

MEMS 谐振器中高增益跨阻放大器设计

谢 勇, 来强涛, 陈 华, 姜 宇, 郭桂良, 阎跃鹏

(中国科学院 微电子技术研究所, 北京 100029)

摘 要: 微机械(MEMS)圆盘谐振器的振荡器具有相位噪声低, 抖动小, 温漂小等特点. 采用 TSMC 0.18 μm CMOS 工艺设计实现了一款用于驱动 MEMS 圆盘谐振器的高增益、低噪声和低功耗跨阻放大器. 该放大器采用低功耗宽带电流预放大和电流电压转换级输入技术, 结合基于 Cherry-Hooper 反相器电压放大的电路结构, 实现了增益、带宽、噪声、低电源电压和动态范围等指标间的折衷, 成功驱动了 MEMS 圆盘谐振器. Spectre 仿真表明, 单端跨阻增益高达 115 dB Ω , -3 dB 带宽超过 500 MHz, 等效输入噪声电流平均值为 25 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 功耗仅为 17.6 mW, 芯片面积(包括所有 PAD)为 620 $\mu\text{m} \times 620 \mu\text{m}$.

关键词: 微机械圆盘谐振器; 电流预放大; Cherry-Hooper 放大器

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)03-0046-04

A High Gain CMOS Transimpedance Amplifier for Disc-Like MEMS Oscillators

XIE Yong, LAI Qiang-tao, CHEN Hua, JIANG Yu, GUO Gui-liang, YAN Yue-peng

(Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Disc-Like MEMS oscillators are compared with quartz crystal oscillator counter parts in terms of phase-noise, jitter, and temperature stability. Base on these characteristics, a high gain, low noise and low power transimpedance amplifier is proposed to implement and driver a Disc-Like MEMS oscillator using TSMC 0.18 μm CMOS technology. Aiming at Disc-Like MEMS oscillators having a parasitic capacitance of 0.5 pF, a low-power broadband current pre-amplifier combined with a current-to-voltage conversion stage and an inverter based wideband Cherry-Hooper amplifier are used to realize the good tradeoff between gain, bandwidth, noise, lower power voltage and dynamic range. Spectre simulation indicate; the single-end transimpedance gain is 115 dB Ω , the -3 dB bandwidth is beyond 500 MHz, the average input equivalent noise current is 25 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$, and the power dissipation is only 17.6 mW, The die size (including all the PADs) is as small as 620 $\mu\text{m} \times 620 \mu\text{m}$.

Key words: Disc-Like MEMS oscillators; current pre-amplifier; Cherry-Hooper amplifier

1 引言

随着电子工业的发展, 高度集成化、小型化、高频率、低功耗是未来无线通信系统发展的必然趋势. 射频收发组件小型化的关键技术瓶颈是振荡器的性能. 目前已知的微机械振荡器中, 电容单晶硅振荡器工作频率高, Q 值大, 稳定度好, 已成为一种可能取代晶振小型化电子系统. 一般而言, 基于压电效应的

振荡器在高频应用中的谐振器等效的串联阻抗在 k Ω 级^[1]. 当前 MEMS 振荡器其构成的电容谐振等效串联阻抗非常高, 这就要求驱动 MEMS 的放大器能够提供足够的增益和带宽.

MEMS 振荡器中跨阻放大器 (Transimpedance Amplifier, TIA) TIA 最常用的拓扑结构为电压-电流反馈, 其改善了带宽并降低了输入参考噪声^[2]. 近年来, 许多增益带宽增强技术不断涌现. 大量的文献

都基于可调节的共源共栅(RGC)拓扑结构,这种结构可以通过降低TIA的输入阻抗,提高电路BW^[3].然而,RGC中输入级引入过多的噪声,不适合低功耗低相位噪声的MEMS振荡器.本文采用宽带电流放大器,可以实现在低功耗下保持大的增益及带宽^[3].基于TSMC 0.18 μm CMOS 技术设计一款应用于微机械圆盘谐振器的TIA.

2 谐振器等效电路参数及系统框架

图1所示为MEMS谐振器结构.包括一个由悬梁支撑的圆盘,两对互相正交的悬浮电极.当悬梁臂上加极化电压 V_p ,输入电极A上加交流电压 v_i ,会产生一个时变静电力迫使圆盘变形,从而圆盘与电极的间距变化,在电极B产生输出电流 i_o . Spectre 仿真结果表明,该电路在149.3 MHz 工作频率下增益为115 dB, -3 dB 带宽为510 MHz,能够起振并进入稳定状态. PCB 板级验证时在直流偏置 V_p 为6 V 时,频谱仪测试结果能够起振.同时,采用ADS对MEMS的等效电路参数进行拟合,最终使得等效的RLC电路模型在Cadence Spectre 电路仿真器中得到了验证.

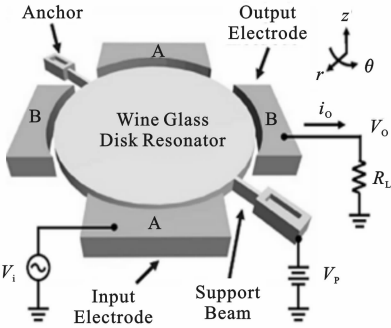


图1 MEMS 圆盘谐振器结构示意图

2.1 谐振器等效电路参数

一般来说,MEMS谐振器是一个用悬梁臂固定的质量块,其运动状态等效为一个二阶弹簧阻尼系统.运动方程可表示为

$$\ddot{X} + \frac{w_o}{Q}\dot{X} + w_o^2 X = f_d/M_X \quad (1)$$

式中, X 为驱动模态方向位移, Q 为品质因子, w_o 为谐振频率, f_d 为静电驱动力, M_X 为静电驱动质量.当电极加上驱动电压,谐振器在 X 轴上轻微运动,静电力就会产生.当加上交流小信号时,静电力就变成正弦信号,式(1)便会有一个稳态解,质量块振荡时与周围电极的容值会周期性变化,并且一直维持下去.其谐振时可以用一个串联的RLC模型来等效.同时考虑电路寄生电容的影响,得到的模型如图2所示.

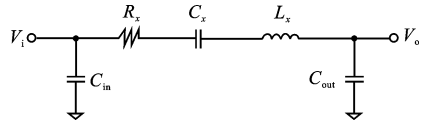
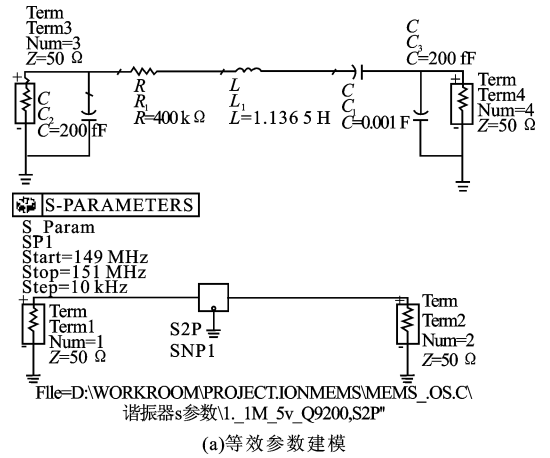


图2 谐振器等效电路参数模型

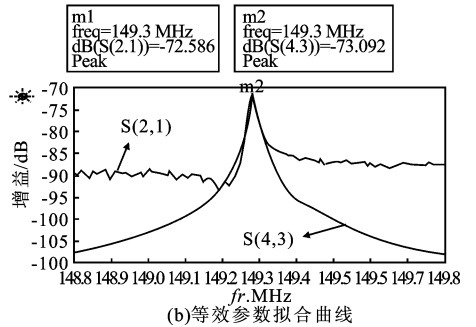
图中, C_{in} 和 C_{out} 是来自电极之间和焊盘的寄生电容.确定谐振器频率的主要是串联的 R_x 、 L_x 、 C_x ,其表达式为

$$R_x = \frac{\sqrt{K_{eff}M_{eff}}}{Q\eta^2}, L_x = \frac{M_{eff}}{\eta^2}, C_x = \frac{\eta^2}{K_{eff}} \quad (2)$$

式中, η 是机电耦合系数, K_{eff} 、 M_{eff} 分别是谐振器的有效刚度和质量.通过测量MEMS谐振器的S参数,采用ADS对谐振器等效电路参数进行拟合,得到的值: $L_x = 1.136 \text{ H}$, $C_x = 1 \text{ aF}$, $R_x = 400 \text{ k}\Omega$. 参数建模及拟合曲线如图3(a)、(b)所示.



(a)等效参数建模



(b)等效参数拟合曲线

图3 等效参数建模及拟合曲线度

2.2 谐振器系统框架

串联MEMS谐振器的整体系统如图4所示.

谐振器起振需要满足巴克豪森准则,即谐振频率处的开环增益大于1(0 dB)和环路相位为零度.从而得到TIA的设计指标:跨阻增益要大于等效动态电阻,即400 k Ω (112 dB Ω);在谐振点处相移为0度,带宽必须大于谐振频率,至少是2倍以上.

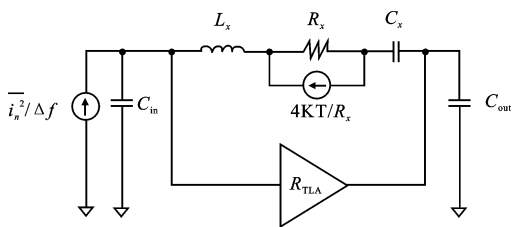


图4 串联 MEMS 谐振器的整体系统框架

3 TIA 电路设计

3.1 核心电路设计

为了实现 TIA 的高增益、高带宽和低功耗要求,电路采用三级结构.第一级为宽带电流放大及电流-电压转换级,第二级为基于改进型 Cherry-Hooper 反相器电压放大级,第三级为共源 (CS) 放大级.核心电路整体结构,如图 5 所示.

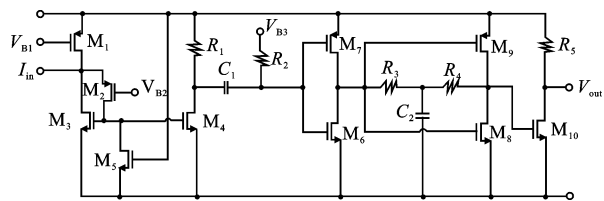


图5 核心电路整体结构

3.1.1 宽带电流放大器

对于整个 TIA 设计,第一级的带宽是相当重要的.由于 MEMS 电路和 CMOS 电路 PAD 寄生电容以及电路引线寄生电阻电容的影响,使得 TIA 的输入端成为主极点.因此,设计电路时应尽量减少输入端阻抗来提高系统带宽.图 5 中 \$M_3\$ 和 \$M_4\$ 构成电流镜,\$M_2\$ 为负反馈管,\$M_5\$ 提供一个电流泄放通路,它们共同构成了宽带电流放大,再通过 \$R_1\$ 将电流转换为电压.其输入阻抗和增益分别为

$$Z_{in} \approx \frac{1 + r_{ds2} [g_{ds5} + s(C_{gs3} + C_{gs4})]}{g_{m3} (1 + g_{m2} r_{ds2}) + Z} \quad (3)$$

$$A_i = \frac{g_{m4} \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot (1 + g_{m2} \cdot r_{ds2})}{Z_2 + r_{ds2} + Z_1 \cdot (1 + g_{m2} \cdot r_{ds2}) (1 + g_{m3} \cdot Z_2)} \approx \frac{g_{m4}}{g_{m3}} \approx \frac{(W/L)_4}{(W/L)_3} = N \quad (4)$$

式中, \$Z = [g_{ds3} + s(C_{in} + C_{gs2})] \cdot [g_{m2} r_{ds2} + s(C_{in} + C_{gs2})]\$

$$Z_1 = \frac{1}{g_{ds1} + g_{ds3} + s(C_{in} + C_{gs2})} \quad (5)$$

$$Z_2 = \frac{1}{g_{ds5} + s(C_{gs3} + C_{gs4})}$$

式中, \$g_{m2}, g_{m3}, g_{m4}\$ 分别为 \$M_2, M_3, M_4\$ 的跨导. \$g_{ds1}, r_{ds2}\$

分别为考虑沟道长度调制效应的参数.由式(3)得到输入阻抗的零点为

$$\omega_z = -\frac{g_{ds5}}{C_{gs3} + C_{gs4}} \quad (6)$$

可以增大 \$g_{ds5}\$,增大 \$M_5\$ 的宽长比,使得上翘点向后移,从而增大增益的平坦度^[4].

3.1.2 改进型 Cherry-Hooper 电压放大器

图 5 中 \$M_6 \sim M_9\$ 以及 \$R_3, R_4, C_2\$ 组成改进型 Cherry Hooper 结构.此结构旨在保证第一级带宽的情况下提高增益^[5]. \$R_2, C_1\$ 为第二级提供了稳定的 \$V_{B3} = V_{DD}/2\$ 的偏置电压.优点是不受前级电路工艺变化的影响.其增益和带宽为

$$\text{Gain} \approx (g_{m6} + g_{m7}) \cdot (R_3 + R_4) \quad (7)$$

$$\text{BW} \approx (g_{m8} + g_{m9}) / (C_{gs10} + C_{ds8} + C_{ds9}) \quad (8)$$

并且,由 \$R_3, R_4, C_2\$ 组成的 T 型结构,形成一个零点,抵消该级的主极点,从而扩宽频带.零点的表达式为

$$\omega_z = \frac{R_3 + R_4}{R_3 R_4 C_2} = \frac{g_3 + g_4}{C_2} \quad (9)$$

3.1.3 共源 (CS) 放大级

\$M_{10}\$ 和 \$R_5\$ 组成共源放大级,起到 buffer 作用,该级电流较大,能驱动较大的负载电容.

3.2 噪声分析

TIA 的输入参考电流噪声是噪声设计的重要指标.主要包括: \$M_1\$ 和 \$M_3\$ 的电流噪声, \$M_4\$ 和负载电阻 \$R_1\$ 的电流噪声以及 \$M_2\$ 和 \$M_5\$ 电流噪声.其总输入参考电流噪声表达式为

$$\overline{i_{in,n}^2} = 4KT\gamma(g_{m1} + g_{m3}) + \frac{4KT\gamma(g_{m2} + g_{m5})g_{m3}^2}{g_{m4}^2} + 4KT\left(\gamma g_{m4} + \frac{1}{R_1}\right) \cdot \left(\frac{g_{m3}}{g_{m4}}\right)^2 \quad (10)$$

减小 \$g_{m1}, g_{m3}\$, 即减小 \$M_1\$ 和 \$M_3\$ 的宽长比,可降低输入参考电流噪声.

4 版图及后仿真

模拟版图的布局布线对于电路性能的影响很大.器件匹配和布局布线的合理性减小前仿和后仿之间的差异.

针对本文中 TIA 核心电路的开环结构,在布线时管子之间走线尽量短,减小寄生效应.特别是缓冲级电路电流较大,一般 1 mA 对应 1 \$\mu\$m 准则确定线的宽度.电阻和晶体管外围采用 dummy 匹配,减小工艺误差. BGR 电路提供核心电路的偏置. TIA 电路版图如图 6 所示.

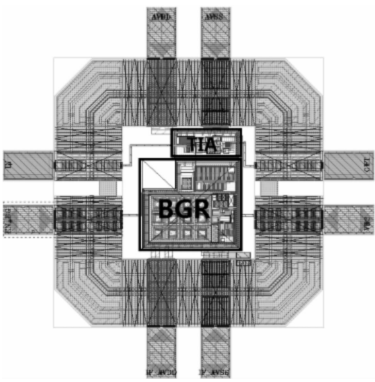


图 6 带 PAD 的 TIA 电路版图

采用 Calibre PEX 对版图进行参数提取,然后仿真,得到的 TIA 的幅频特性如图 7 所示. 谐振器等效参数起振的瞬态波形曲线如图 8 所示. 整体电路的等效输入电流噪声如图 9 所示. 其他仿真参数见表 1.

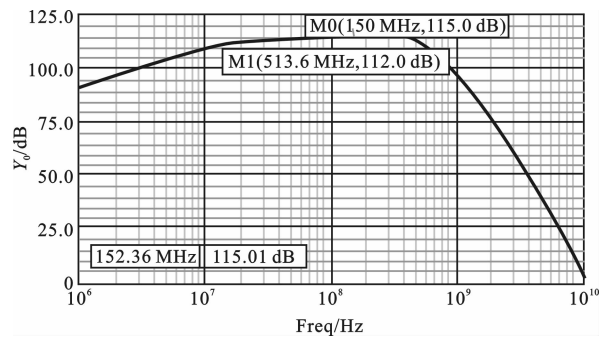


图 7 TIA 的幅频特性

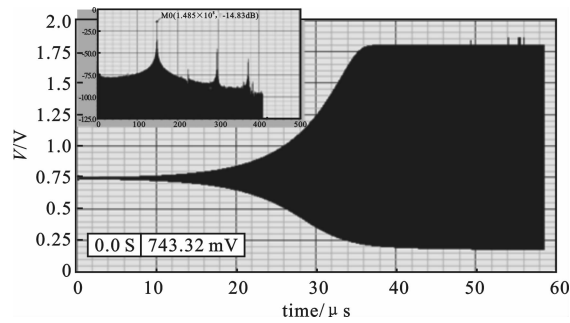


图 8 谐振器等效参数起振的瞬态波形曲线

表 1 本文 TIA 电路的性能参数

TIA 性能	文献[4]	文献[5]	文献[6]	文献[7]	本文
增益/dBΩ	76	99	80	82	115
带宽/MHz	2 500	280	>150	2 400	500
C_{in}/C_{out}	0.5/0.5	2.0/2.0	1.5/1.5	1/1	0.5/0.5
电源电压/V	1.8	1.5	1.8	1.8	1.8
P_{DC}/mW	7.2	1.57	3.6	19.5	17.6
FOM = GBW/ P_{DC} /(GHz · Ω/mW)	2 190	15 894	>417	1 549	15 976

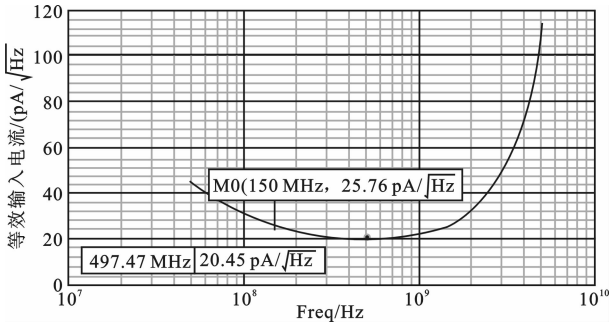


图 9 整体电路的等效输入电流噪声

5 结束语

文中设计了一款针对 MEMS 圆盘谐振器的高增益高带宽 TIA,通过采用宽带电流放大器和改进的 Cherry-Hooper 电压放大结构提高 TIA 的增益和带宽,降低相位噪声. 所设计的 TIA 增益为 115 dBΩ,带宽大于 500 MHz,等效输入参考噪声电流平均值为 25 pA/√Hz,功耗仅为 17.6 mW.

参考文献:

[1] Lavasani H M. Low phase-noise UHF thin-film piezoelectric-on-substrate LBAR oscillators [C] // IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. USA, Arizona, 2008:1012-1015.

[2] Park S M, Yoo H. 1.25 Gb/s regulated cascode CMOS transimpedance amplifier for gigabit ethernet applications [J]. IEEE J. Solid State Circuits, 2004, 39 (1): 112-121.

[3] 韩良,张兴宝,王新胜,等. 跨阻放大器的带宽扩展技术 [J]. 微电子学与计算机,2008,25(12):41-44.

[4] Lavasani H M, Pan W, Harrington B, et al. A 76 dBΩ 1.7 GHz 0.18μm CMOS tunable TIA using broadband pre-amplifier for high frequency lateral MEMS oscillators [J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 2011, 46 (1): 224-235.

[5] Li M H. A 1.57mW 99 dBΩ CMOS transimpedance amplifier for VHF micromechanical reference oscillators [C] // IEEE International Symposium on Circuits & Systems. Korea, Seoul, 2012:209-212.

[6] Lin Y, Lee S, Li S, et al. Series-resonant VHF micro-mechanical resonator reference oscillators [J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 2004, 39 (12): 2477-2491.

[7] Wang Y, Raut R. A 2.4 GHz 82 dBΩ fully differential CMOS transimpedance amplifier for optical receiver based on wide-swing cascade topology [C] // Circuits & Systems iscas iee International Symposium on. Japan, Kobe,

捷联图像导引系统传感器数字复合式稳像方法

方 丹¹, 郭晓冉², 崔少辉¹

(1 军械工程学院 导弹工程系, 河北 石家庄 050003; 2 军械技术研究所, 河北 石家庄 050000)

摘 要: 针对传感器稳像与数字稳像各具优势而又存在不足的问题, 提出了传感器稳像与数字稳像相结合的复合式稳像方法, 实现两种方法之间的优势互补。首先, 利用 SIFT 算法检测图像中的特征点, 并在特征点匹配部分将陀螺数据解算出的像面位移量所指向的匹配点位置作为特征点匹配时的初始搜索位置, 指示当前帧在参考帧中以该匹配点位置为中心的一定大小矩形区域内搜索匹配特征点; 然后, 利用欧式距离最短的几对匹配点在仿射变换模型下计算出帧间变换矩阵; 最后, 利用基于视觉暂留机制的参考帧更新方法, 对每一幅当前帧图像进行重建, 完成视频序列的复合式稳像。实验结果表明, 该方法在保证较高稳像精度的同时, 降低了数字稳像方法的计算量, 提升了运算速度, 可满足捷联图像导引系统对稳像精度及实时性的要求。

关键词: 图像稳定; 传感器稳像; 数字稳像; 复合式

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)03-0050-06

Strapdown Image Homing System Sensor and Digital Compound Image Stabilization

FANG Dan¹, GUO Xiao-ran², CUI Shao-hui¹

(1 Department of Ordnance Engineering, College of Missile Engineering, Shijiazhuang 050003, China;

2 Ordnance Technical Institute, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: For the sensor image stabilization and digital image stabilization each has its advantages and insufficient, a compound image stabilization algorithm is proposed. First of all, the feature points are extracted using SIFT algorithm, and the indicated position by gyro data is made as the center point of initial sourcing position in a certain size rectangular area to search for matching feature points. Then, the interframe transformation matrix under affine transformation model is calculated using the shortest euclidean distance of matching point pairs. Finally, using the reference frame update method based on the mechanism of persistence of vision, each current frame image is reconstruction, and the compound stabilization algorithm is completed. Experimental results show that the compound image stabilization method is reducing the computational method of digital image stabilization and improving the speed of operation, it can meet the requirement for image stabilization precision and real-time performance of the strapdown image guidance system.

Key words: image stabilization; sensor image stabilization; digital image stabilization; compound

1 引言

传感器稳像方法具有运算速度快、实时性好的优点, 但是在稳像精度上受陀螺精度的限制^[1-3], 而

基于 SIFT 的数字稳像方法虽然可以达到很高的稳像精度, 但是其计算量较大^[4-6], 不能满足捷联图像导引系统对实时性的要求。本文结合传感器稳像方法与基于 SIFT 的数字稳像方法各自的优势, 提出了

理时间最长,并且远高于传感器稳像方法,几乎不能满足捷联图像导引系统对实时性的要求;传感器稳像方法中的平均处理时间最短,而复合式稳像方法的单帧平均处理时间介于二者之间,相对 SIFT 算法下降了大约 1/3,尽管仍远高于传感器稳像方法,但其在捷联导引系统强大的并行 DSP + FPGA 硬件平台上,可满足实时性要求。

表4 单帧平均处理时间 ms

	传感器稳像	SIFT 稳像	复合式稳像
第一组实验	14.541	143.585	96.012
第二组实验	15.344	153.750	100.628
第三组实验	14.836	141.499	93.317
抖动视频	16.131	146.356	96.566

6 结束语

本文结合传感器稳像方法与 SIFT 数字稳像算法各自的优势,提出了一种实时高精度的复合式传感器数字稳像方法.利用 SIFT 算法检测图像中的特征点,并在特征点匹配部分将陀螺数据解算出的像面位移量所指向的匹配点位置作为特征点匹配时的初始搜索位置,指示当前帧在参考帧中以该匹配点位置为中心的一定大小矩形区域内搜索匹配特征点;利用欧式距离最短的几对匹配点在仿射变换模型下计算出帧间变换矩阵,通过基于视觉暂留机制的参考帧更新方法,对每一幅当前帧图像进行重建,完成视频序列的复合式稳像.实验结果表明,在稳像精度上,复合式稳像方法与 SIFT 算法几乎相同,均高于传感器稳像方法;在计算耗时上,复合式稳像高于传感器稳像方法,但相对 SIFT 稳像算法大幅下降,并且在捷联图像导引系统的硬件平台上能够达到实时性的要求.因此,本文提出的复合式稳像是一种实时、高精度的稳像方法,可满足捷联图像导引系统对稳像精度及实时性的要求。

参考文献:

[1] 王鹏,赵跃进,孔令琴,等.改进块匹配宏块的快速传感器电子稳像方法[J].光子学报,2012,41(9):1065-1070.

[2] Zhang Yongxiang, Zhang Weiqong, Zhao Xiaoyu, et al. Study on electronic image stabilization system based on mems gyro [C]// Proceedings of International Conference on Electronic Computer Technology. Singapore, 2009: 641-643.

[3] Wang Peng, Zhao Yuejin, Dong Liquan, et al. A novel small area fast block matching algorithm based on high-accuracy gyro in digital image stabilization [C]// Proceedings of the SPIE Conference. San Diego, 2010: 78501A-1-11.

[4] Yao Shen, Parthasarathy Guturu, Thyagaraju Damarla. Video stabilization using principal component analysis and scale invariant feature transform in particle filter framework[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(3): 1714-1721.

[5] 郭晓冉,崔少辉.局部特征点的鲁棒性数字稳像[J].光电工程,2013,40(5):106-112.

[6] Junlan Yang, Dan Schonfeld, Magdi Mohamed. Robust video stabilization based on particle filter tracking of projected camera motion[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2009, 19(7): 945-954.

[7] 郭晓冉,崔少辉.透视变换模型的 Harris 图像配准[J].微电子学与计算机,2014,31(4):18-22.

作者简介:

方丹男,(1979-),博士,讲师.研究方向为电子稳像、目标检测、识别与跟踪技术.

郭晓冉(通讯作者)男,(1985-),博士研究生.研究方向为电子稳像、目标检测与跟踪技术.

E-mail:vip850522@163.com.

(上接第49页)

作者简介:

谢勇男,(1990-),硕士研究生.研究方向为模拟/射频集成电路设计. E-mail:xieyong@ime.ac.cn.

来强涛男,(1981-),助理研究员.研究方向为模拟/射频集成电路设计.

陈华男,(1984-),博士研究生.研究方向为模拟/射频

集成电路设计.

姜宇男,(1983-),助理研究员.研究方向为模拟/射频集成电路设计.

郭桂良男,(1981-),副研究员.研究方向为模拟/射频集成电路设计.

阎跃鹏男,(1963-),研究员.研究方向为微波/射频集成系统.