

A Real-Time Eliminating Image Rotation System Based on FPGA + DSP

CHEN Errui^{1,2}, QIAO Yongming², LIANG Yanbing^{2*}, WANG Chen²,
TIAN Guangyuan², WANG Xianhong²

(1. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;
2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

Abstract: An electronic eliminating rotation method based on mathematic platform is put forward, which can be used on image rotation by carrier perturbation when the video theodolite tracks target on the active pedestal. The hardware system with strapdown inertial navigation equipment, DSP and FPGA, can eliminate rotation and fill the image by reverse rotation and bilinear interpolation. This system developed has successfully applied in minitype shipboard theodolite, can complete the restoration of $720 \times 576 \times 24$ color video image, and achieve frame frequency with 25 frame/s for one fine quality image and less than one pure pixel level of maximum pixel error.

Key words: electronic eliminating rotation; video theodolite; DSP + FPGA; mathematics platform; bilinear interpolation
EEACC: 7220

基于 FPGA + DSP 的实时图像消旋系统

陈二瑞^{1,2}, 乔永明², 梁雁冰^{2*}, 王晨², 田广元², 王鲜红²

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘要: 针对两轴电视经纬仪动基座跟踪目标时, 视轴无法隔离载体扰动造成图像旋转现象, 提出一种基于数学平台的电子消旋方法, 采用捷联式惯导 + DSP + FPGA 的硬件系统通过反向旋转和双线性插值对图像进行消旋和填充, 完成视频恢复, 该系统已成功应用于小型舰载经纬仪上, 可完成 $720 \times 576 \times 24$ 大小彩色视频图像的恢复, 图像质量良好, 输出帧频 25 f/s, 系统自身的输出误差在 1 个象元内。

关键词: 电子消旋; 电视经纬仪; DSP + FPGA; 数学平台; 双线性插值

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)04-0538-05

电视经纬仪是现代化靶场中获取外弹道数据和飞行状态的最基本的测量手段之一。船载电视跟踪仪与陆基电视跟踪仪的主要区别是跟踪测量受到载体运动的干扰。当电视跟踪仪固定在船甲板, 由于船体受浪涌的影响而发生周期性的横摇、纵摇和艏摇运动, 电视跟踪仪视轴也会随船姿与航向变化而变化。电视跟踪仪由水平轴和垂直轴两轴控制系统构成(即方位环和俯仰环), 在目标跟踪过程中可以驱动方位环和俯仰环电机来控制视轴的指向, 但两轴结构的固有缺陷对由船体晃动造成的视轴旋转是无法克服的, 从而造成拍摄的图像产生旋转, 为解决这个问题, 一般有物理平台消旋、光学消旋、电子消旋三种方法。物理平台消旋是将电视跟踪仪直接

放置在常平架上, 光学消旋是通过光学机构补偿像移或控制成像系统的关键部件, 达到消旋的目的。鉴于成本, 这两种方法在实际应用中难以采用。

电子消旋是基于计算机图像处理的稳像技术, 具有体积小、成本低、实现灵活等特点。由于图像处理系统数据量大, 计算复杂, 为现在实时处理, 本文采用 DSP + FPFA 完成图像的消旋处理。

1 图像消旋数学模型

图像消旋系统的数学模型推导过程是先将甲板基座角速度耦合到方位环坐标系, 经过方位环伺服后, 再耦合到俯仰环坐标系, 在考虑两轴伺服的情况下, 得到光轴的旋转角。

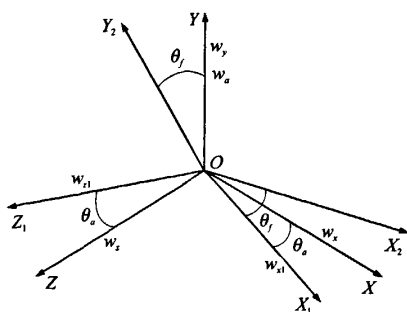


图1 船载平台原理图

如图1所示,甲板坐标系为 (X, Y, Z) ,其中 OX 为船头方向, OY 为与甲板平面垂直的方向, (X_1, Y_1, Z_1) 为方位环坐标系, (X_2, Y_2, Z_2) 为俯仰环坐标系, θ_a 为光轴的方位角, θ_f 为光轴的俯仰角,根据上图可知,摄像机的光轴 OX_2 在坐标系 $OXYZ$ 中位置唯一由 θ_a, θ_f 确定。当甲板有角速度时,此角速度将通过平台环架向台体耦合。

1.1 甲板基座角速度对方位环的耦合

设 w_x, w_y, w_z 为甲板坐标系三个坐标轴的角速度分量,对于船载平台即为横摇角、纵摇角和艏摇角。 w_x, w_y, w_z 将通过 OY 轴的摩擦约束和几何约束耦合给方位环,当 w_y 通过 OY 轴的摩擦力矩驱动方位环时,方位环伺服回路即开始工作把 w_y 隔离掉。此时有

$$\begin{bmatrix} w_{x1} \\ w_y \\ w_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_x \cos \theta_a + w_z \sin \theta_a \\ w_y \\ w_x \cos \theta_a - w_z \sin \theta_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ w_a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_x \cos \theta_a + w_z \sin \theta_a \\ 0 \\ w_x \cos \theta_a - w_z \sin \theta_a \end{bmatrix}$$

1.2 方位角速度对俯仰环的耦合

当俯仰环伺服回路工作时, w_{x1} 将被隔离掉,方位环耦合到俯仰环的角速度,此时有

$$\begin{bmatrix} w_{x2} \\ w_{y2} \\ w_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{x1} \cos \theta_f \\ -w_{x1} \sin \theta_f \\ w_{z1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{x1} \cos \theta_f \\ -w_{x1} \sin \theta_f \\ 0 \end{bmatrix}$$

可见基座角速度的摩擦力约束耦合角速度已经被隔离。

1.3 消旋角模型

由上面的推导可知,台体角速度是几何约束耦合部分所形成的。事实上, w_{z2} 可以且必须通过方位环伺服回路加以消除。由上面的推导可知, $w_{z2} = w'_y = -w_{x1} \sin \theta_f$ 。当通过 w'_y 约束驱动台体转动时, w'_y 就被方位陀螺敏感,于是驱动平台方位环伺服回路使 OY 轴以 w_0 转动,使得

$$w_{z2} = w_0 \cos \theta_f + w'_y = 0$$

根据上式,扰动 w'_y 被隔离掉了,同时可以得到台体

绕 oza 轴转动的角速度为

$w_0 = -w'_y / \cos \theta_f = w_{x1} \tan \theta_f = (w_z \sin \theta_a + w_x \sin \theta_a) \tan \theta_f$
当平台以角速度 w_0 转动时, w_0 沿 OX_2 轴有分量 $w_0 \sin \theta_f$,于是台体沿轴的 OX_2 总角速度 w_{x2} 为

$w_{x2} = w_{x1} \cos \theta_f + w_0 \sin \theta_f = (w_z \sin \theta_a + w_x \cos \theta_a) \sec \theta_f$
这个角速度是无法隔离的,这就是两轴陀螺稳定平台的缺点。其最终将导致目标图像以 $-w_{x2}$ 的角速度旋转。

对这个角速度进行积分,可以得到图像的消旋角 $\theta_{\text{旋转角}}$ 。

$$\theta_{\text{旋转角}} = (\theta_{\text{纵摇角}} \sin \theta_a + \theta_{\text{横摇角}} \cos \theta_a) \sec \theta_f$$

2 系统设计原理

本文采用基于数学平台的电子消旋方法,所谓数学平台是指无论消旋角的计算和FPGA实现图像反转和插值填充算法都是建立在相关数学模型推导的基础上。本系统利用载船上本身具备捷联式惯导系统测量船体的纵横摇姿态,结合电视经纬仪编码器数据解算出消旋角,相比在视轴放置陀螺仪或通过帧间运动矢量预测计算消旋角的方法,可减少系统的硬件成本和软件工作量。

假定给定数字图像 $f(x, y)$,设其绕点(一般为图像的中心点 (x_0, y_0))旋转 θ 角度后得到图像 $f(x', y')$,求其在原图像 $f(x, y)$ 中的对应点 (x, y) 。如下式所示

$$\begin{cases} x' = (x - x_0) \cos \theta + (y - y_0) \sin \theta + x_0 \\ y' = -(x - x_0) \sin \theta + (y - y_0) \cos \theta + y_0 \end{cases}$$

由于坐标是整数,而 $\cos \theta$ 和 $\sin \theta$ 都是小于1的浮点数,为避免出现空像素,采用反向旋转算法。先给定旋转后图像 $f(x', y')$ 中的坐标点 (x', y') ,求其在原图像 $f(x, y)$ 中的对应点坐标 (x, y) 。如下式所示

$$\begin{cases} x = (x' - x_0) \cos \theta - (y' - y_0) \sin \theta + x_0 \\ y = (x' - x_0) \sin \theta + (y' - y_0) \cos \theta + y_0 \end{cases}$$

由于不是一对一的像素映射关系,计算出来的原像素点往往不是整数,而是处于相邻的4个原像素点之间的小数,采用重采样方法来解决计算中出现的小数坐标像素的像素值。重采样的像素灰度是根据它周围原像素的灰度按照一定的权函数内插出的。根据图像重建理论,常用的重采样方法有以下三种:最近邻插值、双线性插值和三次卷积插值法。将这三种插值方法分别用vc++编程进行仿真,最近邻插值效果较差,边缘出现锯齿;三次卷积算法复杂,计算时间较长;双线性插值具有放锯齿效果,创造出来的图像锯齿难以察觉,有平滑的边缘,且实

现简单,计算效率高,运行速度快。因此,采用双线性插值法,该方法内插精度较高。插值算法如下式所示。

$$f(x,y)=[f(1,0)-f(0,0)]x+[f(0,1)-f(0,0)]y+ \\ [f(1,1)-f(1,0)-f(0,1)+f(0,0)]xy+f(0,0)$$

式中 $f(0,0)$ $f(0,1)$ $f(1,0)$ $f(1,1)$ 分别为其周围四点像素的灰度值。

分析车载摄像所得到的图像的特点,图像的背景是天空和海水,背景简单,将对应的图像边缘进行延伸,在空白区域填充和各自边缘对应的背景即可,对于水波区域,简单的单像素点延伸的方法使水波失去纹理,造成填充背景的失真。为了实现水波图像的纹理,由于水波图像的纹理是简单可重复的,采用周期取边缘区域的方法来重现水波的纹理。

3 硬件实现原理

图像消旋系统的设计,目前较流行的方法有基于 DSP 的图像消旋系统和基于 FPGA 的图像消旋系统,通过对 DSP 实现消旋算法和插值算法的软件仿真,时间上无法满足实时性的要求,因此,采用了基于 FPGA 的图像消旋系统,但考虑到将来的变动和扩展,也加入 DSP 模块,即基于 FPGA + DSP 的图像消旋系统。系统主要通过 FPGA 完成图像消旋,差值稳像处理,可以满足实时性;DSP 主要完成部分辅助运算,提高了灵活性,可以满足系统将来的扩展。系统框图如图 2 所示,硬件主体由 FPGA 芯片 EP2C35F484C8 和 DSP 芯片 TMS320C6713B 组成。

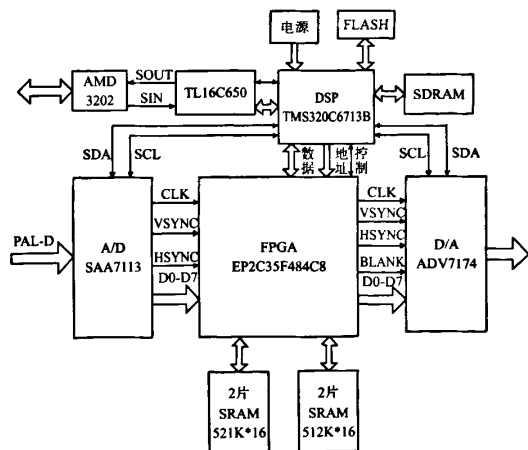


图2 硬件系统框图

3.1 DSP 模块设计

本系统采用的 DSP 芯片 TMS320C6713B 是一款通用浮点数字信号处理芯。DSPD 的功能主要包括两个方面,一是完成角度值的通信与计算。DSP

通过异步串口芯片实现和 PC 机的通信,读取 PC 机计算出来的视频图像的旋转角度值,利用查表法完成角度的正弦、余弦(均为 32 bit)计算,然后通过 16 bit 数据总线向 FPGA 传送消旋角度的正弦、余弦值,其中每个角度值需分四次传送。二是对 A/D、D/A 芯片进行配置。TMS320C6713B 内部集成 IIC 总线主/从模式接口,通过 IIC 总线对 A/D 芯片 SAA7113 和 D/A 芯片 ADV7174 进行寄存器的配置。SAA7113 及 ADV7174 内部有很多寄存器,可根据系统工作时实际图像质量的好坏,对寄存器进行调整。

3.2 FPGA 模块设计

FPGA 模块是整个系统最核心的部分,功能框图如图 3。本系统中,时序控制器模块的设计充分利用了 FPGA 强大的处理复杂时序的功能,接收 A/D 模块传来的 27 MHz 时钟信号作为本系统的时钟信号,为预同步、数据拼接、图像的消旋、插值等模块提供时序控制,并实现数据进出 SRAM 的乒乓操作,时序匹配等。视频图像信号(包括行同步信号,场同步信号,8 位数据信号)进入系统后,首先进行重采样,消除信号传递引起的亚稳态,保证信号的稳定性。然后将横向邻域内的数据两两拼接,8 位的数据信号拼接后生成 16 位的数据信号,再根据有效数据指示和奇偶场指示存到相应的 RAM 中。数据拼接的目的是提高处理速度,且 16 位的存储模式是插值计中所必须的。消旋模块从 SRAM 中读取图像数据,接收 DSP 传来的消旋角度的 sin、cos 值,利用前面所述的消旋算法进行消旋,如果计算结果溢出图像范围,则将结果平移至图像范围内。消旋后的数据进入插值模块,该模块输入为 x 、 y 和四个像素点的灰度值,输出为 $f(x,y)$ 。由于精度需要, x 、 y 都为 9 位小数。

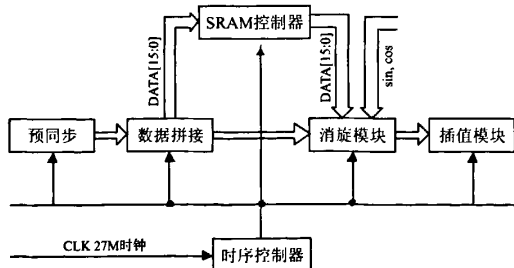


图3 FPGA 功能模块

插值计算需要 4 个像素的数据参与计算,输出为 1 个像素数据。为了满足带宽的需要,必须增加数据宽度或者提高时钟频率。如果倍频,则需要 4 倍频,比较困难。增加数据宽度的方法较为容易,即设法使数据在写入 RAM 之前扩展到 32 位,一次读

出即可参与运算。采用4片SRAM操作,则可使写入SRAM时,奇场数据存入SRAM1,偶场数据存入SRAM2。完成1帧2场的存储后,写操作对SRAM3、SRAM4进行;读操作对SRAM1、SRAM2进行。插值计算需要4邻域的数据,恰恰是相邻2个在奇场、2个在偶场。计算过程全部采用32位补码进行计算。

4 试验结果

该系统在小型舰船四级海况环境下使用,其船体纵横摇角速度最大 $5.5^{\circ}/s$,陀螺数据如图4,可成功的对 $750 \times 576 \times 24$ 大小的彩色视频图像进行消旋处理。消旋角的分辨率可达 $3'$,消旋精度主要受制于惯导系统的输出精度,其电子消旋系统本身的输出误差在1个像元内,不大于 $5''$ 。系统的总功耗低,最大功耗仅为18 W,用12 V/2 A电源即可。

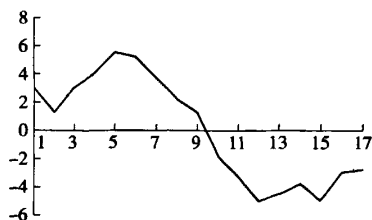


图4 陀螺仪角速度

图5原始图像是利用电视跟踪仪在舰船平台记录的真实海平面图像,图6是消旋但未填充的图像,经过旋转后,有部分图像旋转出画面,空像素点进入画面,影响观测。图7是消旋并填充的图像,虽然边缘的填充略有失真,但像整体的消旋效果良好。



图5 原始图像



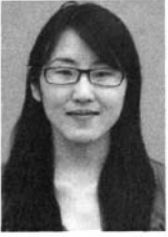
图6 消旋但未填充图像



图6 消旋并填充图像

参考文献:

- [1] Michael Unser, Philippe Thevenaz, Leonid Yaroslavsky. Convolution-Based Interpolation for Fast, High-Quality Rotation of Images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(10): 1371-1381.
- [2] 汪国有, 王岳环, 张天序, 等. 大转角下高质量图像旋转快速算法[J]. 华中科技大学学报, 1999, 27(6): 45-47.
WANG Guo-you, WANG Yue-huan, ZHANG Tian-xu. Fast Algorithm for High-Quality Rotation of Image with Large Rotation Angle [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 1999, 27(6): 45-47.
- [3] 曾祥萍, 杨涛, 等. 实时图像的电子消旋系统[J]. 光电工程, 2005, 32(10): 27-30.
ZENG Xiang-ping, YANG Tao. Electronic System for Real-Time Canceling Image Rotations [J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(10): 27-30.
- [4] 夏宇闻. Verilog 数字系统教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 177-193.
- [5] 王诚, 吴继华, 范丽珍, 等. Alter FPGA/CPLD 设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [6] 李方惠, 王飞, 等. TMS320C6000 系列 DSPs 原理与应用[M]. 第2版. 北京: 电子工业出版社, 2003: 8-11.
- [7] 王凤英. 舰载电视跟踪仪自稳定问题研究[D]. 硕士论文,
- [8] TMS320C6000 Assembly Language Tools User's Guide[S]. Texas Instruments Incorporated, October 2002.
- [9] Cyclone II Device handbook [S]. America Altera Corporation, 2005.



陈二瑞(1984 -),女,硕士研究生,河南省焦作人,西安科技大学毕业,现就读于中国科学院西安光机所控制理论与控制工程专业,研究方向为图像处理和经纬仪电控系统的传感器信号处理等方面的工作,errui@opt.ac.cn;




乔永明(1972 -),男,中国科学院西安光机所,硕士生导师,副研究员,研究方向为自动控制和图像处理等方面的研究,qym@opt.ac.cn;



梁雁冰(1969 -),男,中国科学院西安光机所,硕士生导师,副研究员,担任项目负责人,研究方向为航天器控制,信号处理等方面的研究,lyb@opt.ac.cn。

基于FPGA+DSP的实时图像消旋系统

作者: 陈二瑞, 乔永明, 梁雁冰, 王晨, 田广元, 王鲜红
作者单位: 陈二瑞(中国科学院研究生院, 北京, 100039; 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安, 710119), 乔永明, 梁雁冰, 王晨, 田广元, 王鲜红(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安, 710119)
刊名: 传感技术学报 
英文刊名: CHINESE JOURNAL OF SENSORS AND ACTUATORS
年, 卷(期): 2010, 23(4)
被引用次数: 0次

参考文献(9条)

1. Michael Unser, Philippe Thevenaz, Leonid Yaroslavsky Convolution-Based Interpolation for Fast, High-Quality Rotation of Images 1995(10)
2. 汪国有, 王岳环, 张天序 大转角下高质量图像旋转快速算法[期刊论文]-华中理工大学学报 1999(6)
3. 曾祥萍, 杨涛 实时图像的电子消旋系统[期刊论文]-光电工程 2005(10)
4. 夏宇闻 Verilog数字系统教程 2008
5. 王诚, 吴继华, 范丽珍 AlterFPGA/CPLD设计 2005
6. 李方惠, 王飞 TMS320C6000系列DSPs原理与应用 2003
7. 王凤英 舰载电视跟踪仪自稳定问题研究
8. TMS320C6000 Assembly Language Tools User's Guide 2002
9. Cyclone II Device handbook 2005

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_cgjsxb201004018.aspx

授权使用: 陕西理工学院(sxlgxy), 授权号: 13b44b64-3f21-4258-83db-9df201070e25

下载时间: 2010年9月15日