

基于 MEMS 陀螺仪的实时电子稳像技术

范永杰，陈华

(昆明理工大学理学院, 昆明 650500)

摘要：采用 MPU-6050 MEMS 陀螺仪和 Xilinx FPGA 实现了一套实时电子稳像系统。该系统可对视频序列中的横向、纵向以及旋转方向的非意向运动(抖动)进行有效补偿，并保留操作者的意向运动。针对 PAL 视频时，补偿范围为横向±240 像素，纵向±240 像素，旋转±45°，系统延时小于 20 ms。给出了实现过程、硬件使用情况以及实验效果。

关键词：电子稳像；陀螺仪；MEMS；FPGA

中图分类号：TP751

文献标识码：A

文章编号：1001-8891(2015)09-0724-04

Real-time Video Stabilization System Based on MEMS Gyroscope

FAN Yong-jie, CHEN Hua

(School of science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: A real-time video stabilization system is realized by using MEMS gyroscope (MPU-6050) and Xilinx FPGA. Unwanted camera motion (jitter) in horizontal, vertical, and rotation direction could be compensated, and wanted camera motion by the operator could be reserved. The compensation ranges are ±240 pixels in horizontal and vertical direction, and ±45° in rotation direction for PAL video. Time delay of the system is within 20ms. Implementation process, hardware consumption, and the experimental result are given.

Key words: video stabilization, gyroscope, MEMS, FPGA

0 引言

各种摄像设备(如可见光摄像机、红外热像仪)的工作平台通常都是处于不稳定的状态，诸如手持设备、车载设备、机载设备，甚至一些我们认为稳定的平台也会由于一些外因引起不稳定，例如处于高杆上的监控摄像头，有可能因为强风而产生晃动。工作平台的不稳定，使得摄像设备输出的视频可能会产生随机运动，从而影响观察效果。稳像技术则要克服以上的不利因素，消除视频的抖动，提高视频的观察效果。

稳像技术经历了由机械稳像到光学稳像，再到电子稳像的一个发展过程。传统的机械稳像和光学稳像通常都需要附加一些设备，如机械陀螺、伺服系统、光学元件等，使得稳像系统变的复杂，成本高。常应用于复杂的高精度系统。

电子稳像则利用图像处理技术，使得抖动视频得到稳定。因此电子稳像技术具有操作简易、体积相对较小、成本低、开发周期短、可移植性高、功

耗相对小等优点。电子稳像则常用于精度要求相对较低，但对成本比较敏感的手持设备以及其他一些小型设备^[1-2]。

目前广泛研究的电子稳像技术主要是通过对相邻帧图像的特征进行匹配，再计算出相邻帧的相对位移，继而进行运动补偿^[3]。这种方式虽然排除了传统陀螺仪的使用，但匹配算法通常较为复杂，难以在实时系统中实现。另外，当遇到天空、海洋一类比较纯净的场景时，图像中很难找到可以用于匹配的特征时，这一类算法就有匹配误差加大的风险。

而随着 MEMS 技术的突飞猛进，MEMS 陀螺仪以其体积小(其边长可均小于 5 mm)、重量轻(通常只有几克)、成本低、可靠性好、测量范围大等优点在民用领域得到广泛的应用。因此将 MEMS 陀螺引入到电子稳像技术中，可以在只增加极少量电路板面积的条件下，实时得到精确的平台姿态数据，大幅降低了图像运动补偿算法的复杂度，提高了系统的稳定性^[4]。

收稿日期：2015-03-02；修订日期：2015-04-15。

作者简介：范永杰(1980-)，男，讲师，主要从事夜视与红外技术、光电图像处理以及光电检测方面的研究与教学工作。E-mail：fanyj1980@263.net。

基金项目：省级项目(人培)，编号：KKSY201207066。

本文将介绍利用 MPU-6050 陀螺仪和 FPGA 实现实时电子稳像系统的过程。本系统可补偿横向、纵向以及旋转带来的图像抖动，硬件仅为原理验证，还可大幅简化。

1 MPU-6050 陀螺仪简介

如图 1 所示，MPU-6050 陀螺仪是 InvenSense 公司出品的六轴陀螺仪（三轴角速度计、三轴加速度计）。封装大小 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 0.9\text{ mm}$; $2.375\sim 3.46\text{ V}$ 供电，最大电流 3.9 mA ；角速度计采样率最高可达 8 kHz ；角速度量程可分为 ± 250 、 ± 500 、 ± 1000 和 $\pm 2000^{\circ}/\text{s}$ 四档，均采用 16 bitAD 进行采样，量程约小采样精度越高；利用 I2C 接口进行参数配置以及数据读出，数据率 400 kHz ^[5]。

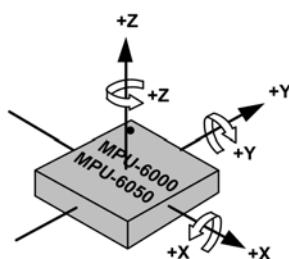


图 1 MPU-6050 角速度计旋转轴方向示意

Fig.1 Orientation of rotation axes of MPU-6050 gyroscope

2 稳像算法简介

电子稳像算法的基本结构主要由全局运动计算、全局运动平滑滤波以及全局运动补偿 3 个部分组成，如图 2。通常工作平台的振动频率远高于操作带来的意向运动频率。算法执行时，首先估计视频的运动矢量，之后利用低通滤波器对运动矢量进行平滑移滤波，分离运动矢量中的意向位移和工作平台的振动；最后对高频振动进行补偿，达到稳定视频的效果^[6-7]。

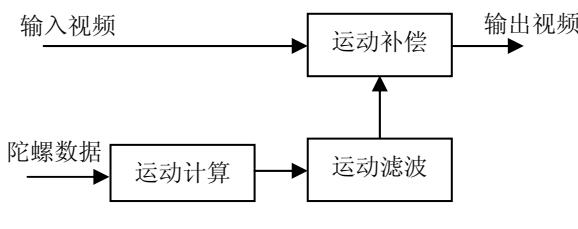


图 2 电子稳像处理结构框图

Fig.2 Processing diagram of video stabilization

在此需要注意如何将角速度转化为图像位移的像素值。由于陀螺仪输出的角速度值 ω ，视频帧周期为 T ，则帧间转动的角度值 θ 为：

$$\theta = \int_{t=0}^T \omega dt \quad (1)$$

若图像像素的瞬时视场为 θ_{FOV} 则在水平或垂直方向上移动的像素值 N 为：

$$N = \theta / \theta_{\text{FOV}} \quad (2)$$

当角速度值转化为像素值后便可按照电子稳像的常规补偿方法进行补偿^[4-5]。图像旋转的补偿则不必转化为像素值，可直接对图像进行反向旋转补偿即可。

3 系统实现

3.1 硬件系统

系统实现主要分为 MPU-6050 模块以及处理电路系统 2 个部分。

如图 3，MPU-6050 模块固定于摄像头之上，可随摄像平台运动，实时获得摄像平台的运动角速度。

处理电路沿用了文献 [8] 中，以 Xilinx XC5VLX50T FPGA 为核心处理器件的通用硬件平台。区别为，从上层的 AD 电路中引出了 MPU-6050 模块所需的 3.3V 电源，以及通信 I2C 总线。

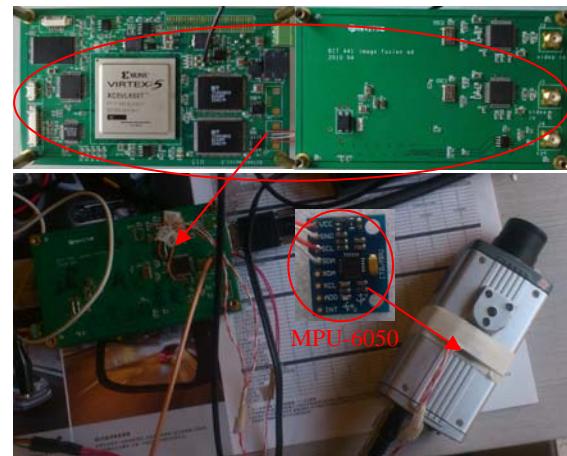


图 3 处理电路及稳像演示系统

Fig.3 Processing circuit and demo system

3.2 处理流程

系统工作流程如图 4。数据的采集包括两个通路：一路由 SAA7113 完成输入 PAL 模拟视频的采集，形成 CCIR656 数字视频，数字视频输入到 FPGA 后，经过 Sram 控制模块，将视频存入 Sram 中；另一路则是由 FPGA 片内软核 MicroBlaze 的 I2C 端口实时的读取 MPU-6050 陀螺的角速度数据，之后将数据送入运动计算模块。

运动计算模块在帧周期内，根据三轴的角速度数据计算当前帧与上一帧之间的横向、纵向以及旋转的差值。于场消隐期起始时，将差值送入运动滤波模块。

运动滤波模块会记录一段时间内的帧间差值，通过滤波区分操作者的意向运动（低频分量）以及摄像平台的抖动（高频分量）。并计算补偿量。将补偿量

于下一场起始前送至运动补偿模块。以 PAL 720×576 帧面为标准, 补偿范围为水平 ± 240 像素, 垂直 ± 240 像素, 旋转 $\pm 45^\circ$ 。

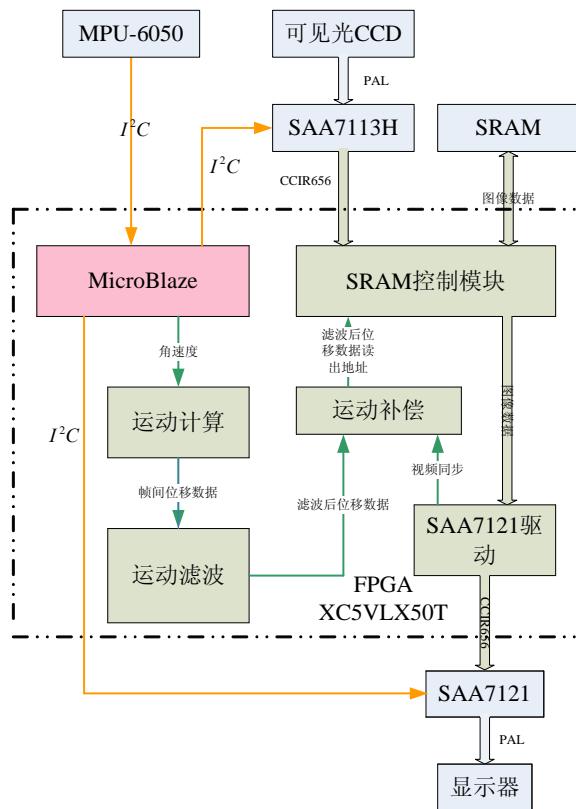


图 4 电子稳像处理流程图

Fig.4 Architecture of processing

运动补偿模块则根据输出视频同步信息以及补偿量, 产生对应的读出地址送至 SRAM 控制器, 读出图像数据, 形成补偿后的视频流用于显示。

系统工作时 MicroBlaze 还用于系统启动时, SAA7113 和 SA7121 的配置。

整个系统有一场的延时。

3.3 资源利用状况

由图 4 可以看出整个系统核心的处理器只需要 MPU-6050, FPGA 以及 Sram 帧存各一片, 电路中的其他资源实际处于空闲状态。若需要处理模拟视频则加入视频 AD/DA, 若处理数字视频可省去 AD/DA。

整个设计完成后, ISE 的综合报告中显示的 FPGA 的资源使用状况为 (限于篇幅仅提供百分比数据) :

Device utilization summary:

Selected Device : 5vlx50tff1136-1

Slice Logic Utilization:

Number of Slice Registers: 26%

Number of Slice LUTs: 25%

Slice Logic Distribution:

Number of LUT Flip Flop pairs used:

Number with an unused Flip Flop: 34%

Number with an unused LUT: 36%

Specific Feature Utilization:

Number of Block RAM/FIFO: 20%

Number of DCM_ADVs: 16%

Number of DSP48Es: 89%

Found area constraint ratio of 100(+5) on block top, actual ratio is 30.

可以看到, 仅 DSP48E 由于需要做滤波运算消耗较多外, 整个设计 FPGA 资源使用还有很大的冗余, 且使用资源中的相当部分是用于 MicroBlaze 处理器的搭建。通过整合算法还可进一步降低 DSP48E 的使用量。这样的资源使用量完全可以用一个小封装的 Spartan6 器件实现, 实际应用的系统可以非常的小巧。

4 试验过程及效果

我们搭建了一个验证演示平台, 如图 5, 摄像头输出的 PAL 视频分为两路, 一路提供给处理电路, 另一路提供给 USB 多路采集卡; 处理电路处理后的 PAL 视频也提供给 USB 多路采集卡, 如此可在 PC 机上同时观察原始视频和稳像后视频。

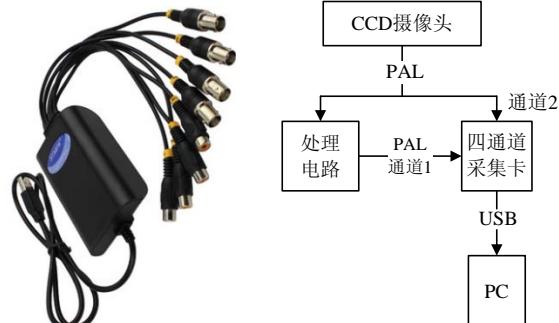


图 5 4路采集卡及试验框图

Fig.5 4 ways video capture card and diagram of experiment

通过对摄像头施加人为随机振动, 在 PC 机上观察稳像的实际效果, 可以看到处理电路能正确计算视频序列的运动, 并通过滤波去除视频中的非意向抖动, 将摄像头的意向运动提取出来, 对横向、纵向以及旋转的抖动进行补偿, 稳定图像。稳定的图像效果, 如图 6。

由于试验用的摄像头为行曝光摄像头, 当抖动过于剧烈时, 此种曝光方式将会带来图像畸变; 当光线不足时, 摄像头需要延长曝光时间, 如此会造成图像产生拖尾。图像畸变和拖尾实际上对各种稳像方法均会造成不利的影响。

本方法暂时还无法对畸变和图像拖尾进行补偿。因此在工况恶劣的环境下需要采用帧曝光摄像头才

能保证成像效果。

同理, 若前端采用热像仪, 非制冷热像仪的积分方式和特性将使其在平台剧烈抖动时造成较大畸变和拖尾, 而制冷热像仪采用全帧积分, 且积分时间较短的特点, 将大大降低畸变和拖尾的影响。

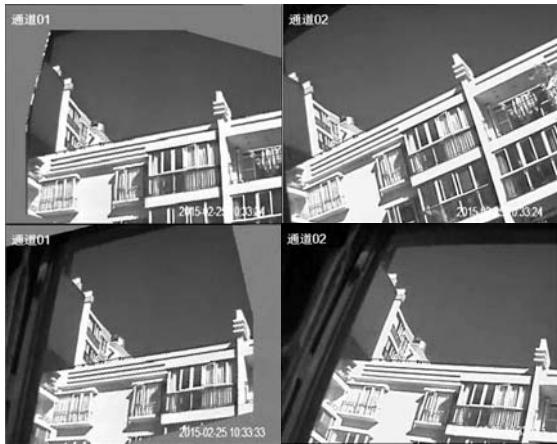


图 6 稳像实验效果

Fig.6 Results of stabilization experiment

5 结论

本文介绍了基于 XC5VLX50T FPGA 和 MPU-6050 MEMS 陀螺仪的嵌入式实时电子稳像系统的开发流程以及实验效果。系统可对图像的横向、纵向以及旋转方向的抖动具有较好的稳定效果。系统按场进

行补偿, 延时小于一帧, 对外围硬件以及 FPGA 的资源需求较小, 并且还可以进一步简化。采用 MEMS 陀螺, 可以避免采用图像匹配一类方法受图像特征的影响, 可将该稳像系统应用于可见光、红外等各种摄像应用中。

参考文献:

- [1] 董立羽, 卜彦龙, 戴斌. 电子稳像技术发展评述[J]. 信息技术与信息化, 2004, 2004(6): 17-20.
- [2] 王志民, 徐晓刚. 电子稳像技术综述[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 470-480
- [3] 吉淑娇, 朱明, 胡汉平. 基于特征点匹配的电子稳像技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 841-849.
- [4] 韩颖, 黄剑侠, 高原. MEMS 陀螺在红外成像系统中的研究应用[J]. 红外技术, 2015, 37(3): 248-257.
- [5] MPU-6000 and MPU-6050 product specification revision 3.4[EB/OL]. [2015-02-15]. <http://www.invensense.com/mems/gyro/mpu6050.html>.
- [6] Touraj Tajbakhsh. Real-time global motion estimation for video stabilization[C]//SPIE, Real-Time Image and Video Processing, 2009, 7244: 72440B1-12.
- [7] Peng Yu-Chun, Lu Meng-Ting, Chen, Homer. DSP implementation of digital image stabilizer[C]//IEEE International Conference on Multimedia and Expo, ICME 2005, 2005: 808-811.
- [8] 范永杰, 金伟其, 李力, 等. 基于 FPGA 的可见光/红外双通道实时视频融合系统[J]. 红外技术, 2011, 33(5): 257-261.

《红外技术》征稿启事

《红外技术》欢迎全国各有关部门专家、科技工作者、管理者等投稿, 在我刊上发表您的科研成果、工作报告等。来稿要求观点明确, 论据充足, 论述简练, 资料数据反映的情况务求核实准确。

1. 首次投稿的作者登录我刊网站 hwjs.nvir.cn, 注册之后投稿。编辑部不再接收电子邮件或邮寄方式的投稿, 如果文章中有附图, 请提供.jpg 或.tif 格式的图像文件, 所有图片须为作者原创, 不接受扫描、拷贝他人文内图片。

2. 论文书写要点如下:

1) 来稿须包括: 中英文题名, 中英文作者署名, 中英文作者单位, 中英文作者简介及所在地与邮政编码, 中英文摘要, 中英文关键词, 正文, 参考文献, 中英文图题, 中英文表题等。

2) 来稿应论点明确、叙述精练、条理清晰、深入浅出, 以利非本分支学科的读者阅读。突出自己工作的创新点。

3) 摘要应简明扼要地概括正文中的主要信息。采用第三人称的写法, 不用“本文”、“作者”等作主语。英文摘要不宜太短, 一般应控制在 150~200 词之间。关键词限定为 6~8 个。

4) 稿件中引用论点、公式、图、表均需注明参考文献(按文中出现顺序编码, 在右上角用小方括号标出)。正文后则按编码次序依本刊要求的编排格式列出相应的参考文献, 参考文献不得少于 8 篇, 近五年的期刊、会议、学位论文优先。

中文文献同时还需译成英文, 并放于相应的中文文献之后, 即中文文献需中英文对照。

参考文献的编排格式:

[序号] 主要责任者. 题名: 其他题目信息[文献类型标志]. 其他责任人. 版本项. 出版地: 出版者, 出版年, 期刊卷号(期号): 引文页码[引用日期]. 获取和访问路径.

各类型参考文献的著录格式请参考 GB/T 7714-2005: 文后参考文献著录规则。

5) 图、表力求精、简、规范, 图题、表题内容须具有自明性, 以配合文字阐明观点; 公式力求精约, 杜绝公式推导过程。

6) 请勿一稿多投。如果曾投过其他刊物, 请具体说明。

3. 来稿请务必注明作者单位、真实姓名、详细通讯地址、联系方式(电话/手机、传真、E-mail)等, 如有变更请及时通知我们。

4. 可以向我刊推荐 2~3 名本专业的审稿专家。

期刊网站: <http://hwjs.nvir.cn>

电子邮箱: irtek@china.com

邮 编: 650223

电话/传真: (0871) 65105248