

面向智能手机的磁共振弹性图像仿真与信息处理系统的设计与实现

梁孝,施冕,单翔,吴杰,李炳南,高荣科

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,安徽合肥 230009)

摘要: 为了满足医务人员、科研人员以及个性化医疗患者在使用磁共振弹性图像信息处理系统时的便捷性和智能化需求,设计了一种基于智能手机的磁共振弹性图像仿真与信息处理系统.通过对磁共振弹性图像的分析以及处理算法的深入研究,以html5+css3+javascript语言为基础在AppCan(hybrid混合移动开发平台)平台下对软件进行开发,其中html5+css3语言编写的部分负责实现软件界面的设计以及对磁共振弹性图像的灰度值数据的获取;javascript语言编写的部分负责对获取的数据进行仿真与重构,并可以在智能手机实时显示.该项软件设计的意义体现在利用智能手机通过触摸屏进行操作的交互优势,使磁共振弹性图像的仿真与重构过程更加智能化,在医学诊断和个性化医疗推广等领域有着广泛的应用价值和潜力.

关键词: 磁共振弹性成像;智能手机;图像处理;个性化医疗;AppCan

中图分类号: TP399 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2019.01.010

引用格式: 梁孝,施冕,单翔,等.面向智能手机的磁共振弹性图像仿真与信息处理系统的设计与实现[J].中国科学技术大学学报,2019,49(1):71-78.

LIANG Xiao, SHI Mian, SHAN Xiang, et al. Development of smartphone based magnetic resonance elastography simulation and information processing system[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019,49(1):71-78.

Development of smartphone based magnetic resonance elastography simulation and information processing system

LIANG Xiao, SHI Mian, SHAN Xiang, WU Jie, LI Bingnan, GAO Rongke

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To meet the requirement of portability and intelligentization when medical doctors, researchers and patients use magnetic resonance elastography (MRE) information processing system, a magnetic resonance elastic image simulation and information processing system was designed based on the smartphone platform. By analyzing MRE and studying processing algorithms, software based on the html5 + css3 + javascript language in AppCan (hybrid mixed mobile development platform) platform was developed. The design of software interface and acquisition of MRE data were projected by html5 + css3 language. The simulation and reconstruction of the MRE data was designed by javascript language, and it can be shown on the smartphone platform in real time. The significance of the software lies in the

收稿日期: 2018-02-25; **修回日期:** 2018-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61601165, 61571176);安徽省重点研究与开发计划(1704d0802188)资助.

作者简介: 梁孝,男,1992年生,硕士生.研究方向:移动计算与磁共振弹性图像算法处理. Email: xiao_lianglll@163.com

通讯作者: 高荣科,博士/副教授. E-mail: rkgao@hfut.edu.cn

advantage of operating easily by touch screen on the smartphone platform. The simulation and reconstruction process of MRE is more intelligent and portable, indicating its application value and potential in popularizing smart medical diagnosis and personalized diagnosis.

Key words: magnetic resonance elastography; smartphone; image processing; personalized medicine; AppCan

0 引言

随着社会经济技术的发展和传统先进医学理念的吸收融合,人们逐渐认识到“以健康为中心”和“治未病”理念是现代医疗服务的发展趋势,由此健康服务模式开始由传统单向的被动健康服务模式向互动的主动健康服务模式转变,具体体现在:一种是“未病先防”(即预防保健);二是“既病防变”或“已病早治”;三是连续性的医疗服务,个性化医疗在主动健康服务体系中占据着至关重要的作用。

个性化医疗^[1-2],又称“精准医疗”,是指以个人基因组信息为基础,结合蛋白质组、代谢组等相关内环境信息,为病人量身设计出最佳治疗方案,以期达到治疗效果最大化和副作用最小化的一门定制医疗模式。最早的个性化医疗理念的提出和实施,归功于医学领域的基因组学的突破,1999年,《Nature》杂志刊登了 Dunham 等 216 位科学家联合署名的人 22 号染色体 DNA 序列的学术论文^[3]。Nature Biotechnology 载文称,基因组学的进展为“新一代个性化医疗”打下基础。

目前,智能手机终端的图像处理技术越来越成熟。基于手机终端的图像处理系统一般分为两类:第一类是利用手机摄像头捕捉图像,对图像进行分析与识别;第二类是通过设备系统相册打开照片,运用事先编写好的算法进行图像处理。对于第一类,可以通过分析图像的 RGB 值进行分析对比^[4-7],找到病变样本与正常样本之间的区别;也可以通过模糊识别算法对人脸进行分析识别^[8-9]。第二类的图像处理系统,是在应用软件中嵌入图像处理算法,用于图像的分析 and 重构^[10]。本文所提及的系统属于第二类,通过内置的图像重构算法对图像进行处理。

在医学成像领域中,智能手机终端的图像处理软件也在逐步发展。Ahn 等开发了便携式超声成像系统,其中提及用硬件探测系统通过 USB 接口连接手机,能够方便快捷地对超声图像进行处理并且实时显示在手机上^[11];文献^[12]介绍了一种利用智能手机对新生儿的 X 光图像进行处理的新方法,并横

向与电脑端的结果进行了对比,结果显示手机端的结果与电脑端的结果基本吻合;计算机断层扫描成像(computed tomography, CT)在冠心病和阑尾炎的诊断上也有智能手机相关的图像处理研究^[13-14]。

对磁共振弹性图像的仿真与重构^[15]方法主要是通过 PC 端的 Matlab 数学软件或者 Mre/Wave 进行编译,但大型商业软件程序复杂、操作繁琐、版权费昂贵。本课题组在前期研究的基础上将在 Eclipse 平台上使用 java 语言开发的插件嵌入到 ImageJ 图像处理软件上同样实现了磁共振弹性成像的仿真与重构,但也存在一定的局限性,不能满足研究人员或医学人员实时便捷的检测。随着手机硬件设备技术的不断发展,使得在嵌入式平台上进行磁共振弹性图像处理成为可能。目前使用最广泛的是基于 Android 系统的嵌入式平台^[16],与之相关的图像类应用需求也渐渐增多,比如图像识别^[17]、语音识别^[18]、人脸识别^[19-20]等智能化软件。嵌入式设备以其小型、便携、功能多样、开发成本低廉等诸多优点得到快速发展。根据目前已有的公开资料所知,还没有基于智能移动平台的磁共振图像处理研究。为了满足智能移动平台用户的研究与使用需求,本文以智能手机为平台,设计了面向智能手机的磁共振弹性图像的仿真与信息处理系统。

针对磁共振影像检查人群多,读片人员数量少的现状,在智能手机上开发了内置图像重构算法进行图像处理的 App,利用 canvas 画布功能将弹性图像转换为灰度值数组,通过图像算法进行仿真与重构并显示在智能手机上,让患者能够随时随地获得磁共振影像资料 and 与其相关的信息,对精准医疗和个性化诊疗的推动具有积极的促进作用。

1 理论介绍

弹性是人体组织的一个重要的物理特性,弹性成像是通过提取组织的弹性特征并进行成像,目前的技术主要有超声成像和磁共振成像等。在临床上,触诊作为一种基本的检查方法,能够帮助医生对检查器官以及脏器是否发生病变提供直观的参考依

据,医生通过感受病人身体弹性特性的差异区分正常与异常的组织^[21].触诊存在一定的局限性,它只能检测人体表面的器官,是一种主观定性的检查方法.弹性成像避免了触诊的局限性,能够检查到人工触诊接触不到的组织^[22-23],例如脑组织^[24]、肝脏^[25-26]、肾脏等.其中,脑部是人类尚未攻克的重要器官之一,是当前研究的一个热点和重点的问题.目前,多项研究结果指出,脑组织的生物力学属性变化往往蕴含着病变信息,如阿尔茨海默症的表现是健康脂肪酸髓鞘蜕变为硬化的淀粉样蛋白斑;脑白质的剪切模量与脑灰质的剪切模量存在显著差异,可以预见弹性成像在脑部疾病鉴别诊断方面具有很大的潜力.

磁共振弹性成像^[28-30]技术(magnetic resonance elastography, MRE)是一种新型的、非创性的弹性成像技术,利用磁共振技术检测人体组织或器官在外力作用下的质点位移,并通过运动敏感梯度获得磁共振相位图,以此为基础得出人体组织或器官各点的弹性图,并以组织或器官的弹性力学参数作为医学诊断的依据^[30].

磁共振弹性成像能够在普通的 MR 设备中完成,只需要另外加入一套能够对成像部位施加剪切波,即横波激励的机械装置.机械装置产生的剪切波从器官或组织的表面进入后,在其内部进行传播,质点会在垂直波的传播路径上产生周期位移,位移大小与质点的弹性(或硬度)相关.

在剪切波传播的同时,进行磁共振位移相位成像,利用运动敏感梯度将质点的位移反映在磁共振相位图上,将位移图作为输入,对弹性力学的逆问题进行求解,进而利用反演拟合算法得出组织的弹性系数的分布图,即弹性图.概括来说, MRE 技术主要有 3 个步骤:

第一步:在组织中产生剪切波;

第二步:获得反映剪切波的传播情况的 MR 图像;

第三步:对剪切波图像进行处理,得到组织弹性(或硬度)的量化图,又称为弹性图.

磁共振弹性成像仿真可以在不依赖磁共振成像系统的情况下,构建物理模型,进行数值计算,得到与实际成像相符合的声波探针传播和分析数据.将磁共振弹性图像导入仿真软件中,进行分析,可用于临床或者科学研究.

前期在 PC 端用 java 语言开发的磁共振脑组织弹性成像的数值仿真平台已经可以实现脑部组织的特异性波动图仿真,在 PC 端向系统输入指定的脑部结构图(CT 或 MRI 扫描图),系统读取脑部结构图各位置的灰度值,通过调节比例系数,转化为对应位置的剪切模量,得到剪切模量分布函数;然后系统调用波动方程求解函数,求出 Fov 各区域的位移值,最终得到对应的波动图;本文手机端的操作与 PC 端存在一些区别,主要是利用 canvas 画布,将本地相册的脑部结构图显示在手机上,读取图像的灰度值,将组织不同位置的灰度值转换为复数数组,并用事先编写好的函数代码进行仿真与重构操作,最终将结果呈现在手机上.图 1 为系统的流程图,图 2 为系统功能图.

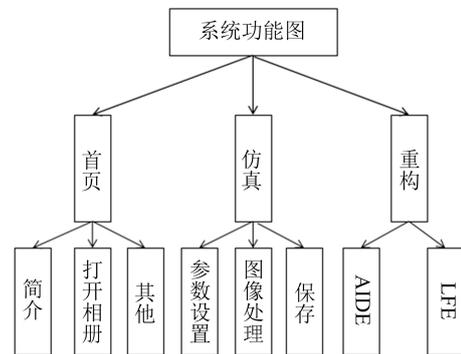


图 1 图像处理系统流程图

Fig. 1 Flowchart of image processing system

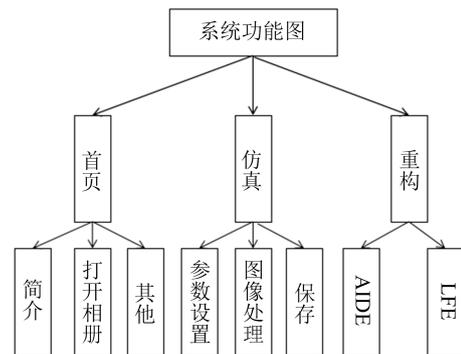


图 2 系统功能图

Fig. 2 System function diagram

图中,canvas 画布功能是 html5 新出的一个功能,通过<canvas id="myCanvas"></canvas>,可以将脑部结构图呈现在手机上,并获取到脑部结构图的灰度值数组,通过构造的复数类函数,将灰度值放到复数数组里,最后通过软件仿真与重构函数得到结果图.

2 系统模块功能与实现

系统主要分为两个模块:磁共振弹性图像仿真模块(MREA)和磁共振弹性图像信息处理模块(MREP). MREA 模块通过打开设备本地相册,将磁共振弹性图像导入软件,设置仿真参数,进行图像仿真,最后保存到本地相册. MREP 模块将本地相册仿真弹性图像导入软件中,根据不同的重构算法设置不同的重构参数,最终进行图像的重构.

2.1 MREA

MREA 模块通过 Hybrid 混合移动开发平台 AppCan 提供的库函数,实现对本地磁共振弹性图像的获取,利用 canvas 画布将磁共振弹性图像信息转换为灰度值数组进行仿真处理,如图 3 所示.

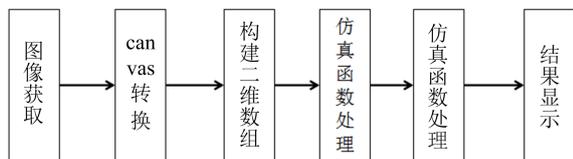


图 3 仿真流程图

Fig. 3 Flowchart of simulation

界面底部导航栏提供了对于仿真必须的 3 个参数设置,分别是驱动参数的设置、图像参数的设置以及仿真参数的设置. 驱动部分包括两个参数:radius 参数和 Fre 参数, radius 代表的是驱动半径, Fre 代表的是驱动频率; 图像部分的参数包括 Fov、Phases、Matrix、No 4 个参数, Fov 表示视野, Phases 表示一个波动周期相位偏移量, Matrix 参数代表图像的像素值, 比如 256, 表示显示的是 256×256 的图像, No 表示第几个相位; 而仿真部分的参数包括 mu1、mu2、mu3、PR、Rho, 分别代表剪切模量(mu1、mu2、mu3)、泊松比以及密度.

仿真前,需要通过 document 对象中 document.getElementById()方法获取 3 个参数的数值. 处理的时候需要将弹性图像的图像信息转换成数字信息,html5 新增的 canvas 画布功能能够实现这个功能. canvas 能够用 javascript 代码绘制图像的 html 元素,通过获取图像每个点 RGBA 值进行相应的数学运算. 在 html 中添加两个 `<canvas></canvas>` 标签,代码如下:

```

<canvas id="standard" ></canvas>
<canvas id="canvas" ></canvas>
<canvas id="canvas0"></canvas>
<canvas id="canvas1"></canvas>
  
```

```
<canvas id="canvas2"></canvas>
```

```
<canvas id="canvas3"></canvas>
```

其中 id 为 standard 的 canvas 用于显示未处理的图像, id 为 canvas、canvas0~canvas3 的 canvas 用于显示处理之后的图像.

每个 canvas 元素都有对应的上下文信息,用 canvas 元素中的 getContext()函数进行渲染上下文,将图像中的信息转换为各自对应的 context 对象,通过 context 对象提供的 getImageData()函数将 context 信息放入 canvasData,完成图像信息向数字信息转换. 其中 getImageData()函数中有 4 个参数,前两个参数分别为 x 、 y ,表示获取图像数据的起点,后两个参数为 width 与 height,代表从起点获取图像数据的长宽. 部分代码如下:

```

var context0=canvas0.getContext("2d");
var canvasData0 = context0.getImageData(0,
0,width,height);
  
```

canvasData0 是个二维的数组,每个数组中的元素包括 R、G、B、A 值,RGB 是图像红、绿、蓝 3 个通道的颜色,A 是通道的透明度. 通过转换算法,提取每个数组元素中的 RGBA 进行接下来的数学运算.

一般的弹性图像是灰度值图像,只需取 RGB 任一通道的元素即可. 调用 model.js 文件预先编译好的弹性图像仿真函数,把 Img 的数组信息以及输入的仿真参数带入函数中进行计算. 得到的结果对象是一个 3 维数组,第 1 维只有 4 个值,代表波动周期为 4,即生成的结果图为 4 幅,第 2 维和第 3 维代表每一幅图像的横纵坐标. 定义 4 个二维数组,将 4 幅图像各自放入一个数组. 仿真算法计算得到的结果值较小,不能很好地显示图像.

最后一步,将结果数值重新放回 canvasData,使得图像的每个值都包括 RGBA 值,其中 A 值默认设为 255(完全不透明). 通过 context 中提供的 putImageData 函数,把 canvasData 数据放入 context,将 toDataURL 函数放入 id 为 test0 的 Img 标签中显示出来. 保存得到的仿真图像,进行下一步的重构过程.

2.2 MREP

MREP 是对上一步仿真得到的图像进行进一步的信息处理过程. 本系统采用的重构算法有两种:直接反演算法(AIDE)和局部频率估计算法(LFE).

(I) AIDE 实现过程

AIDE 的过程主要通过导航栏选择之后对算法的参数设置, 设置后进行对应的数学运算, 得到重构后的图像. 算法流程如图 4 所示.

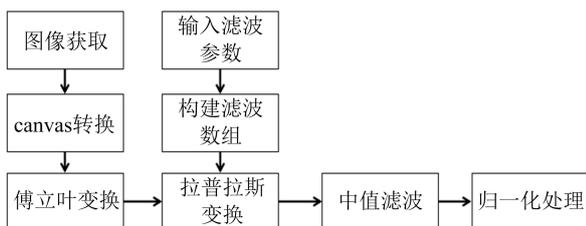


图 4 AIDE 流程图

Fig. 4 Flowchart of AIDE

AIDE 的参数包括: $Mfreq$ 、 $Fov(x, y)$ 、 $nOrder$ 、 $nSize$ 、 $Hnum$ 5 个参数, 分别代表: 机械波频率, 视野, 滤波器阶数, 中值滤波窗口大小, 谐波数.

通过 AppCan 中的 `localStorage()` 函数, 获取仿真后的结果图. 在 js 算法代码中调用 `document` 对象的 `getElementById()` 函数得到 AIDE 运算的参数.

磁共振弹性图像重构中的数学运算是复数数组的计算, 但通过图像获取的 RGB 值数组或者灰度值数组是实数数组, 因此需要新建一个 `Complex` 复数类, 将从图像中获取的二维灰度值实数数组 `ph0[][]` 放到 `Complex` 复数类的实部, 对其虚部默认填 0, 从而构建一个复数的二维数组 `Complex ph0[][]`; 每一幅图像得到的数据都是一个二维的复数数组, 为了方便下一步运算, 新建一个数组对象 `ph[]`, 数组的大小为 4, 将 4 个二维的复数数组放入 `ph[]` 中. 对构建的二维复数数组调用预先编译好的 `firstHarmonic()` 函数进行处理. `firstHarmonic()` 是对数组大小为 4 的 `ph[]` 数组进行傅立叶变换, 得到的结果是一个二维复数数组 `phi[][]`.

根据 $nOrder$ 和 $nSize$ 两个参数, 调用预先编译的 `SavGol()` 函数, 得到二维的实数数组 `SG[][]`. `SavGol()` 函数是运用滤波器阶数和中值滤波窗口大小两个参数进行矩阵的转置变换以及逆变换, 得到二维的实数数组.

上述两个步骤得到的结果分别是: 二维的复数数组 `phi[][]` 以及二维的实数数组 `SG[][]`; 调用 `LapLac()` 函数对上述两个结果进行拉普拉斯变换, 得到一个一维复数数组.

一维复数数组进行相应的转换得到一维的实数数组. 为了保证数据的准确性, 对所求的数组信息进

行中值滤波, 中值滤波利用 9×9 矩阵, 过滤掉数据中过大或者过小的点, 过滤后的数据同样需要归一化处理, 最后得到的数据在 `canvas` 画布上显示.

(II) LFE 实现过程

LFE 算法的设计流程与 AIDE 重构算法相似, 同样需要手动输入算法所必须的相关参数, 调用算法函数进行重构, 得到结果图像. 算法流程如图 5 所示.

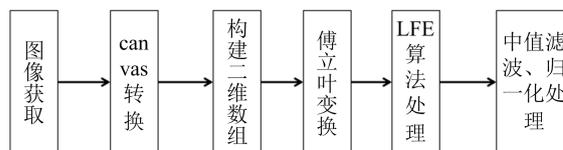


图 5 LFE 流程图

Fig. 5 Flowchart of LFE

LFE 重构过程需要的参数有 $Mfep$ 、 $Scals$ 、 $Fov(x, y)$ 、 WS 、 $nOrient$ 、 $Hnum$; 分别代表: 机械波频率, 中心频率的范围, 视野, 中值滤波器窗口的大小, 方向数字, 谐波数.

调用 `localStorage()` 函数, 获取 4 副仿真结果后的图像信息. 通过 `document` 的 `getElementById()` 函数收集 LFE 重构过程所需要的参数信息.

对获取的 `Scals` 参数调用 `construt()` 函数构建 `Scals` 数组 `Scals[]`; 通过 `localStorage()` 函数获取的图像信息, 需要调用 `setup()` 函数进行相应的数值调整. 数值调整后, 将每副图像的数字信息存储在 `Complex()` 复数类的实部, 相对应的虚部置 0, 构建 4 个二维的复数数组 `ph0[][]`, `ph1[][]`, `ph2[][]`, `ph3[][]`; 新建一个一维的数组 `ph[]`, 数组长度为 4, 将 4 个二维的复数数组放入 `ph` 中.

调用 `firstHarmonic()` 函数对 `ph[]` 数组进行傅立叶变换, 得到中间二维复数数组 `Img[][]`; 然后带入 `LFezz()` 函数中, 在函数处理前需要判断一开始构建的 `Scals[]` 数组的最大值是否小于 16, 如果大于 16, 说明滤波器的频谱太长, 提示“error”, 如果小于 16, 则进行 `LFezz()` 函数的计算. 对处理后的结果进行中值滤波以及归一化处理, 通过 `canvasData` 对象显示到手机界面上.

3 结果与讨论

3.1 首页界面

智能手机 App 显示效果如图 6 所示, 首页主要包括 3 个主要功能:

(I)“照片”按钮打开本地相册,用于选择待处理的磁共振弹性图像;

(II)“简介”按钮用于介绍磁共振的相关知识;

(III)“其他”按钮用于打开软件自带的弹性图像进行处理.



(a)首页界面

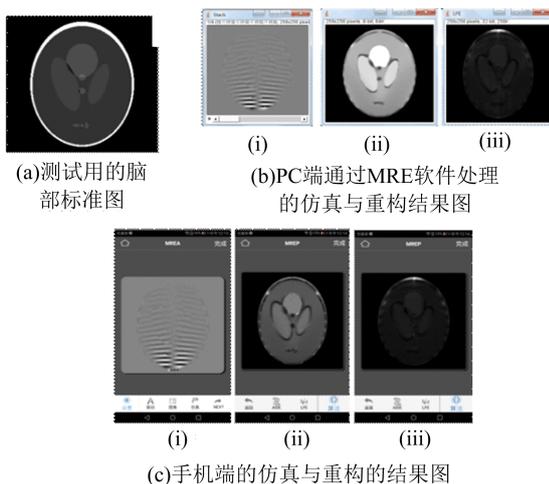
(b)按钮界面

图 6 智能手机 App 显示效果图

Fig. 6 Photograph of smartphone App

3.2 仿真与重构处理结果图

不同弹性成像重构图片对比如图 7 所示. 比较(b)图(i)与(c)图(i)可知,手机端对脑部标准图的仿真与 PC 端基本一致;比较(b)图(ii)与(c)图(ii)可知,手机端 AIDE 重构算法的重构图与 PC 端除了亮度值存在一些差距外,其他基本一致,而比较(b)图(iii)与(c)图(iii)可知,LFE 算法的重构图与 PC 端几乎一致. 由此可以得出,手机端的磁共振弹性图像仿真与重构与 PC 端的仿真与重构的结果基本相同.



(a)测试用的脑部标准图

(i) (ii) (iii)
(b)PC端通过MRE软件处理的仿真与重构结果图

(i) (ii) (iii)
(c)手机端的仿真与重构的结果图

图 7 不同弹性成像重构图片的对比

Fig. 7 Comparison of different image reconstruction results

表 1 给出的是对同一张灰度图像不同手机与电脑的处理速度对比,数据是通过多次处理给出的平均值. HTC-one 与华为荣耀 8 的处理速度与电脑端相比较慢,但依旧在可接受的范围之内. 在手机端,华为手机与 HTC 手机对同一幅灰度图像处理速度也存在一定的差距,华为手机与 HTC 的硬件配置不同,对处理速度有一定的影响.

表 1 不同手机与电脑处理速度对比

Tab. 1 Comparison of processing speed between different mobile phone and computer

平台	算法		
	MREA	MREP-AIDE	MREP-LFE
HTC-one/s	10.22	13.18	11.12
华为荣耀 8 青春版/s	12.56	14.25	12.33
电脑/s	2.46	4.28	3.79

表 2 中表示的是手机端与电脑端对彩色图像以及灰度图像处理的速度对比,表中比较的是仿真算法. 电脑端的彩色与灰度图像处理速度基本没有差距;手机端由于处理之前有个灰度化过程,因此彩色图像相对于灰度图像慢了 1 秒多,能够得出算法的过程越长,手机端的处理速度越慢.

表 2 彩色图像与灰度图像处理速度对比

Tab. 2 Comparison of processing speed between color image and gray image

平台	算法	
	彩色(MREA)	灰度(MREA)
手机(HTC)	11.65s	10.22s
电脑	3.02s	2.46s

表 3 是随机选择 50 个用户分别比较了手机与电脑端的系统的实时性、交互性、便捷性与处理速度. 从表 3 可以看出,76%的用户认为手机端的系统实时性较好;80%的用户认为系统的便捷性方面,手机优于电脑;在系统的交互性上,手机端与电脑端差距不大;而在处理速度方面,系统在手机端的处理速度弱于电脑,但随着手机端硬件的发展,手机性能的提升,手机端的处理速度必然会更快. 手机端图像处理系统相对于电脑来说,能够实时对磁共振弹性图像进行处理,方便科研人员以及医患人员进行研究以及临床的检测讨论,在实时性、便捷性以及用户的交互性方面更优.

表 3 手机与电脑的优势占比

Tab. 3 Comparison of advantages between mobile phone and computer

平台	属性			
	实时性	交互性	便携性	速度
手机	76%	60%	80%	30%
电脑	24%	40%	20%	70%

综上所述,基于手机端的磁共振弹性图像仿真与重构系统相较于电脑端,除了处理速度稍慢,其他方面都优于电脑端,随着手机硬件的发展,具有很大的潜力与使用价值。

4 结论

本文在前期的研究基础上,设计了一种面向智能手机端的磁共振弹性图像重构与仿真的系统,并将 PC 端的磁共振仿真重构软件在智能手机端进行了基本的重现,克服了大型仿真软件程序复杂、操作繁琐、租金昂贵的缺点,同时相较于 PC 端,满足了现阶段智能手机用户、科研人员的实时性、准确性的需求.通过人性化的界面设计以及智能化的图像仿真与重构模块,可以在手机端方便快捷的实现磁共振弹性图像的处理。

参考文献(References)

- [1] ALYASS A, TURCOTTE M, MEYRE D. From big data analysis to personalized medicine for all: Challenges and opportunities [J]. BMC Medical Genomics, 2015, 8(1): 33(1-12).
- [2] CHEN X, SHACHTER R D, KURIAN A W, et al. Dynamic strategy for personalized medicine[J]. Journal of Biomedical Informatics, 2017, 68(C): 50-57.
- [3] DUNHAM I, SHIMIZU N, ROE B A, et al. The DNA sequence of human chromosome 22[J]. Nature, 2003, 402(6761): 489-495.
- [4] CHEN W, YU H, SUN F, et al. Mobile platform for multiplexed detection and differentiation of disease-specific nucleic acid sequences, using microfluidic loop mediated isothermal amplification and smartphone detection [J]. Analytical chemistry, 2017, 89: 11219-11226.
- [5] GÖRÖCS Z, RIVENSON Y, KOYDEMIR H C, et al. Quantitative fluorescence sensing through highly autofluorescent, scattering, and absorbing media using mobile microscopy [J]. ACS Nano, 2016, 10 (9): 8989-8999.
- [6] LIHACHEV A, DERJABO A, FERULOVA I, et al. Autofluorescence imaging of basal cell carcinoma by smartphone RGB camera [J]. Journal of Biomedical Optics, 2015, 20(12): 120502.
- [7] GARCIA M R, STRINGASCI M D, MAGALHÃES D V, et al. Photoaging evaluation by RGB images using a smartphone for photodynamic therapy assessment [C]// European Conferences on Biomedical Optics. Munich, Germany: SPIE, 2017: 1041108.
- [8] FATHY M E, PATEL V M, CHELLAPPA R. Face-based active authentication on mobile devices [C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Brisbane, Australia: IEEE, 2015: 1687-1691.
- [9] JIANG Z, HAN J, QIAN C, et al. VADS: Visual attention detection with a smartphone [C]// IEEE International Conference on Computer Communications. San Francisco, USA: IEEE, 2016: 1-9.
- [10] NEJATI H, POMPONIU V, DO T T, et al. Smartphone and mobile image processing for assisted living: Health-monitoring apps powered by advanced mobile imaging algorithms [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2016, 33(4): 30-48.
- [11] AHN S, KANG J, KIM P, et al. Smartphone-based portable ultrasound imaging system: Prototype implementation and evaluation [C]// IEEE International Ultrasonics Symposium. Taipei, China: IEEE, 2015: 1-4.
- [12] WESTBERG M, VASKO T, OWEN L S, et al. Personal smartphones for neonatal diagnostic imaging: A prospective crossover study [J]. J Paediatr Child Health, 2017, 53(4): 343-347.
- [13] LINC T, ZIMMERMAN S L, CHU L C, et al. Evaluation of coronary artery disease and coronary anomalies with a handheld smartphone [J]. Journal of Digital Imaging, 2017, 30(6): 732-737.
- [14] SEONG N J, KIM B, LEE S, et al. Off-site smartphone reading of CT images for patients with inconclusive diagnoses of appendicitis from on-call radiologists [J]. American Journal of Roentgenology, 2014, 203(1): 3-9.
- [15] KRUSE S A, ROSE G H, GLASER K J, et al. Magnetic resonance elastography of the brain [J]. NeuroImage, 2008, 39(1): 231-237.
- [16] BABU K R, SUNITHA K V N. An effective hybrid technique for image enhancement through genetic algorithm-morphological operations [J]. International Journal of Signal & Imaging Systems Engineering, 2014, 7(2): 83-91.

- [17] WILSON A D. TouchLight: An imaging touch screen and display forge- sture-based interaction [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Multimodal Interfaces. PA, USA: ACM, 2004: 69-76.
- [18] MISHRA S, KANKAL R, LUNAWAT S, et al. Interactive automation interface using android app and speech recognition over wireless LAN and internet [C]// International Conference & Workshop on Electronics & Telecommunication Engineering. Mumbai, India: IET, 2017: 7-7.
- [19] 刘超. 基于 Android 平台人脸识别系统的设计与实现 [D]. 吉林: 吉林大学.
- [20] BABACK M, ALEX P. Probabilistic Visual Learning for object representation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 19 (7): 696-710.
- [21] CHAITOW L. Palpation and Assessment Skills: Assessment through Tooth [M]. Elsevier Health Sciences, UK, 2010.
- [22] PLECHA D M, PHAM R M, KLEIN N, et al. Addition of shear-wave elastography during second-look MR imaging-directed breast US: Effect on lesion detection and biopsy targeting [J]. Radiology, 2014, 272(3): 657-664.
- [23] VENKATESH S K, EHMAN R L. Magnetic resonance elastography of abdomen [J]. Abdominal Imaging, 2015, 40(4): 745-759.
- [24] KRUSE S A, ROSE G H, GLASER K J, et al. Magnetic resonance elastography of the brain [J]. NeuroImage, 2008, 39(1): 231-237.
- [25] BOHTE A E, GARTEISER P, DE N A, et al. MR elastography of the liver: Defining thresholds for detecting viscoelastic changes [J]. Radiology, 2013, 269(3): 768-776.
- [26] LEE Y, LEE J M, LEE J E, et al. MR elastography for noninvasive assessment of hepatic fibrosis: Reproducibility of the examination and reproducibility and repeatability of the liver stiffness value measurement [J]. Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2014, 39(2): 326-331.
- [27] PEPIN K M, EHMAN R L, MCGEE K P. Magnetic resonance elastography (MRE) in cancer: Technique, analysis, and applications [J]. Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, 2015, 90-91: 32-48.
- [28] KIM D H, YANG J W, KIM M J. Magnetic resonance elastography [J]. Foreign Medical Biomedical Engineering Fascicle, 2007, 8(1): 46-55.
- [29] PATZ S, NAZARI N, SCHREGEL K, et al. Functional neuro-imaging with magnetic resonance elastography [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(5): 3492-3492.
- [30] 朱霞丽, 李炳南, 向旭. 面向磁共振弹性成像的数值建模与仿真研究 [J]. 电子学报, 2017, 45 (6): 1483-1489.