

智能手机在现代医学应用中的最新进展*

王琳^{1,2} 胡杰^{1,2} 李菲^{2,3} 隗慧林⁴ 李英⁵ 卢天健²
王书崎⁶ 综述 徐峰^{1,2△} 审校

1 (西安交通大学 生命科学与技术学院 生物医学信息工程教育部重点实验室, 西安 710049)

2 (西安交通大学 仿生工程与生物力学中心, 西安 710049)

3 (西安交通大学 理学院 应用化学系, 西安 710049)

4 (罗润生物科技有限公司, 南京 210019)

5 (西安电子科技大学 电子工程学院, 西安 710126)

6 (Brigham and Women's Hospital, Harvard Medical School, Boston 02139)

摘要: 随着智能手机的出现,手机的功能日益丰富,软件、硬件、配件功能不断增强,在人们日常生活中发挥的作用也愈加重要。作为一种新的医疗模式,手机医学应运而生,在辅助医疗诊断、重大疾病检测与筛查,以及资源有限地区实施基本医疗保障等方面具有深远影响,因此其相关科学和技术问题日益受到国内外关注。本文综述了智能手机在医学诊断应用中的最新进展,以期拓展手机医学为全民提供医疗服务的应用领域,促进我国医疗卫生信息化事业的发展,引领我国进入一个新的医疗保健时代。

关键词: 智能手机; 现代医学; 应用; 进展; 即时诊断

中图分类号 R183-5;R51-2 文献标志码 A

DOI:10.7507/1001-5515.20140042

Advances in the Application of Smart Phones in Modern Medicine

WANG Lin^{1,2} HU Jie^{1,2} LI Fei^{2,3} WEI Huilin⁴ LI Ying⁵ LU Tianjian²
WANG Shuqi⁶ XU Feng^{1,2}

1 (The Key Laboratory of Biomedical Information Engineering of Ministry of Education, School of Life Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2 (Bioinspired Engineering and Biomechanics Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3 (Department of Applied Chemistry, School of Science, Xian Jiaotong University, Xian 710049, China)

4 (Lauren Biotechnology Ltd., Nanjing 210019, China)

5 (School of Electronic Engineering, Xidian University, Xian 710126, China)

6 (Brigham and Women's Hospital, Harvard Medical School, Boston, MA 02139, U. S. A)

Abstract: Since smart phones have been developed, significant advances in the function of mobile phone due to the development of software, hardware and accessories have been reached. Till now, smart phones have been engaged in daily life with an increasing impact. As a new medical model, mobile phone medicine is emerging and has found widespread applications in medicine, especially in diagnosing, monitoring and screening various diseases. In addition, mobile phone medical application shows great potential trend to improve healthcare in resource-limited regions due to its advantageous features of portability and information communication capability. Nowadays, the scientific and technological issues related to mobile phone medicine have attracted worldwide attention. In this review, we summarize state-of-the-art advances of mobile phone medicine with focus on its diagnostics applications in order to expand the fields of their applications and promote healthcare informatization.

Key words: Smart phone; Modern medicine; Applications; Advances; Point-of-care testing (POCT)

*高等学校学科创新引智计划项目资助(“111”计划)(B06024);国家重大国际(地区)合作研究项目资助(11120101002);国家自然科学基金海外青年学者合作研究基金资助项目(31050110125);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目;教育部科学技术研究重点(重大)项目(313045);中国博士后科学基金资助项目(2013M532054);中国南方智谷创新团队项目

△通信作者。E-mail: fengxu@mail.xjtu.edu.cn

引言

作为一种可随身携带的基本通讯工具,手机的重要性日益凸显,近年来的发展势头十分迅猛,在日常生活中广泛普及:国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)的最新统计数据 displays,截至 2011 年底,全球手机注册用户约为 60 亿,占世界人口 86%^[1]。特别是融合了大量先进技术(如互联网、个人电脑、摄像头、娱乐终端等综合电子设备)的智能手机(smart phone),凭借其移动性和便携性等特点,可真正意义上实现人人拥有、随时随地网络在线^[2]。除了在信息传输系统中处于核心地位外,手机还兼有录音和摄像功能,不少新兴产业正逐步聚焦手机,手机医学逐渐步入人们的视野,在世界范围内的应用也越来越广泛^[2-4]。

手机医学是顺应社会生活节奏日益加快的趋势而出现的一种崭新的医疗模式。若能充分发掘手机图像、音频和视频等数据采集、处理和传输,以及便于与其他试验装置联用等功能,将其应用于家庭、社区以及偏远地区的医疗诊断和卫生保健,必将为我国医疗行业发展注入新的活力与动力。本文概括总结智能手机及其在医疗诊断、远程医疗和医疗教育中的应用,展望其应用前景,以期使人们在将来的日常生活中可以通过手机更加快速、方便地掌握自身的健康状况,更重要的是为促进我国医疗卫生信息化事业尽早跨入世界先进水平的行列提供新的思路。

1 智能手机与医疗诊断

手机(亦称移动电话)1973 年诞生于美国摩托罗拉公司,1983 年开始商业化,1997 年始出现智能手机概念。相对于传统手机,智能手机的最大特点是更像个人电脑,拥有开放的操作系统,可以支持用户安装相应的硬件和软件,以扩展其功能和应用;而传统手机不能或只能安装一些 JAVA 软件,在操作界面、执行效率、系统管理和功能用途等方面都比智能手机差很多。智能手机可支持无线上网,拥有独立的处理器,极大地方便了用户获取和处理数据信息;除了拥有传统手机的语音和短信功能外,还可通过内置传感器(如摄像头和录音机)采集图像、音频和视频数据,并提供数据处理、显示以及高速无线数据传输(如蓝牙、Wi-Fi)等功能。此外,智能手机还可通过接口等方式与其他数据采集和处理等外源设备相连,如通过 USB 数据线与显微镜和超声探头相

连,实现显微成像和超声检查。随着前端便携式信息采集技术的进步、手机数据处理与存储能力的提高以及高速手机网络的普及,智能手机无疑将为医学诊断提供技术支持^[4],而且其功能还可不断扩展,医学应用前景将十分广阔。

目前,临床医学诊断主要基于生化检验和医学成像;其中医学成像作为医疗诊断的主要依据之一,在医学诊断中发挥着重要作用。目前临床中典型的成像技术包括 X 射线、CT、核磁共振、超声、核医学、各种显微和窥镜图像等^[5],但这些传统成像系统设备的操作复杂且成本高昂,致使其应用受限^[6]。据世界卫生组织报告,由于有些成像装置过于高端,仪器维修困难和医护人员培训不足,发展中国家进口的医疗设备中,50%以上的医疗设备常处于闲置^[7]。在某些偏远地区,由于检测设备携带不方便,操作人员缺乏有效培训,导致传统影像设备不能够物尽其用^[7]。此外,在很多发展中国家,优秀的医务工作者和完善的医疗设施相对集中分布在中心城区,而在偏远地区,由于交通、通讯、医疗等基础设施相对落后,容易造成患者的就诊困难,及与医务工作者之间的沟通障碍^[8]。解决该问题的一种方法是降低医疗设备的成本和操作程序,使其操作更简单、更易普及;另一种方法则是利用便捷式设备进行数据简易采集,并将采集的信息快速传送给医疗中心的医务人员,从而实现实时远程诊断。智能手机的出现为上述两种方法的实现提供了极大的便利,在发展中国家和资源有限地区影像学检查领域中的应用备受关注。智能手机不仅可获取高分辨图像,还可采集音频和高清视频,并可借助软件在手机上完成数据分析 and 传输,无论是对很多疾病发病征兆的早期预见、病情发展的实时监测,还是对疾病的防治与即时诊治均具有重要的指导意义。此外,在手机信息采集、处理和传递等基础上,科研工作者通过不断加强手机的软硬件及联用装置的功能,使其成为一个小型的医疗设备,充分发挥其在医学检测和即时诊断(point-of-care testing, POCT)等方面的作用,并在此基础上逐步形成了手机医学。

2 智能手机在医疗诊断中的应用

目前,家庭、社区和偏远地区往往有手机信号覆盖,如果使用大众随身携带的手机进行医学诊断和远程医学分析,不仅成本低廉,操作简单,应用前景也非常广阔,避免了大型贵重医疗检测仪器设备难以携带的弊端。根据智能手机在医学诊疗服务中的

应用,可分为手机直接检测、手机间接检测(联用其他诊疗设备)(见表 1)。本文重点介绍智能手机在医学诊疗服务中的职能,并总结其近年来在医疗领域中的应用。

2.1 手机直接检测

目前,智能手机已被直接应用于检测人体一些重要的生理参数,相关研究人员正通过开发相应的软件,或者增强手机配件的功能,进一步实现利用智能手机进行临床检测的目的。

王昊等^[9]通过 Visual Studio 2008 开发手机应用程序,实现了手机采集鼾声信号的功能,并在 Matlab 环境下,对音频信号进行初步处理,可定位鼾声信号以及分析患者健康状况,为家庭化低成本呼吸睡眠障碍监测提供重要的技术途径。罗马尼亚开发了一个用于跟踪皮肤癌的应用程序 Skin Scan (<http://www.skincanapp.com/>),该程序通过手机镜头采集人体皮肤上可疑的痣或者胎斑部分的图片,并对图片进行处理,从而辨别其异常情况和转化为皮肤癌的风险。希腊佩特雷大学的研究人员开发了一种侵扰程度较低的视频软件,可通过分析人的脸部来判断其是否醉酒。它有两种工作方式,一种方式依据人在饮酒后,脸部某些位点下的血管膨胀和颜色加深的特点,通过测定脸部特定位点的像素值,并和数据库内醉酒及清醒人的脸部着色进行对比,可明显区分该人是否醉酒;另一种方式是利用热成像技术来测量人鼻子(醉酒时鼻子温度较高)和前额的温度(醉酒时前额温度较低)。研究人员认为,该软件通过结合这两种工作方式,可在事故发生前可靠地辨别出醉酒人员^[10]。此外,面向不同操作系统的智能手机用户推出的 Cardiiio (<http://itunes.apple.com/us/app/cardiiio-touchless-camera-pulse/id542891434?mt=>)和 What's My Heart Rate (<http://www.whatsmyheartrate.com/index.html>)应用程序,根据心跳引起人体脸部血色微小的变化,则可通过对脸部拍照检测心率。

唐艳等^[11]结合动态心电图技术和通用分组无线业务(General Packet Radio Service, GPRS)系统

标准提出利用无线网络对传输的信号进行处理,从而实现了 24 h 不间断地对患者进行心电监护。新加坡 Ephone 公司推出的 EPI Life 手机(内置心电图监测装置)仅需 30 s 便可完成一次心电图检测,该检测结果可及时发送给该公司的健康中心,并可随时随地在线访问,以了解手机用户的健康状况^[12]。德州达拉斯大学的研究人员采用一种可以产生太赫兹电磁波的方法开发了一种新的成像技术,将其与 CMOS 芯片联合,再同接收器一起安置于手机之上,这种新的成像系统可让手机透视墙壁、木材,甚至皮肤,从而可对骨骼成像^[13],该技术在不久的将来还有望用于癌症检测。

伴随着手机医学的发展,一些多功能传感器(如温度、压力等传感器)被附加到手机上,做成手机温度计、手机听诊器等,以便获取可应用于临床诊断的多项指标^[14]。Scully 等^[15]通过手机记录和分析指尖颜色信号变化,验证了其监测多种生理指标的可行性;采用手机摄像头记录一段放松状态下左手食指指尖的视频,通过 Matlab 软件对数据进行分析,从而提取呼吸频率、心率 R-R 间隔以及血氧饱和度等生命体征信息。由于手机拍摄的视频显示出手指颜色信号随时间的变化,可通过对信号最高峰的检测计算出心率。同时,结果显示在失血严重时信号强度改变较大,从而为手机检测严重失血提供了基础。目前,该技术的处理分析过程仍然基于电脑,考虑到手机处理器的功能和能力,未来完全可以基于手机实现。

此外,可利用植入加速度感应器、振动传感器以及角度传感器的智能手机开展运动功能(或障碍)检测^[6],并通过助力器械与装置操控手机集成控制器,辅助肢体残疾人的生活与康复^[16]。由此可见,采用手机对生命体征和重要生理参数进行监测,不仅对手机用户的日常卫生保健有极大帮助,方便用户及时了解自身健康状况,还有利于医务工作者及时获悉患者病情,便于疾病的预防和诊断。

2.2 手机间接检测

除了内置传感器外,手机还可与其他试验装置,

表 1 智能手机在医疗领域中的应用

Tab. 1 A summary of smart phone applications in medicine

| 分类 | 原理 | 应用举例 |
|--------|--|-----------------------------|
| 手机直接检测 | 通过手机内置摄像头等传感器采集数据,然后对图像、视频文件进行处理,以获取检测信息 | 心电图、皮肤检测、骨骼成像、运动功能检测等 |
| 手机间接检测 | 通过外接传感器、显微镜、超声探头、微流体芯片等检测设备联合手机获取检测信息 | 血糖检测、心电图、超声成像、细胞计数、肿瘤标志物检测等 |

如传感器、显微镜、分光光度计^[17]、超声探头^[18]以及微流体装置^[17]等联用实现间接检测。这种方法一般通过外源设备收集测试者相应的生物信息,然后通过手机进行处理或通过网络直接发送给医生或者专家系统数据库,从而实现疾病的早期诊断,进而采取有效的防治措施。

2.2.1 手机联合传感器 美国 HealthPia 公司开发出一个小型血糖检测装置,由试纸传感器、模拟电路、微控制器单元、通讯界面及手机输入/输出组成:将试纸条插入手机后,该装置的信息即可全部呈现在手机上,构成血糖手机——GlucophoneTM^[19]。针对一种常见慢性青少年疾病(1 型糖尿病),Carroll 等^[20-21]就利用 GlucophoneTM 手机对青少年糖尿病患者进行监控的可行性展开了研究,结果表明该手机是一个有效的监控工具。荷兰的三家公司联合开发了一款基于手机的心电图仪,由一个可穿戴的无线心电图传感器和 nRF24L01 无线收发器构成。利用这种传感器收集人体生物电信号并经过微处理器处理后,通过低功耗的 nRF24L01 无线收发器,将信号传输到 Android 手机 miniSD 插槽上的模块,再通过 3G 或者 Wi-Fi 直接传送到医院甚至社交网站上,由此实现动态心电图数据的实时监测和信息传输^[22]。Iwamoto 等^[23]将手机与心电图记录仪和加速仪组合成一个检测系统,该系统利用固定在患者胸部的三个电极,记录、存储患者的心电图,然后通过手机传送到医院的服务器。即使不在医院,医务工作者也可通过手机下载患者的心电图信息进行诊断。针对手机检测装置对老年人的实用性和可行性,Ehmen 等^[24]比较了四种不同的检测装置,结果表明大部分受试者接受基于手机的心电图诊断,但由于测试的准备过程较长,难以满足临床诊疗的需求,还需对该技术进行改进和完善。此外,在音频信号检测方面,研究者也进行了相关探索。例如,心音是评估心脏功能状态最基本的参数之一,王海滨等^[25]开发的基于听诊器的心音解析系统可用于居家心脏状况检测,目前有望在智能手机上实现分析。李建银^[26]综合心音传感器和蓝牙通讯技术,设计出一个心音采集系统,通过蓝牙模块无线传输将检测结果发送到智能手机上,进而在智能手机上实现了心音实时采集和保存,对于心血管患者的治疗选择、病理生理状态的判断以及医生的研究都提供了很有价值的资料。澳大利亚墨尔本大学的研究团队开发了用于智能手机的云应用——StethoCloud,可在没有医生参与的情况下通过检测呼吸频率,辅助用户

诊断肺炎。使用 StethoCloud 时,用户只需将小麦克风一端插入智能手机的音频输入,另一端则像听诊器一样放置于人体上。当该程序记录了足够的关于呼吸频率的音频信息,该信息被发送到服务器上过滤噪音和分析数据,诊断结果和治疗建议会及时反馈到用户手机上^[27]。

2.2.2 手机联合显微镜 Breslauer 等^[28]利用普通的显微镜(放大倍数和分辨率可由不同的物镜进行调节)开发出了手机光学显微镜,在明场下可对恶性疟原虫感染的红细胞和镰刀形红细胞成像,并在 LED 光激发下对结核分枝杆菌感染的痰标本进行荧光成像,其空间分辨率约为 $1.2 \mu\text{m}$,可满足检测血细胞和微生物形态所需;通过影像分析软件,还可进一步实现肺结核样本的自动细菌计数。Smith 等^[17]设计了两个附加装置,将手机的内置镜头和成像元件转化为 350 倍显微镜和可见光分光光度计:该显微镜模式无需影像处理技术,视野范围约为 $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$;通过记录多张不同焦平面的相片及其轮廓,利用多聚焦图像融合算法对图像进行后处理,可将视野扩大为 $350 \mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ 。采用该手机显微镜对染色处理前后的血液涂片进行成像,所得影像结果与光学显微镜结果相近;进一步利用软件对细胞进行自动计数,准确度达 97%,表明可将该手机应用于临床病理学诊断。此外,还可在手机镜头上附加一套光栅和准直管,使其具有分光光度计的功能,检测带宽为 300 nm,分辨率约 10 nm。虽然其检测范围和分辨率均低于传统分光光度计,但在 10 nm 分辨率条件下,可利用该系统针对多种目标物,快速收集信噪比和分辨率均可靠的数据,并且其检测结果与 USB4000 光度计结果相一致。在此基础上,缩小狭缝尺寸可将分辨率提高至 5 nm,进一步提高其检测准确性。

2.2.3 手机联合微流体芯片 Zhu 等^[29]将一个微型、低成本的光流体芯片安置于手机相机镜头处,当样本流过芯片上的微通道时,发光二极管激发将激发其中荧光标记的颗粒或者细胞,该信号随后被手机记录并处理,从而实现基于荧光的流式颗粒和细胞计数。同年,美国加州大学洛杉矶分校的研究人员开发了第一个基于手机快速检测和诊断疟疾的生物传感器,为手机医学检测传染性疾病提供了新的思路。该生物传感器包含两个部分——循环电路板和微流体芯片,微流体芯片与循环电路板相连,循环电路板则通过 USB 接口与手机相连。循环电路板包含检测所需的电子组件,并将数据传输给手

机^[30]。Wang等^[31]开发出一种ELISA微流体芯片,该芯片可检测临床尿样中的卵巢癌生物标记物HE4,并用手机取代传统的分光光度计对结果进行分析,为利用手机进行卵巢癌临床诊断提供了一种准确、可靠、便捷、经济的方法。

2.2.4 手机联合超声成像系统 Mobisante公司研发了一种基于智能手机的超声成像系统,由带有USB接口的智能手机、超声探头和无线连接装置组成,在手机上即可实现超声检测^[32]。该装置易于操作,基层医务工作者能够很快学会并掌握如何获取高质量的超声图像,具有成本低和便携等特性。此外,当检测结果难以判定时,可利用手机将超声图像发送给更高级别医生协助诊断。目前,这种智能手机已通过美国食品和药物管理局(FDA)认证并上市,它不仅适用于心脏科和妇产科,还适用于医疗保健筛查,也可作为发达国家和地区的临床附加设备。

因此,以手机为载体的辅助诊断技术,给出了一种通过多种信息载体(图像、音频和视频等)实现医学信息采集、处理、存储和管理等综合方案。它通过与其他试验装置组装成不同的检测系统,填补了一些医学诊疗技术的不足,特别是可以满足医疗资源匮乏地区的诊断需求。

3 总结和展望

伴随着智能手机的出现及其在现代医学中的应用,诞生了一种崭新的、具有广阔应用前景的手机医疗诊断模式。利用配备更高像素、更专业的微距镜头及更大屏幕液晶显示器的智能手机,可获取和显示更清晰的临床照片;与此同时,智能手机操作简单,与计算机相比,有着无可比拟的便携性和移动性,其价格也越来越便宜,已经实现了在世界范围内的广泛普及。因此,智能手机的快速发展以及相关应用程序和外围设备的不断开发,为手机医学带来前所未有的机遇,尤其对实现及时诊断和提高资源有限地区的医疗水平具有重大意义。但是,手机医学仍处于发展的初级阶段,在信号采集、处理和传输等方面均存在着诸多挑战。在信号采集方面,目前用于检测的程序其应用数目和功能均有限,能整合于手机的检测用传感器还亟待开发;而外接其他装置的方式又在很大程度上限制了它的推广和应用。此外,目前采集的信号还相对单一,主要集中于图像信息的获取,对于音频信息的采集和应用还寥寥无几。在信号处理方面,智能手机与计算机相比,其功能还较为简单,难以完成复杂的数据分析;而且,不

同手机硬件和软件开发商推出的产品不尽相同,使得数据处理的结果参差不齐。在信号传输方面,首先存在手机和信号采集装置(传感器、显微镜等)接口兼容性问题,其次是信号对外(信息处理中心或医务工作站)传输的速度和安全(隐私)问题。此外,针对手机医学的随机、对照、重复临床试验也有待展开,以评估其可行性和可靠性。

作为未来医疗诊断发展的一个必然趋势,手机医学已经取得了迅速的发展。随着手机医学的不断完善及应用范围的不断拓展,可以预见手机医学必将在临床诊疗中占据重要的地位,并引领全球社会进入一个新的医疗保健时代。

参 考 文 献

- [1] International Telecommunication Union. Key statistical highlights: ITU data release June 2012 [EB/OL]. (2012-06) [2012-10-04]. http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/material/pdf/2011%20Statistical%20highlights_June_2012.pdf.
- [2] 张晓丁,刘静.基于手机的远程可视化医学技术研究[J].中国医疗器械信息,2010,16(10):28-33,79.
- [3] WANG H, LIU J. Mobile phone based health care technology [J]. Recent Pat Biomed Eng, 2009, 2(1): 15-21.
- [4] XIE Q M, LIU J. Mobile phone based biomedical imaging technology: a newly emerging area [J]. Recent Pat Biomed Eng, 2010, 3(1): 41-53.
- [5] 黄硕,刘静.手机与计算机之间的图像无线交互传输技术及其医学应用[J].中国医疗器械杂志,2010,34(3):167-171.
- [6] LIU L, LIU J. Biomedical sensor technologies on the platform of mobile phones [J]. Front Mech Eng, 2011, 6(2): 160-175.
- [7] GRANOT Y, IVORRA A, RUBINSKY B. A new concept for medical imaging centered on cellular phone technology [J]. PLoS One, 2008, 3(4): e2075.
- [8] ZUROVAC D, AO T A, SNOW R W. Mobile phone text messaging: tool for malaria control in Africa [J]. PLoS Med, 2012, 9(2): e1001176.
- [9] 王昊,刘静.睡眠障碍的手机监测方法研究[J].北京生物医学工程,2010,29(3):270-277.
- [10] COXWORTH B. Face-scanning cameras could pick out drunks [EB/OL]. (2012-09-04) [2012-10-04]. <http://www.gizmag.com/drunken-face-scanning-cameras/23993/>.
- [11] 唐艳,汤井田.应用移动通讯技术设计心电监护系统[J].生物医学工程学杂志,2006,23(5):1130-1133.
- [12] WONG P. EPI Life: World's first EKG mobile phone [EB/OL]. (2010-06-16) [2012-10-04]. http://news.cnet.com/8301-17938_105-20007953-1.html?part=rss&subj=news&tag=2547-1_3-0-20.
- [13] ROBERTSON A. New imaging system could let cellphones see through walls [EB/OL]. (2012-04-18) [2012-10-04]. <http://www.theverge.com/2012/4/18/2957280/imaging-chip>

- research-ut-dallas-cell-phone-x-ray-vision.
- [14] ISO T, KAWASAKI N, KURAKAKE S. Personal context extractor with multiple sensors on a cell phone [C/OL]. The Seventh IFIP International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks (MWCN 2005), Marrakech, Morocco, September 19-21, 2005. (2005-09-21) [2012-10-04]. <http://www.ctr.kcl.ac.uk/MWCN2005/Paper/C200525.pdf>.
- [15] SCULLY C G, LEE J, MEYER J, et al. Physiological parameter monitoring from optical recordings with a mobile phone [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2012, 59(2): 303-306.
- [16] 刘琳, 刘静. 手机助老助残技术的研究与进展[J]. *中国医疗器械信息*, 2011, 17(1): 6-15.
- [17] SMITH Z J, CHU K, ESPENSON A R, et al. Cell-phone-based platform for biomedical device development and education applications [J]. *PLoS One*, 2011, 6(3): e17150.
- [18] FITZPATRICK T. Ultrasound imaging now possible with a smartphone [EB/OL]. (2009-4-20) [2012-10-04]. <http://news.wustl.edu/news/pages/13928.aspx>.
- [19] BALAN E. HealthPia GlucoPhone, with Blood Glucose Meter [EB/OL]. (2007-8-14) [2012-10-04]. <http://news.softpedia.com/news/HealthPia-GlucoPhone-with-Blood-Glucose-Meter-62664.shtml>.
- [20] CARROLL A E, MARRERO D G, DOWNS S M. The healthpia glucopack diabetes phone; a usability study [J]. *Diabetes Technol Ther*, 2007, 9(2): 158-164.
- [21] CARROLL A E, DIMEGLIO L A, STEIN S, et al. Using a cell phone-based glucose monitoring system for adolescent diabetes management [J]. *Diabetes Educ*, 2011, 37(1): 59-66.
- [22] MACMANUS C, KATZ L. Android phones get heart-health-y [EB/OL]. (2010-10-14) [2012-10-04]. http://news.cnet.com/8301-17938_105-20019684-1.html.
- [23] IWAMOTO J, OGAWA H, MAKI H, et al. A mobile phone-based eeg and heart sound monitoring system-biomed 2011 [J]. *Biomed Sci Instrum*, 2011, 47: 160-164.
- [24] EHMEN H, HAESNER M, STEINKE I, et al. Comparison of four different mobile devices for measuring heart rate and ECG with respect to aspects of usability and acceptance by older people [J]. *Appl Ergon*, 2012, 43(3): 582-587.
- [25] 王海滨, 江钟伟, 董秀成, 等. 基于听诊器的心音采集解析系统 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2009, 26(2): 282-287.
- [26] 李建银. 基于智能手机平台的心音采集和无线传输技术的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2011.
- [27] SUTHERLAND K. StethoCloud promises a low-cost solution to pneumonia diagnoses [EB/OL]. (2012-09-04) [2012-10-04]. <http://www.gizmag.com/stethoscope-stethocloud-app/23999/>.
- [28] BRESLAUER D N, MAAMARI R N, SWITZ N A, et al. Mobile phone based clinical microscopy for global health applications [J]. *PLoS One*, 2009, 4(7): e6320.
- [29] ZHU H, MAVANDADI S, COSKUN A F, et al. Optofluidic fluorescent imaging cytometry on a cell phone [J]. *Anal Chem*, 2011, 83(17): 6641-6647.
- [30] UCLA Office of Intellectual Property & Industry Sponsored Research. A Cell Phone-Based Electrical Biosensor [EB/OL]. (2011) [2012-10-04]. http://techtransfer.universityofcalifornia.edu/NCD/22116.html?utm_source=iBridge&utm_medium=webpage&utm_term=ncdid_22116&utm_campaign=TechWebsites.
- [31] WANG S, ZHAO X, KHIMJI I, et al. Integration of cell phone imaging with microchip elisa to detect ovarian cancer he4 biomarker in urine at the point-of-care [J]. *Lab Chip*, 2011, 11(20): 3411-3418.
- [32] MERTZ L. Ultrasound fetal monitoring spectrometer there's an app for that!: biomedical smart phone apps are taking healthcare by storm [J]. *IEEE Pulse*, 2012, 3(2): 16-21.

(收稿: 2012-10-05 修回: 2012-12-10)