的实现平台,并且占用的逻辑资源较少,该方案可以方便地与其他图像处理功能例如跟踪制导等集成,进一步减小武器观瞄/制导系统的体积和功耗。

#### 参考文献:

- [1] 陈文建,梁庆仟,蒋萧村. 稳瞄惯导周视观瞄镜的设计[J]. 应用光学, 2007,28(5):573-577. (CHEN Wenjian, LIANG Qingqian, JIANG Xiaocun. Design of stabilized panoramic sight with inertial navigation[J]. Journal of Applied Optics,

2007,28(5):573-577.)

- [ 2 ] 许俊泽,胡波,林清. 对数极坐标变换域下互信息图像配准方法[J]. 信息与电子工程, 2009,7(4):289-293. (XUN Jun ze,HU Bo,LIN Qing. Mutual information image registration based on log-polar transform[J]. Information and Electronic Engineering, 2009,7(4):289-293.)
- [ 3 ] 唐钟,赵成绣. 近场多层图图像处理算法[J]. 信息与电子工程, 2007,5(5):374-376. (TANG Zhong,ZHAO Chengxiu. Disposal Arithmetic for Multi-layer LCLV Picture[J]. Information and Electronic Engineering,2007,5(5):374-376.)
- [ 4 ] 刘学智,叶玉堂,高升久,等. 基于 DSP 和 FPGA 的电视观瞄系统设计[J]. 今日电子, 2006(5):74-78. (LIU Xuezhi, YE Yutang,GAO Shengjiu,et al. Design of Display Aim Taking on TV Set System Based on DSP and FPGA[J]. Electronic Producers, 2006(5):74-78.)
- [ 5 ] 张平静. 二维成像系统中消像旋的电子学方法[J]. 红外, 2003(1):7-9.
- [ 6 ] Richard Herveille. Cordic Core Specification[EB/OL]. (2001-11-18)[2010-05-24]. <http://www.opencores.org>.

#### 作者简介:



冉欢欢(1987-),女,四川省雅安市人,在读博士研究生,主要研究方向数字信号处理、无线通信系统.email:ranhuanhuan@sina.com.

刘建高(1979-),男,湖南省邵阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为硬件设计、视频信号处理.

黄自力(1965-),男,重庆市人,博士生导师,主要研究方向为数字信号处理.

高升久(1958-),男,四川省内江市人,研究员,主要研究方向为数字图像处理、嵌入式系统设计.