

文章编号:1007-2780(2014)02-0304-06

机载光电平台实时图像消旋

李 刚*, 张 赫

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:为消除机载光电平台视轴横滚运动导致的视频图像旋转,提出一种基于 FPGA 处理平台的实时图像消旋方法。针对每一帧视频图像,先锁定光电平台惯导系统当前输出横滚角,利用快速图像消旋算法对视频图像进行反向旋转,完成机载光电平台视频图像消旋。整个消旋处理系统仅采用单片 FPGA 实现,能够实现分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$ 任意角度旋转的机载光电平台视频图像 30 frame/s 的实时消旋处理,消旋角度分辨率为 0.1° ,消旋位置误差小于 1 个像素。

关 键 词:机载光电平台;图像消旋;FPGA;电子消旋

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20142902.0304

Real-time image rotation-elimination for airborne photoelectric platform

LI Gang*, ZHANG He

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to remove the video image rotation caused by the thwart spin of the optic axis of the airborne photoelectric platform, a real-time image rotation-elimination method based on FPGA processing hardware is proposed. For each video frame, the rotation angle which is the current output of the INS of the airborne photoelectric platform is locked firstly. Then the video image is rotated reversely using the fast image rotation-elimination algorithm and the video image without rotation is obtained. The entire rotation elimination processing system is realized on a single FPGA chip, and it can remove rotation of any angle for the video image with a resolution of $1\,024 \times 1\,024$ of the airborne photoelectric platform in real-time. It can achieve a processing frame frequency of 30 frame/s with an accuracy of 0.1° and its maximum error is less than one pixel.

Key words: airborne photoelectric platform; image rotation elimination; FPGA; electronic rotation elimination

收稿日期:2013-12-06;修订日期:2013-12-22.

* 通信联系人, E-mail: ligang0431@gmail.com

1 引言

机载光电平台在跟踪拍摄过程中,载机的姿态变化及目标的相对运动会引起光电平台视轴发生横滚运动,导致所摄视频图像产生旋转,给观察者带来困扰,不利于目标观察。为克服这种影响,对旋转视频图像进行消旋处理是十分必要的。

图像消旋的方法^[1]通常包括光学消旋、机械消旋以及电子消旋。光学消旋和机械消旋加工困难,体积较大,结构复杂,需通过伺服系统控制,角度分辨率低。航空机载光电平台对体积、结构、重量要求苛刻,振动、温度变化等因素要求设备具有高可靠性及环境适应性^[2-3]。光学消旋和机械消旋都难以满足机载航空环境要求,而电子消旋体积小、精度高、使用灵活,能够有效克服光学、机械消旋的不足,适用于航空机载光电平台。

机载光电平台视频图像消旋必须具备实时性,能够及时反映目标场景的变化。电子消旋实际上是图像的旋转运算,需要针对图像的每一个像素坐标位置计算其灰度值,运算量大,处理时间长。为实现实时电子消旋,文献[4]将二维的图像旋转变换为三次移位平移运动,利用B样条插值在FPGA上实现,但中间处理步骤多,需要大量的外部存储资源。文献[5-6]利用CORDIC算法实现图像的快速旋转,但算法复杂,耗用硬件资源大,不易实时实现。文献[7]利用DSP实现了一种弹载视频图像的实时消旋方法,其消旋角度分辨率为 0.5° 。文献[8-9]利用DSP+FPGA的硬件架构实现了PAL模拟视频的实时消旋,无法实现分辨率较高的图像的实时处理。本文基于FPGA处理平台,采用快速图像消旋算法实现了分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$ 、帧频为30 frame/s的机载光电平台视频图像的实时电子消旋。

2 快速图像消旋原理

假定原旋转前图像 $f(x, y)$ 中任一点 (x, y) ,绕图像中心 (x_0, y_0) 旋转 θ 角度后对应于旋转后图像 $f(x', y')$ 中的点 (x', y') ,如图1所示。

图像旋转前后像素坐标映射关系如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

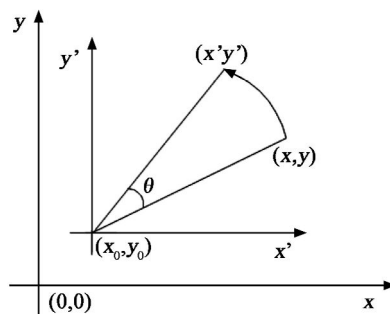


图1 图像旋转后像素移动

Fig. 1 Pixel movement after image rotation

为寻找图像 $f(x', y')$ 中任一点坐标 (x', y') 在图像 $f(x, y)$ 中的坐标 (x, y) ,采用反向旋转方法,对式(1)变形得到:

$$\begin{cases} x = (x' - x_0) \cos \theta - (y' - y_0) \sin \theta + x_0 \\ y = (x' - x_0) \sin \theta - (y' - y_0) \cos \theta + y_0 \end{cases} \quad (2)$$

如果直接通过式(2)计算,每处理一个像素需要做4次乘法运算和8次加/减法运算,运算量极大,难以硬件实时实现。为了寻找快速运算方法,将式(2)展开得到:

$$\begin{cases} x = x' \cos \theta - y' \sin \theta + \phi(x_0, \theta) \\ y = x' \sin \theta + y' \cos \theta + \phi(y_0, \theta) \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} \phi(x_0, \theta) = -x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta + x_0 \\ \phi(y_0, \theta) = -x_0 \sin \theta - y_0 \cos \theta + y_0 \end{cases} \quad (4)$$

在 θ 为固定值的条件下, $\phi(x_0, \theta)$ 和 $\phi(y_0, \theta)$ 以及 $\cos \theta$ 和 $\sin \theta$ 都为常数。由式(3)可知,对于图像 $f(x', y')$ 同一行像素, x' 坐标从左到右每列递增1, y' 坐标不变,对应图像 $f(x, y)$ 的 x 坐标每列递增 $\cos \theta$, y 坐标每列递增 $\sin \theta$ 。同样,对于在图像 $f(x', y')$ 同一列像素, y' 坐标从上到下每行递增1, x' 坐标不变,对应在图像 $f(x, y)$ 的 x 坐标每行递减 $\sin \theta$,而 y 坐标每行递增 $\cos \theta$ 。因此,对于整帧图像 $f(x', y')$,只需计算其第一个像素坐标对应在 $f(x, y)$ 的坐标,剩余像素坐标可通过其相邻像素坐标递推得到,而不用多次乘加运算,计算复杂度低。

通过式(3)计算出来的原像素点坐标值往往不是整数,而是处于相邻4个原像素点之间的小数,通常采用重采样方法解决计算中出现的小数坐标像素的灰度值。重采样的像素灰度是根据其周围像素的灰度按照一定的权函数插值得到。最邻近插值^[10]速度快,便于硬件实现,因此采用该

插值方法得到原像素点灰度值。

3 FPGA 图像消旋系统设计

机载光电平台图像消旋系统结构框图如图 2 所示。

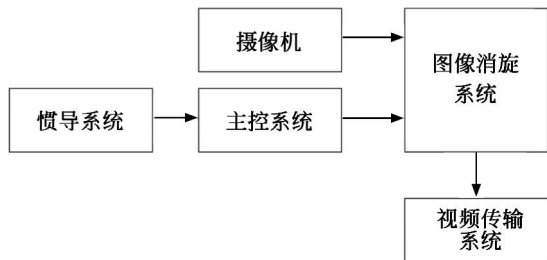


图 2 图像消旋系统结构框图

Fig. 2 Architecture block diagram of the image rotation elimination system

图像消旋系统通过 422 异步串行通信接口接收来自主控系统发送的光电平台惯导系统输出横滚角度,利用该角度值对摄像机输入视频图像进行实时消旋处理,将消旋后的视频图像叠加上光电

平台的各种姿态状态信息,最后将视频图像实时输出至视频传输系统。

图像消旋系统基于 FPGA 处理平台设计,充分利用其强大的处理复杂时序的功能,将图像色彩格式转换、外部 SRAM 读写控制、422 异步串口通信、正余弦值生成、图像消旋输出以及字符信息的叠加等所有功能集成在单芯片上实现,简化了系统结构。FPGA 内部结构设计如图 3 所示。

3.1 消旋角度的获取

机载光电平台主控制系统以 50 Hz 的数据更新率将光电平台的各种姿态状态信息,其中包括光电平台惯导系统输出横滚角度,通过 422 异步串行通信接口发送给图像消旋系统。光电平台惯导系统安装于平台内框架上,其输出横滚角即是图像的消旋角 θ 。图像消旋系统在处理一帧图像时, θ 值应保持不变。因此在开始新一帧图像消旋时,应锁定当前接收到的惯导系统输出横滚角度,从而保证摄像机输出视频图像和惯导系统输出横滚角的同步。选择消旋图像输出时序控制中的帧有效信号 fval_out 作为同步锁定信号,每帧图像锁定一次消旋角度。

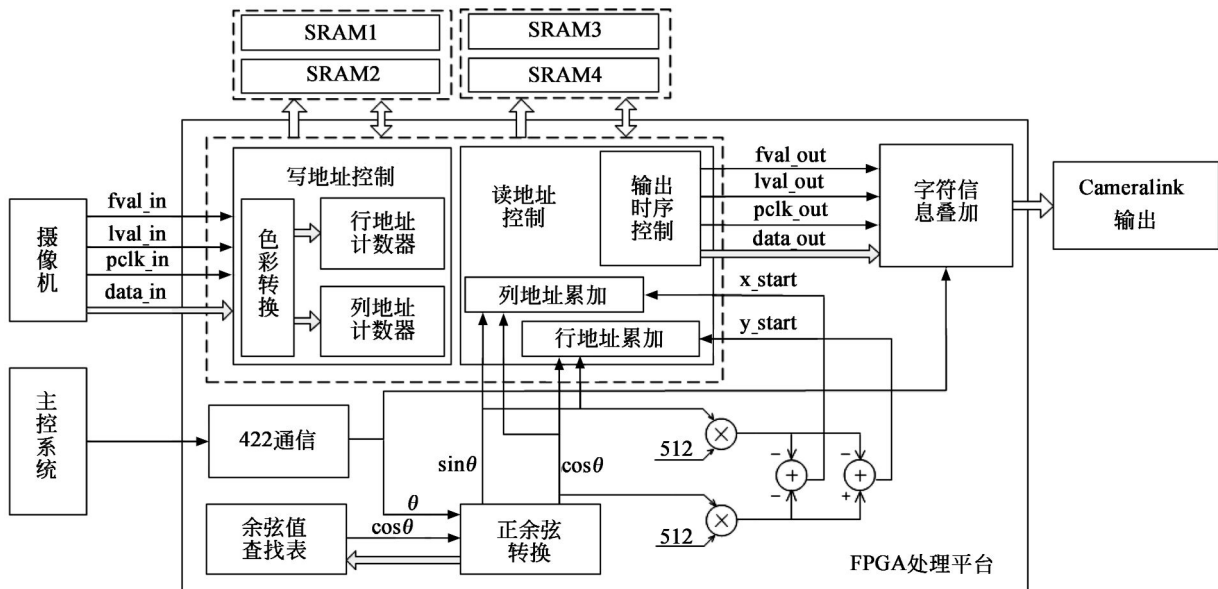


图 3 FPGA 内部结构设计图

Fig. 3 Hardware architecture scheme of FPGA DIS platform

3.2 图像帧缓存

机载光电平台摄像机输出视频图像信号进入系统后,首先进行重新采样,消除信号传递及外部

干扰引起的亚稳态,从而保证信号的稳定性。摄像机输出视频图像色彩格式为 Bayer-8 bit 格式,需要先将其转换为 RGB-24 bit 格式。利用

FPGA内部 FIFO 资源,采用双线性插值进行图像色彩转换^[11-12]。

图像旋转是对图像像素的重新排列,处理当前帧图像的同时,需要对摄像机输入视频图像帧进行缓存。图像旋转过程中需要随机读取任意位置的像素值,因此系统采用 SRAM 完成图像帧缓存。分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$ 的 Bayer 图像,经过色彩转换后一帧图像大小为 $1\text{M} \times 24\text{ bit}$ 。SRAM 选用 Cypress 公司的 CY7C1012AV33,其读写速度达到 8 ns ,单片容量为 $512\text{k} \times 24\text{ bit}$,缓存一帧图像需 2 片 CY7C1012AV33。系统采用 4 片 CY7C1012AV33 构成两组 SRAM 对输入图像进行乒乓读写:一组 SRAM 存储摄像机当前输入图像帧,另一组 SRAM 用于图像消旋输出,两组 SRAM 交替读写。SRAM 写地址通过行列地址计数器控制,读地址通过图像消旋模块计算得到的行列地址控制。两组 SRAM 的数据总线、地址总线及控制总线完全独立。

3.3 图像消旋

图像消旋处理根据图像输出时序控制,计算当前像素坐标对应的 SRAM 读地址,并读取 SRAM 中相应地址处的数据作为当前像素值加以输出,完成图像消旋。

利用快速消旋算法,只需计算每一帧图像的第一个像素对应的 SRAM 读地址,其他像素通过其相邻像素对应的 SRAM 读地址增加/减少 $\cos \theta$ 或 $\sin \theta$ 得到。图像消旋系统接收的是主控系统发送的消旋角度 θ 。为得到 $\cos \theta$ 和 $\sin \theta$,建立余弦值查找表,通过查表直接得到消旋角的正余弦值,简化了系统结构,提高了处理速度。

利用 FPGA 内部 ROM 资源,建立 $0^\circ \sim 90^\circ$ 余弦值查找表,正弦值可通过其余角的余弦值得到。旋转角度分辨率为 0.1° ,由于余弦值都为小数,保留小数点后 3 位,并将其值放大 $1\,024$ 倍,通过一个 10 位的整数存储于 FPGA 内部 ROM 中。

为方便计算,将图像坐标原点 $(0, 0)$ 移至图像中心,计算出原图像对应点像素坐标后,再将原点移回原来位置,得到 SRAM 读地址。针对分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$ 的视频图像,移动原点后图像第一个像素的坐标为 $(-512, 512)$,对应在原图像点像素坐标为:

$$\begin{cases} x_start = -512 \times \cos \theta - 512 \times \sin \theta \\ y_start = -512 \times \sin \theta + 512 \times \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

将原点移回原来位置,得到 SRAM 起始读地址为:

$$\begin{cases} x_read_start = -512 \times \cos \theta - 512 \times \sin \theta + 512 \\ y_read_start = -512 \times \cos \theta + 512 \times \sin \theta + 512 \end{cases} \quad (6)$$

机载光电平台视频图像消旋处理的步骤如下:

- (1) 锁定当前帧消旋角度 θ ,读余弦查找表得到 $\cos \theta$ 及 $\sin \theta$;
- (2) 计算第一个像素对应的 SRAM 读地址,读取 SRAM 相应地址处的像素值并输出;
- (3) 行读地址增加 $\sin \theta$,列读地址增加 $\cos \theta$,读取 SRAM 相应地址处的像素值并输出;
- (4) 判断当前行输出是否结束,若结束转步骤(5),否则转步骤(3);
- (5) 判断当前帧图像输出是否结束,若结束转步骤(8),否则转步骤(6);
- (6) 行读地址增加 $\cos \theta$,列读地址减少 $\sin \theta$,读取 SRAM 相应地址处的像素值并输出;
- (7) 转步骤(3);
- (8) 当前帧图像消旋输出结束,准备输出下一帧图像,转步骤(1)。

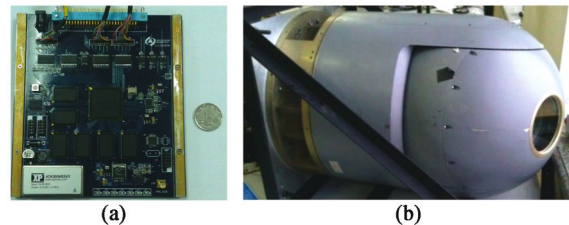


图4 图像消旋板卡及某机载光电平台

Fig. 4 Image rotation-elimination board and the air-borne photoelectric platform

4 实验结果

为验证本方法的有效性,将图像消旋系统与机载光电平台进行联调实验。图 4(a)为图像消旋系统电路板卡,图 4(b)为某机载光电平台。

光电平台横滚轴进行 $0^\circ \sim 360^\circ$ 连续旋转,图像消旋系统将消旋后视频图像通过 Camera-link 接口输出,采集该视频图像至计算机进行显示,如图 5 所示。图像分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$,图 5(a)为原始未消旋图像,图中建筑物倒置。图 5(b)、

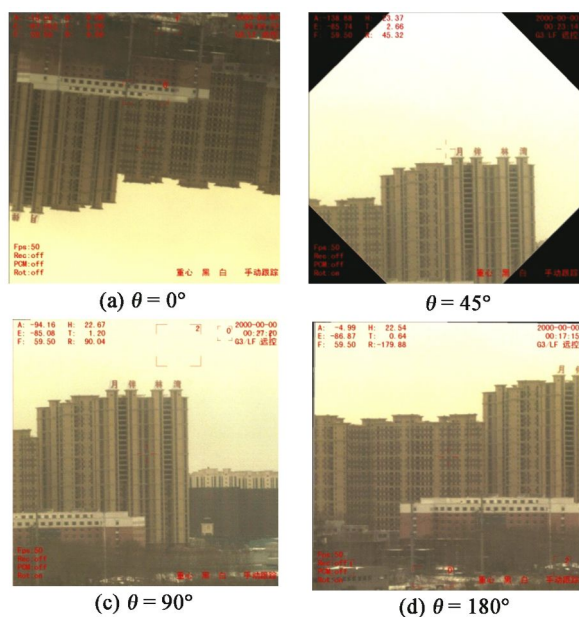


图 5 图像消旋结果

Fig. 5 Results of image rotation-elimination

图 5 (c)、图 5 (d) 为消旋角分别为 45° 、 90° 和 180° 的消旋图像。消旋角分辨率为 0.1° ，图像消旋位置误差小于 1 个像素。消旋后图像中无明显锯齿条纹现象，部分图像旋出画面，在图像边缘处产生空缺像素，当旋转角度为 45° 时，空缺像素最多。可通过图像拼接的方法，利用多帧图像对空缺像素加以填充。

5 结 论

利用快速图像消旋算法，实现了基于 FPGA 处理平台的机载光电平台视频图像实时消旋。消旋系统采用单片 FPGA 实现，能够对任意角度旋转视频图像进行 30 frame/s 的实时消旋处理，无图像滞后，图像消旋角分辨率为 0.1° ，消旋位置误差小于 1 个像素。整个系统体积小，重量轻，性能稳定可靠，已成功用于某机载光电平台。

参 考 文 献:

- [1] 孙莹涛. 舰载实时图像消旋系统设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
Sun Y T. The design of real-time image rotation-elimination system used on ships [D]. Xi'an: Xi'an University of Electric Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [2] 贾平, 张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 82-88.
Jia P, Zhang B. Critical technologies and their development for airborne opto-electronic reconnaissance platforms [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 82-88. (in Chinese)
- [3] 扈宏杰, 王元哲. 机载光电平台的复合补偿控制方法 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1272-1281.
Hu H J, Wang Y Z. Composite compensation control scheme for airborne opto-electronic platform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1272-1281. (in Chinese)
- [4] Berthaud C, Bourennane E, Paindavoine M, et al. Implementation of a real time image rotation using B-spline interpolation on FPGA's board [C]. *Proceedings of International Conference on Image Processing*, Chicago, 1998: 995-999.
- [5] Suchitra S, Lam S K, Calrke C T, et al. Accelerating rotation of high-resolution images [J]. *IEE Proc. -Vis. Image Signal Process*, 2006, 153(6): 815-824.
- [6] Suchitra S, Lam S K, Srikanthan T. Novel schemes for high-throughput image rotation [C]. *Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2004, 2: 1884-1888.
- [7] 钱立志, 王曙光, 张江辉, 等. 一种弹载视频图像实时消旋方法[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(3): 20-29.
Qian L Z, Wang S G, Zhang J H, et al. A real-time despinning method for onboard video image [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(3): 20-29. (in Chinese)
- [8] 陈二瑞, 乔永明, 梁雁冰, 等. 基于 FPGA+DSP 的实时图像消旋系统[J]. 传感技术学报, 2010, 23(4): 538-542.
Chen E R, Qiao Y M, Liang Y B, et al. A real-time eliminating image rotation system based on FPGA+DSP [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(4): 538-542. (in Chinese)
- [9] 李洪伟, 黄自力, 袁斯华, 等. 基于 FPGA/DSP 的数字视频消旋系统设计[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 222-233.

- Li H W, Huang Z L, Yuan S H, *et al.* Design for image rotation-elimination of digital video based on FPGA/DSP [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 222-233. (in Chinese)
- [10] 刘妍. 基于 FPGA 的数字图像实时消像旋的方法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
Liu Y. Study on Real Time Offsetting Digital Image Rotation Based on FPGA [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [11] 王增发, 孙丽娜. CFA 图像实时插值在 FPGA 上的应用 [J]. 液晶与显示, 2013, 28(4): 615-619.
Wang Z F, Sun L N. Application of CFA images interpolation algorithm in FPGA real-time system [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Display, 2013, 28(4): 615-619. (in Chinese)
- [12] 冉峰, 杨辉, 黄舒平. 面阵 CCD 彩色视频图像实时采集系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 273-280.
Ran F, Yang H, Huang S P. Design of real-time color video capture system for area array CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 273-280. (in Chinese)

作者简介: 李刚(1982—), 男, 河南新郑人, 博士, 助理研究员, 主要从事机载光电图像及信号处理方面的研究。E-mail: ligang0431@gmail.com