

基于 MEMS 工艺的新型高线性压力传感器设计

胡智文

(浙江传媒学院 新媒体学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 基于 MEMS 工艺, 提出了一种球冠形底部固定极板与复合膜可动上极板结合的电容式微机械压力传感器. 改变了经典的上下电极接触过程, 并增加了深刻蚀工艺附加深孔结构, 使传感器几乎完全工作在线性区间. 针对其量程, 分析了复合膜厚度对极板接触状态及线性度的影响, 并利用有限元分析法对结构进行了模拟与验证, 最后给出了工艺流程说明. 该方案可为工作于 100~800 kPa 的汽车胎压监控 (TPMS) 提供一种新的传感器实现方式.

关键词: MEMS 工艺; 接触式; 压力传感器; 复合膜; 高线性度

中图分类号: TN302

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)09-0114-05

Design of a Novel High-linear Pressure Sensor Based on MEMS Fabrication

HU Zhi-wen

(School of New Media, Zhejiang University of Media and Communication, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A MEMS capacitive micromechanical pressure sensor with high linearity is presented, which is based on a fixed spherical cap electrode and a multiple membrane. In this device, the touch process of electrodes starts at the beginning of measuring range, and a structure of hole made by DRIE is added. The novel device can enable a good linearity during the whole measuring range. The analysis of membrane thickness to touch status and linearity is performed, so that the novel structure is verified to be effective. Furthermore, the fabrication process of this device is proposed and introduced. This high-linear micromechanical pressure sensor can provide a good choice to tire pressure monitoring system (TPMS), which will work at the press range of 100 kPa to 800 kPa.

Key words: MEMS fabrication; touch mode; pressure sensor; multiple membranes; high linearity

1 引言

硅基压力传感器的研究已有近 50 年的历史, 基本与集成电路的发展同步, 出现了多种不同工作原理的微机械压力传感器. 压力传感器也因此成为微机械加工技术获得巨大成功的一个杰出代表^[1-4]. 微机械压力传感器可用于汽车工业、生物医学、航空航天及工业控制等各大领域, 仅以汽车工业为例, 人们采用各种压力传感器测量气囊压力、燃油压力、发动机机油压力、进气管道压力及轮胎压力等等^[5]. 在高压力量程应用环境下, 传统方式多为采用压阻式结

构, 而近期的研究进展揭示了电容式微机械压力传感器在这些领域的高度适应性. 目前, 已经出现应用于汽车胎压监控系统 (TPMS) 的微机械电容式压力传感器 (飞思卡尔)^[6].

电容式结构是微传感器的一种典型实现方式, 特别是近十年来深反应离子刻蚀工艺的兴起, 为侧壁陡直的腔体结构加工提供了便利^[7-8]. 由于电容式器件具有较低的温度系数, 没有静态功耗, 同时还具有高灵敏度、无温度开关偏移、结构坚固等特点, 越来越多的电容式压力传感器正在成为研究热点^[9-13]. 由于电容反比于极板间距, 因此电容器件具

收稿日期: 2014-12-01; 修回日期: 2015-01-15

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY13F010006)

有固有的非线性. 在保持传感器多种优势的前提下, 提高器件的线性度, 成为电容式压力传感器的一个重要研究方向.

本文提出一种新的接触式微机械压力传感器, 基于对传统电容式压力传感器压力腔形状的改变, 采用多层复合膜作为可动极板, 使器件在工作区间的初段即可实现压力—电容的线性变化关系, 并在整个量程范围内得到维持.

2 传感器结构与工作原理

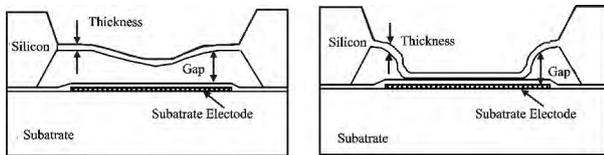
2.1 电容式压力传感器的基本工作原理

微机械电容式压力传感器分为非接触式和接触式两种, 如图 1 所示. 接触式压力传感器的两极板在测量范围内互相接触, 之间由介质层隔离, 当极板发生接触后, 电容值随压力的变化是线性的.

电容式压力传感器的基本原理基于平行板电容器, 如式(1)所示.

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$

式中, C 为电容器的电容值, ϵ 为电介质的介电常数, A 为极板间的正对面积, d 为两极板的间距. 由式(1)可见, 非接触式压力传感器的主要变量为极板间距 d , 故在极板间距与压力成正比的前提下, 压力与电容值成反比. 而接触式压力传感器主要变量为面积 A , 理论上, 变面积的方式能大大提高传感器的线性度. 在实际的传感器中, 由于在可动薄膜接触介质层之前, 电容变化仍然依赖于间距的改变, 从而使传感器的线性工作区间大为降低, 并增加了电容—压力对应关系计算及读出电路设计的难度.



(a) 非接触式 (b) 接触式

图 1 电容式压力传感器的非接触式和接触式结构

2.2 新结构及其工作原理

本文提出的新型接触式微机械压力传感器, 将可动极板的活动空腔部分设计成球冠状结构, 而非传统的梯形结构, 如图 2 所示. 其中黑色粗线为可动薄膜, 为实现电容结构并保护电极, 该薄膜实际可为多层膜结构. 采用图示结构的优势在于: 在合理设计结构形状及尺寸, 适当选择可动薄膜的材料与厚度的前提下, 在传感器受到压力的初始阶段, 薄膜就会

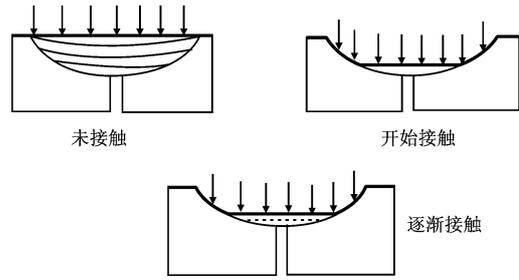


图 2 新型空腔结构及传感器的工作过程

沿腔壁上端开始贴合. 随着压力的增加, 接触面积不断增大, 实现电容随面积的变化. 注意到在接触过程中, 球冠底部仍会产生非线性电容, 我们将底部加工成深孔, 形成极大的极板间距, 则深孔区域的电容可忽略不计. 该结构设计将大大减小非线性电容的影响.

假定球冠最大开口部分圆的半径, 即传感器复合膜半径为 r , 球冠所在球半径为 R , 则 $r = R \cos \theta$, θ 为球冠所处球心到复合膜边缘连线与 r 所成的锐角, H 为球冠底部到复合膜面心的深度, 如图 3 所示.

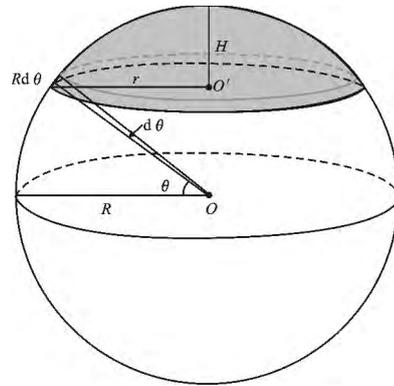


图 3 传感器空腔的几何结构

球冠的面积积分公式如式(2)所示:

$$S = \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} 2\pi r R \cdot d\theta = \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} 2\pi R^2 \cos\theta \cdot d\theta = 2\pi R^2 \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \cdot d\theta = 2\pi R^2 (1 - \sin\theta) = 2\pi R H \quad (2)$$

根据传感器的工作状况, 假设两极开始接触部分至球冠底部的深度为 h , 则复合膜与下极板接触部分的面积 s 如式(3)所示:

$$s = 2\pi R (H - h) \quad (3)$$

结合电容式压力传感器理论, 忽略电介质层因受挤压引起的电致伸缩增强效应^[14], 接触式电容表达式如式(4)所示:

$$C = \int_s \frac{\epsilon_0 \epsilon_i}{d} ds = 2 \frac{\epsilon_0 \epsilon_i}{d} \pi R (H - h) \quad (4)$$

式中, ϵ_0 为真空中的介电常数, ϵ_i 为传感器两导电层之间介质层的相对介电常数, d 为介质层的厚度.

由式(4)可知,求得电容的关键在于求解传感器两极的接触面积,而接触面积的求解,关键在于得到不同压力 P 下复合膜的变形情况. 根据板壳理论,在大变形条件下,膜的形变方程如式(5)所示^[15]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} \\ &= E \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \\ &= \frac{d}{D} \left[\frac{P}{d} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \cdot \right. \\ & \left. \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, D 为弯曲刚度, $D = Ed / [12(1 - \nu^2)]$, ν 为泊松比, E 为杨氏模量, p 为薄膜两面的压力差, w 为 (x, y) 点处的形变量, D 是薄膜厚度, F 为应力函数.

基于上述方程,并结合球冠状边界条件,理论上可得到一定外加压力下的形变和接触面积. 由于在实际计算中,方程组的求解较为复杂,因此拟采用有限元计算方法,来验证所提出结构的合理性与可应用性.

3 仿真与优化设计

为明确设计目标,本文提出的压力传感器,将适用于直接式胎压监控系统,因此传感器的量程范围将限于 100~800 kPa,也就是正常的胎压范围. 采用有限元分析软件 ANSYS 进行建模、施加载荷及求解和后处理,通过分析压强一位移数据,可优化结构参数,得到理想的设计数据.

3.1 结构与材料参数

为保护器件的导电层,我们采取三层复合膜的形式构成可动电极,从上到下分别为二氧化硅、P⁺⁺重掺杂硅和二氧化硅. 而球冠状的下极板,则为 P⁺⁺重掺杂,在实际工艺中,可加二氧化硅保护层. 在进行的有限元分析过程中,材料的杨氏模量、泊松比和密度参数如表 1 所示.

表 1 传感器材料的机械特性

材料	杨氏模/Mpa	泊松比	密度/(kg/m ³)
Si	1.3E+05	0.278	2.3
SiO ₂	7.5E+04	0.170	2.5
P ⁺⁺ 掺杂	1.7E+05	0.220	—

3.2 仿真与分析

采用 20 节点的 SOLID 95 单元来定义传感器的有限元模型,其中圆形复合膜的直径为 600 μm ,下极板开口直径同样为 600 μm ,衬底厚度设 100 μm ,球冠状腔体深度为 30 μm ,根据计算得到球冠所在球半径为 1 485 μm . 作为试验,复合膜 SiO₂/P⁺⁺/SiO₂ 的厚度从上到下依次设为 0.5 μm / 5 μm / 0.5 μm ,在 300 kPa 和 800 kPa 压强下,得到的变形情况如图 4 所示.

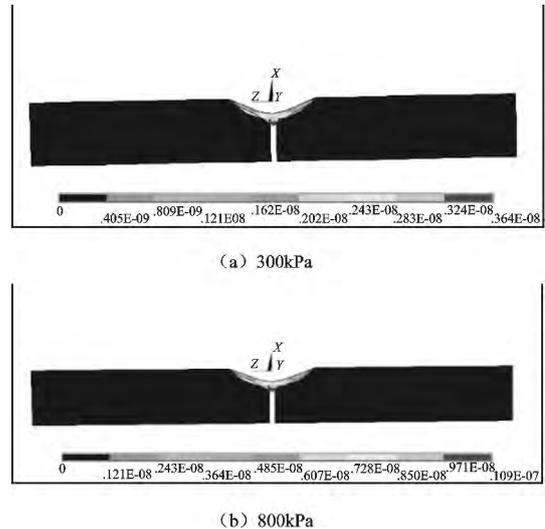


图 4 SiO₂/P⁺⁺/SiO₂ (0.5 μm / 5 μm / 0.5 μm) 薄膜的压强-形变图

其中图 4(a)为施加 300 kPa 压强时的形变图,图 4(b)为施加 800 kPa 压强时的形变图. 当外加压强为 300 kPa 时,复合膜的底部已与腔体底部接触,从具体数值看,复合膜最低点已达到 30 μm 的深度;而接近最大圆周处,并未出现预期的两极板接触现象. 将压强提高至 800 kPa,可看到最大形变处数值的增加,但整个复合膜的形状与 300 kPa 时区别不大. 显然,当前的复合膜厚度参数下,传感器的工作状况更接近于传统的接触式压力传感器,线性度和灵敏度并不理想,且在负载超过 300 kPa 时,器件已处于非正常工作范围.

为得到合适的复合膜参数,经多次试验,我们把 SiO₂/P⁺⁺/SiO₂ 各层的厚度从上到下设为 0.1 μm / 0.5 μm / 0.1 μm ,其他结构参数不变,在 100 kPa 压强下的形变如图 5 所示.

由图 5 可知,在 100 kPa 压强下,复合膜的边沿已开始与球冠边沿接触. 实际上,汽车的胎压低于 200 kPa 则无法正常工作,所以在 100 kPa 时,传感器达到线性工作区间,是完全符合应用需求的.

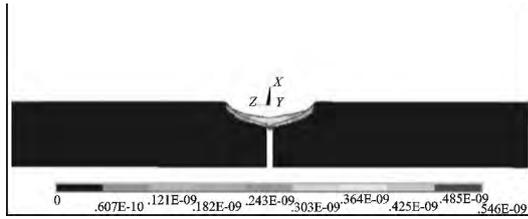
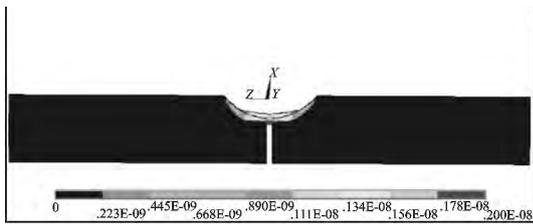
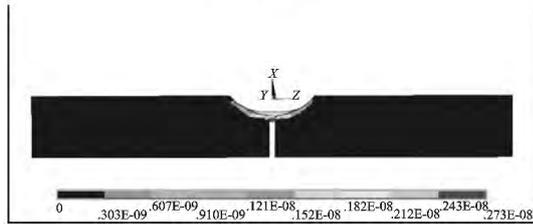


图 5 100 kPa 下 $\text{SiO}_2/\text{P}^{++}/\text{SiO}_2$

($0.1\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}/0.1\mu\text{m}$) 薄膜的压强-形变图
继续增加压力, 可得到在 500 kPa 与 800 kPa
时的形变状况如图 6 所示.



(a) 500kPa



(b) 800kPa

(b)800 kPa

图 6 500/800 kPa 下 $\text{SiO}_2/\text{P}^{++}/\text{SiO}_2$

($0.1\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}/0.1\mu\text{m}$) 薄膜的压强-形变图

其中施加 500 kPa 压强下的复合膜形变如图 6

(a) 所示, 施加 800 kPa 压强下的复合膜形变如图 6 (b) 所示. 从图 6 可以看到, 在所设计的接触式压力传感器量程范围内, 当前复合膜可使器件始终工作在极板接触区间, 且在最大量程处, 复合膜尚未达到与下极板完全接触. 图 5 和图 6 中, 三种负载下复合膜最低点离初始位置距离约为 $5\mu\text{m}$ 、 $18\mu\text{m}$ 和 $24\mu\text{m}$, 处于下极板所形成空间的中间位置, 变形范围在整个量程中较为合理, 达到器件设计的目的和标准.

为验证传感器的线性性能, 对上述结构参数的复合膜从 100 kPa 到 800 kPa, 以 100 kPa 为间隔进行了多次负载仿真, 得到的最大位移如图 7 所示.

根据式(4), 电容 C 与 $(H-h)$ 成正比, 而图 7 中的 C 纵坐标位移数据, 在当前 R 足够大的情况下, 误差范围内与 $(H-h)$ 一致. 图 7 中压强与位移的关系接近线性变化, 特别是在 200~300 kPa 的正常胎压范围内, 线性度更为理想. 显然, 负载压力与电容值的对应关系也同样是线性的. 同时我们也注意到整体曲线并非严格线性, 分析原因, 应与 $(H-h)$ 近似成复合膜最

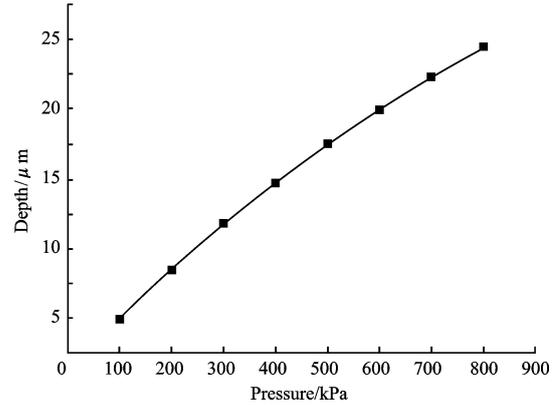


图 7 复合膜最低点的压强-位移图

低点的位移、复合膜的内应力等因素有关. 总体而言, 模拟结论验证了本文提出的新型传感器良好的线性度. 相比非接触式与传统接触式压力传感器, 该器件在全量程范围内的线性度是令人满意的.

4 工艺设计

4.1 下极板制备工艺

下极板的制备工艺如图 8 所示, 包括下列流程:

(1) 准备一块双面抛光的 $\langle 100 \rangle$ 晶向 N 型硅片, 经过标准的清洗工艺并烘干, 接着对该硅片上表面进行深反应离子刻蚀^[7-8], 得到一个半径 $5\mu\text{m}$ 、深度为 $50\mu\text{m}$ 的圆孔.

(2) 在硅片上表面淀积 $1\mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 层, 在后续的研磨工艺中对硅表面起到一定的保护作用.

(3) 利用高精度凹坑仪(如 Dimpler), 把硅片研磨出所在球半径为 $1485\mu\text{m}$ 的球冠, 球冠开口半径为 $300\mu\text{m}$, 形成圆弧状腔体. 然后利用化学机械抛光(CMP)方法, 将球冠表面的细微颗粒去除, 确保在误差范围内的表面平滑度.

(4) 经缓冲氢氟酸腐蚀剂(BHF)腐蚀去除硅片上的 SiO_2 并经清洗, 在硅表面进行硼重掺杂, 形成下电极的层.

(5) 用干氧化法形成二氧化硅层, 其厚度为 $2\mu\text{m}$, 用以保护下电极.

4.2 复合膜上极板制备及键合工艺

复合膜上极板的制备及上下极板的键合工艺如图 9 所示, 包括下列流程.

(1) 准备一块双面抛光的 $\langle 100 \rangle$ 晶向 N 型硅片, 经过标准的清洗工艺并烘干, 对其进行硼重掺杂, 形成一层厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 的 P^{++} 掺杂层.

(2) 在掺杂层上利用化学气相淀积, 覆盖一层 $0.1\mu\text{m}$ 厚度的二氧化硅层.

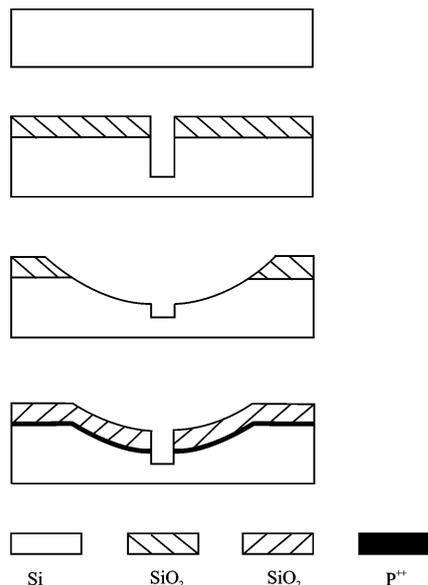


图 8 下电极的制备工艺流程

(3) 将二氧化硅层与下极板接触, 利用键合工艺形成密封腔。

(4) 利用重掺杂自停止腐蚀方法, 去除上极板未掺杂的硅衬底。为突出主体工艺流程, 图 8 和图 9 中省略了对下极板的体硅保护步骤。

(5) 在 P^{++} 层上淀积一层二氧化硅, 厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。至此, 传感器的主要功能结构得以完成。

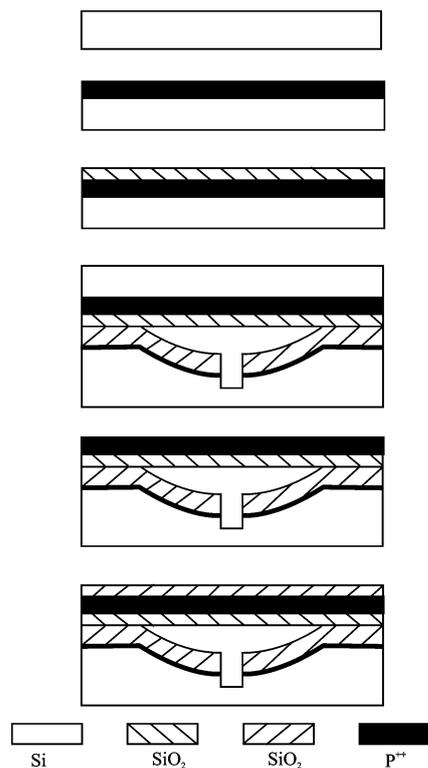


图 9 复合膜的制备及键合工艺流程

5 结束语

基于球冠状空腔结构和复合膜的结合, 提出了一种新的接触式压力传感器设计方案。通过深反应离子刻蚀工艺, 在球冠状下极板底部加工得到深孔, 基本消除了两极板非接触部分电容的影响。本文用有限元分析方法对复合膜的厚度进行试验与优化, 并得到了 $100 \sim 800 \text{ kPa}$ 范围内的复合膜压强—形变关系图。仿真结果表明, 与传统接触式压力传感器中后段线性的特性相比, 该传感器具有全量程范围内良好的线性度, 适用于胎压监控等高压应用领域。本文还给出了新型压力传感器的加工流程, 可为该器件的制备与产业界应用提供有益的参考。

参考文献:

- [1] Ko W H, Wang Q. Touch mode capacitive pressure sensors [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 75(3): 242-251.
- [2] Zhou M X, Huang Q A, Qin M. Modeling, design and fabrication of a triple-layered capacitive pressure sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 117(1): 71-81.
- [3] Bakhoun E G, Cheng M H M. Novel capacitive pressure sensor [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010, 19(3): 443-450.
- [4] Eswaran P, Malarvizhi, S. Sensitivity analysis on MEMS capacitive differential pressure sensor with bossed diaphragm membrane [C]// 2012 International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), Macao, China: IEEE, 2012: 704-707.
- [5] 王淑华. MEMS 传感器现状及应用[J]. 微纳电子技术, 2011, 48(8): 516-522.
- [6] HTM. [EB/OL]. [2014-12-01]. http://www.eet-china.com/ART_8800481835_865371_NP_46b577c3.
- [7] 张鉴, 戚昊琛, 徐栋梁, 等. 一种可用于硅刻蚀工艺模拟的三维表面演化算法[J]. 电子学报, 2011, 39(8): 1869-1872.
- [8] 张鉴, 黄庆安, 李伟华. 一种可用于 Footing 效应模拟的 ICP 刻蚀模型[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(12): 2169-2173.
- [9] Shahiri-Tabarestani M, Ganji B A, Sabbaghi-Nadooshan R. Design and simulation of high sensitive capacitive pressure sensor with slotted diaphragm [C]// 2012 International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE), Penang, Malaysia: IEEE, 2012: 484-489.

(下转第 123 页)

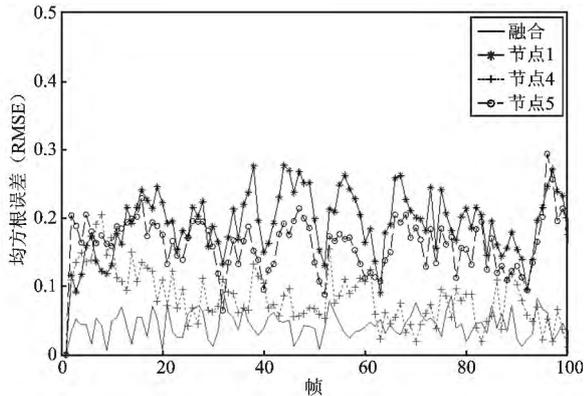


图 11 单节点和多节点融合跟踪误差比较

知算法,可以跟踪效果自动调节测量值,从而获得最优采样量可以以更高的压缩比对图像进行压缩,减少计算以及通信的数据量,结合一种多视频节点数据融合策略,可获得更好的跟踪精度以及更长的网络使用时间.

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Melodia T, Chowdhury K R. A survey on wireless multimedia sensor networks [J]. *Computer Networks*, 2007, 51(4):921-960.
- [2] Bulent Tavli, Kemal Bicakci, Ruken Zilan, et al. A survey of visual sensor network platforms [J]. Published online, Springer Science Business Media, 2011,

- 5(10):458-467.
- [3] Islam T Almkawil, Manel Guerrero Zapata, Jamal N Al-Karaki, et al. Wireless multimedia sensor networks: current trends and future directions [J]. *Sensors*, 2010, 7(8):6662-717.
- [4] Garrett Warnell, Dikpal Reddy. Adaptive rate compressive sensing for background subtraction [J]. *ICASSP*, 2012, 18(6):1477-1480.
- [5] Waheed Bajwa, Jarvis Haupt. Compressive wireless sensing[C]// *IPSN '06 Proceedings of the 5th international conference on Information processing in sensor networks*. Nashville, TN:IEEE, 2012:134-142.
- [6] Xu Jia. Visual tracking via adaptive structural local sparse appearance model[C]// *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE Conference Providence, RI:IEEE, 2012, 1822-1829.
- [7] Kaihua Zhang, LeiZhang. Real-time compressive tracking. [C]// *Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision*, Berlin:Springer, 2012, 864-877.

作者简介:

方武男,(1981-),博士,讲师.研究方向为无线传感器网络与图像处理。E-mail:swmyang@126.com.

王典洪男,(1957-),教授,博士生导师.研究方向为图像处理.

王勇男,(1980-),博士,副教授.研究方向为智能仪器及嵌入式系统应用.

(上接第 118 页)

- [10] Yu H Y, Qin M, Huang J Q, et al. A MEMS capacitive pressure sensor compatible with CMOS process [C]// *2012 IEEE Conference on Sensors*, Taibei, China:IEEE, 2012:1-4.
- [11] Eswaran P, Malarvizhi S. Modeling of MEMS capacitive differential pressure sensor [C]// *2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Nagercoil, India: IEEE, 2013:699-702.
- [12] Xiong J, Li Y, Hong Y, et al. Wireless LTCC-based capacitive pressure sensor for harsh environment [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013 (197):30-37.

- [13] Peng G B, Liu J Q, Wang L F. Circuit design of an implantable MEMS pressure sensor system [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2013, 11(1):90-95.
- [14] 周闵新. 多层膜结构电容式压力传感器及其 CMOS 兼容工艺的研究[D]. 南京:东南大学, 2006.
- [15] 郭强,吕浩杰,胡国清. 新型接触式电容压力传感器 [J]. *仪表技术与传感器*, 2008(3):1-3.

作者简介:

胡智文男,(1975-),博士,副教授.研究方向为传感器及系统研究。Email:sunneyhu@gmail.com.