

基于有限元分析的脉搏形态三维重构

张爱华^{1,2}, 刘宗福^{1,2}, 林冬梅^{1,2}, 杨力铭^{1,2}

1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050

[摘要] 利用有限元模拟分析的方法获取脉搏的三维形态。基于双目视觉脉搏图像传感器工作原理, 利用三维软件 PRO/E 建立脉搏图像传感器模型, 把建好的模型导入 Abaqus 软件, 应用 Abaqus/Standard 对模型进行静态分析。结合中医切脉思想和双目视觉测量的实验过程, 把整个模拟分析过程分为 4 步: 第 1 步是模拟脉搏跳动, 第 2 和第 3 步模拟切脉过程, 第 4 步模拟中医得到脉搏特征信息。提取模型传感器气囊探头薄膜上不同位置的 130 个特征点, 获取其中一个特征点的一个脉搏周期的脉搏波形, 对提取的 130 个离散特征点利用“三角形”法连接成三维曲面。相比于利用双目视觉测量原理获取气囊探头薄膜上的空间少量离散特征点直接插值构成的三维曲面的方法, 本文方法重构的三维图具有提取的空间离散特征点多, 同等条件下节约了 0.120 379 s 的时间, 更能够切合指感施压下切脉皮肤表面的时空域变化的优点, 为进一步在时空域中提取多种表征脉搏形态的特征奠定了基础。

[关键词] PRO/E 建模; Abaqus; 有限元分析; 三维重构; 双目视觉; 脉搏图像传感

[中图分类号] R318; TP391

[文献标识码] A

[文章编号] 1005-202X(2015)04-0458-06

Finite element analysis for three-dimensional reconstruction of pulse shape

ZHANG Ai-hua^{1,2}, LIU Zong-fu^{1,2}, LIN Dong-mei^{1,2}, YANG Li-ming^{1,2}

1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Key Laboratory of Gansu Province Advanced Control for Industrial Process, Lanzhou 730050, China

Abstract: In this paper, finite element analysis was proposed for the three-dimensional (3D) reconstruction of pulse shape. Based on the principles of binocular vision pulse image sensor, 3D software PRO/E was applied to establish the model of pulse image sensor. The established model was transferred into Abaqus software. And the Abaqus/Standard was applied to carry on the static analysis for the model. Combined the pulse-feeling in traditional Chinese medicine with binocular vision measuring, the whole simulation analysis was divided into four steps. Firstly, the pulsing was simulated. Secondly and thirdly, the pulse-taking was simulated. Fourthly, pulse features were simulated to be obtained. From different locations on the gasbag probe thin film of the sensor model, 130 feature points was extracted. And the cycle pulse wave of one of feature points was obtained. The “triangle” method was applied to get 3D surfaces for the 130 discrete feature points. Compared with the 3D surfaces constructed by the direct interpolation of few space discrete feature points from gasbag probe thin film based on the principles of binocular vision measurement, the 3D surfaces reconstructed by the proposed method had more space discrete feature points. The proposed method saved 0.120 379 seconds under the same conditions and it was more suitable for the temporal-spatial changes of the skin surface under pulse taking. The proposed method lays a foundation for the further research on the extraction of temporal-spatial pulse information and characteristics.

Key words: PRO/E modeling; Abaqus; finite element analysis; three-dimensional reconstruction; binocular vision; pulse image sensor

前言

脉诊又称切脉、持脉、把脉、候脉等, 是医生用手

指对患者身体某些特定部位的动脉进行切按, 体验脉动应指的形象, 以了解身体状况, 辨别病症的一种诊察方法。脉诊有着悠久的历史, 在长期的实践中, 脉诊得到了历代医家的普遍重视, 其理论和临床应用也不断得以发展和完善, 成为中医最具特色的诊断方法之一。脉象是依靠医者手指的灵敏触觉加以经验而识别的, 长期以来对脉象的判断缺乏客观的

[收稿日期] 2015-02-10

[基金项目] 国家自然科学基金(81360229); 教育部博士点基金(20116201110002)

[作者简介] 张爱华(1964-), 女, 教授, 主要研究方向: 生物医学信号检测与处理。Tel: 13619326171; E-mail: lutzhangah@163.com。

量化指标和标准^[1]。近年来,中医脉诊的客观化与科学化一直是国内外学者研究的热点。各种脉象传感器和相应信息获取方法层出不穷,常见的有压力、光电、PVDF等各种原理的脉搏信息检测传感器^[2-6]。然而上述传感器及处理方法得到的脉搏信号多为脉搏搏动随时间变化的一维信息,虽然能描述人体桡动脉的搏动情况,但是相对于脉搏三维信息仍显不足。

为了获取脉搏三维数据信息,课题组开发研制了双目视觉脉搏图像传感器。基于双目视觉测量原理,通过相机标定、图像采集、特征点提取、图像匹配、三维离散特征点获取,对提取的离散特征点插值构成三维曲面,从而获得每瞬时脉搏搏动的三维形态^[7]。上述过程中得到的三维离散特征点比较少,需要通过插值来构成光滑的三维曲面。目前的插值方法主要有^[8]:最邻近插值、双线性插值、双三次插值、“V4”插值等,每种插值方法都有其优点和缺点。由于脉搏跳动的幅度非常微小,致使双目视觉脉搏图像传感器的探头薄膜形变极其微小,基于双目视觉测量原理获取的少量三维离散特征点,通过插值来构成光滑的三维曲面存在一定的误差。因此,本文依据双目视觉脉搏图像传感器工作原理,提出利用有限元软件Abaqus对双目视觉脉搏图像传感器模型进行模拟分析的方法,来获取脉搏的三维信息。从传感器探头模型上可以提取较多离散特征点,对离散特征点利用“三角形”法连接成光滑的三维曲面,这样能够解决通过双目视觉测量原理提取空间离散特征点少并进行插值所得三维曲面存在误差的问题,实验证明通过本文方法重构的脉搏三维曲面更能切合脉搏的三维变化形态。

1 双目视觉脉搏图像传感器工作原理

双目视觉脉搏图像传感器主要由两个摄像机、薄膜探头、充气装置等模块组成,结构如图1所示。

传感器工作原理:采集数据时首先向密封腔内充气,使软性探头网格薄膜微微鼓起,将受测者手腕固定,然后将鼓出的探头网格化薄膜垂直放在手腕处,使手腕桡动脉与气囊探头薄膜接触。此时,薄膜随手腕桡动脉脉搏的搏动而运动,通过双目摄像头在均匀光照下采集随脉搏波动的薄膜图像,送到计算机进行处理。其中最为核心的部分就是用于测量人体脉搏信息的薄膜探头,在进行脉搏形态的三维重构时,重构的就是探头薄膜在不同时刻的变形形态。

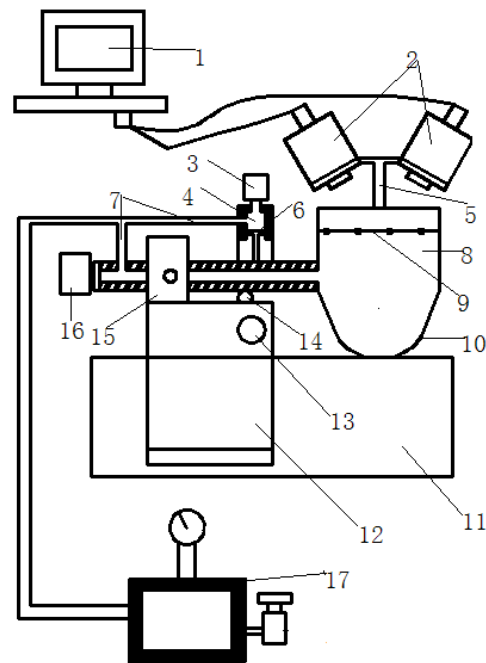


图1 脉搏图像传感器结构图

Fig.1 Structure diagram of pulse image sensor

Note: 1: Computer; 2: Camera; 3: Pressure load sensor; 4: Air cylinder; 5: Camera bracket; 6: Piston; 7: Air inlet; 8: Seal cavity; 9: Lighting; 10: Grid probe film; 11: Wrist; 12: Fixed the wrist spring; 13: Elastic button; 14: Fulcrum ball; 15: Hinge base; 16: Probe pressure sensor; 17: Pump

2 双目视觉脉搏图像传感器建模

利用三维通用软件PRO/E^[9],根据中医切脉的实际情况和影响脉搏跳动的因素要求,建立供分析用的双目视觉脉搏图像传感器几何模型。为了方便后续分析,建模时作了一些简化,因为传感器模型是轴对称模型,所以建立一半模型如图2所示。其中管壁和探头模拟双目视觉脉搏图像传感器中的密封腔和气囊探头薄膜;皮肤和桡动脉血管模拟手腕。

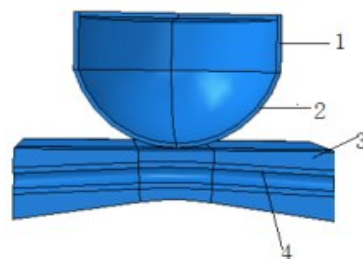


图2 脉搏图像传感器物理模型图

Fig.2 Physical model of pulse image sensor

Note: 1: Tube wall; 2: Probe; 3: Skin; 4: Radial artery

3 脉搏特征信息提取

把建好的双目视觉脉搏图像传感器模型导入Abaqus软件进行模拟分析^[10]。模拟分析过程中,在材料定义分析时,定义探头薄膜为理化性较好的橡胶材料、与探头接触的手腕皮肤为超弹性泡沫、桡动脉血管为超弹性体材料,各材料特征参数由相关资料查阅得知^[11]。根据双目视觉实际测量实验,在模拟分析时需要保持探头和手腕固定,因此施加边界条件和载荷,如图3所示。其中施加的载荷包括3部分:

(1)切脉压力(图3中A点向下箭头所示);(2)桡动脉管径向搏动力(图3中桡动脉血管受力箭头所示);(3)气囊探头充气压力(图3中气囊探头内部箭头所示)。

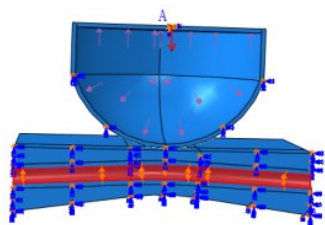


图3 模型上施加的边界条件和载荷示意图
Fig.3 Schematic diagram of the boundary condition and load applied on the model

由手腕皮肤表面特征点的变化可以看出整个模拟分析过程,因此提取手腕“皮肤”表面的一个输出特征点,如图4中B点所示,在整个分析过程中,B点的空间Z坐标变化如图5所示。

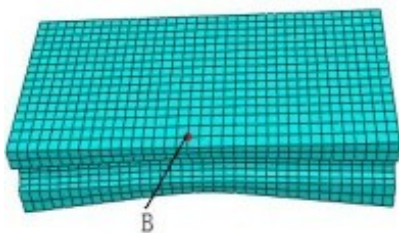


图4 手腕输出特征点
Fig.4 Output feature points on wrist

结合中医切脉和双目视觉测量的实际实验过程,把整个模拟过程分为4步。由图5知,0 s~0.875 s (0.875 s是设定的一个脉搏周期)这一时间段桡动脉脉搏跳动是一个脉搏周期,这是分析过程的第1步,这段时间相当于中医在切脉之前桡动脉脉搏在跳

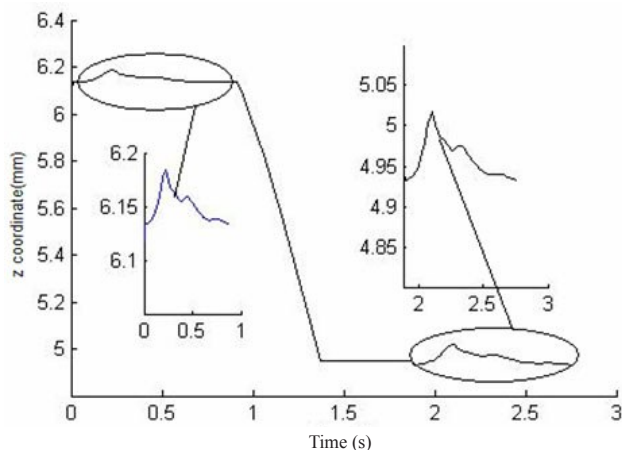


图5 输出特征点B点Z坐标变化
Fig.5 Changes in Z axis of output feature point B

动;0.875 s~1.875 s是向传感器探头充气 and 施加载荷的时间,这段时间相当于中医切脉时按压桡动脉,也是分析过程的第2步和3步;当充气 and 施加载荷稳定后,也就是中医在找到合适的切脉压力后,桡动脉脉搏跳动波形如图5中1.875 s~2.75 s这段时间所示,这是分析过程的第4步。1.875 s~2.75 s这段时间内的脉搏特征就是中医判断生理病症的依据,对这一脉搏周期各时刻的脉搏形态进行三维重构,观察分析脉搏的三维形态变化,可获取相关脉搏特征及表现人体生理病症变化的信息。

因为气囊探头薄膜紧贴手腕皮肤表面,脉搏的波动通过手腕皮肤表面特征点的变化反映出来,同时也通过薄膜上特征点的变化呈现出来。提取气囊探头薄膜上的130个特征点,如图6所示。其中C点的空间Z坐标在1.875 s~2.75 s这一个脉搏周期内的变化波形如图7所示。其它129个特征点的空间Z坐标波形与C点类似。从www.physionet.org网站上的数据库提取的24岁~35岁正常人的一个脉搏周期的桡动脉脉搏变化如图8所示。对比图7和图8可知,利用有限元模拟分析能够很好地获取手腕桡动脉脉搏波形。

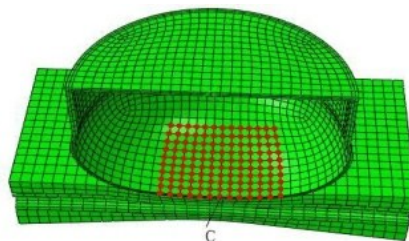


图6 探头网格化薄膜输出特征点
Fig.6 Output feature points on probe grid thin film

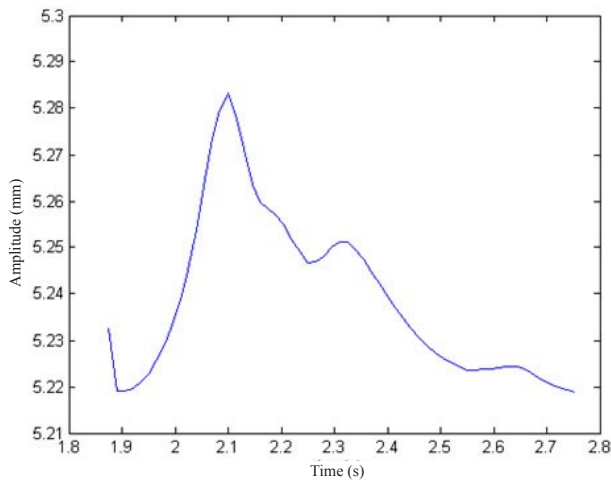


图7 输出特征点C点Z坐标变化
Fig.7 Changes in Z axis of output feature point C

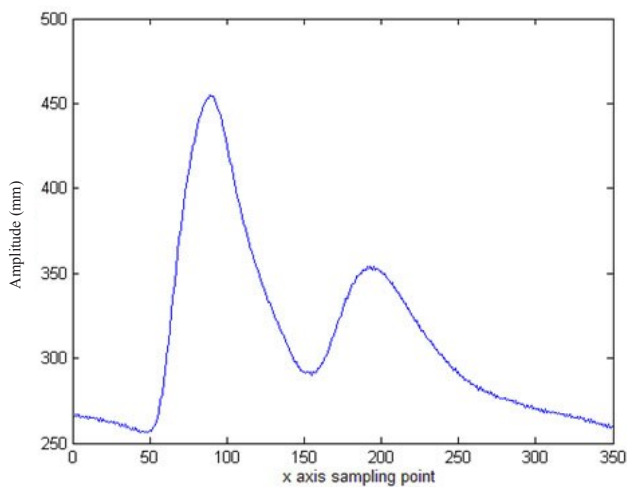


图8 正常人脉搏变化图
Fig.8 Pulse graph of normal people

4 脉搏形态三维重构

4.1 Abaqus 分析的脉搏形态三维重构

图6中130个特征点中每一个特征点的Z坐标变化都能表征脉搏的变化。因此,可对这130个特征点包含的区域进行各个时刻脉搏形态的三维重构,得到脉搏形态的时空域变化图。例如,要对图7所示2.1 s时刻即脉搏主波时刻进行脉搏形态的三维重构,首先应提取空间130个离散特征点,分布如图9所示。从图9可以看出得到的是脉搏形态的空间离散点的值,点与点之间的情形是未知的,更不能构成平面或曲面。为了使该时刻的形态能真实地显示出来,利用“三角形”法把空间离散点剖分连接成光滑三维曲面^[12]。由于“三角形”法可以表示复杂拓扑形体,能任意精度逼近物体曲面,又因为气囊探头薄膜图案

是四边形网格,如图10所示,两个三角形可以组成一个四边形网格,这样利用“三角形”法把空间离散点连接成三维曲面,构成的脉搏形态三维图更能切合双目视觉实际实验中探头网格化薄膜的变化形态。

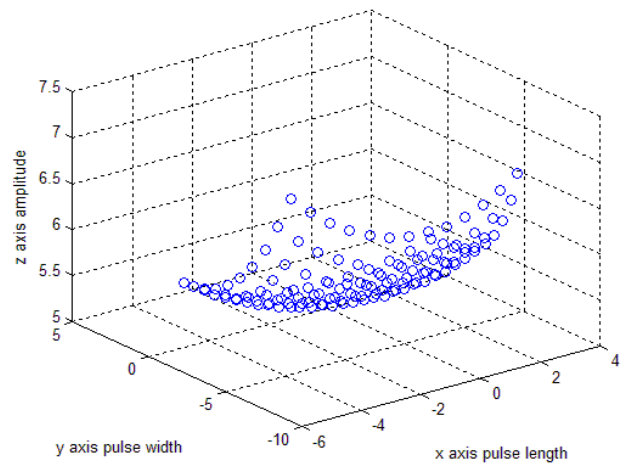


图9 空间离散特征点
Fig.9 Space discrete feature points



图10 气囊探头薄膜
Fig.10 Gasbag probe thin film

三角形法的基本思想:首先以离散点的中心生成一个三角形,然后以其中的3条边为基础向3个不同的方向寻找满足要求的点,得到新的三角形,再以新的三角形为基础向四周扩展,直到循环扩展完所有三角形。三角形的扩展应满足异侧准则、法向量的夹角最大准则、阈值距离准则、最小内角最大准则及边的最大使用次数准则。

利用“三角形”法对图9离散特征点进行剖分连接成三维曲面,如图11所示。

4.2 基于双三次插值的脉搏形态三维重构

通过双目视觉脉搏图像传感器实验,基于双目视觉测量原理,得到的脉搏主波时刻左右两幅脉搏图像的匹配结果如图12所示。因为传感器是轴对称

模型,在利用有限元模拟分析时对模型进行了简化,为了与有限元模拟分析得到的脉搏形态三维图进行对比分析,因此提取匹配特征点对称一半的空间离散点如图13所示,从图13可以看出提取的空间离散点较少,为了使构造的三维曲面光滑,通过双三次插值得到130个特征点并进行重构的三维曲面图如图14所示。

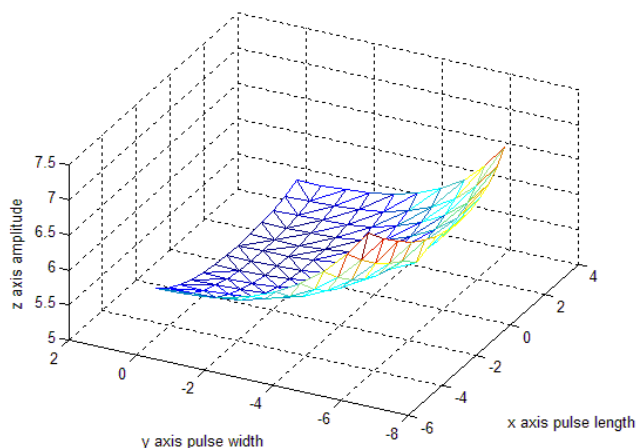


图11 主波三维图

Fig.11 Three-dimensional (3D) graph of the main wave

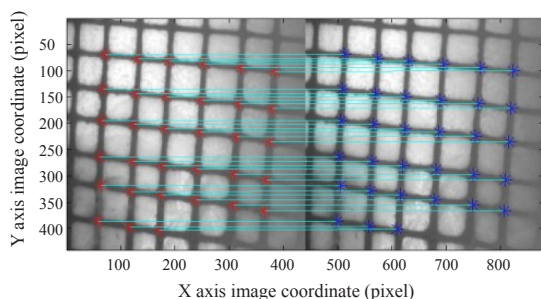


图12 匹配图

Fig.12 Matching graph

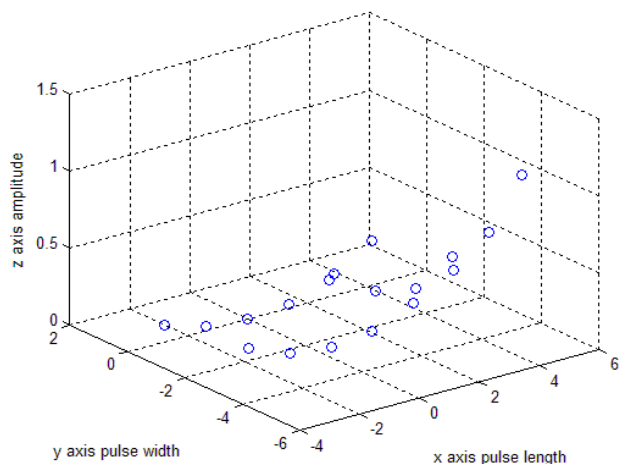


图13 匹配特征点的空间分布图

Fig.13 Spatial distribution of matching feature points

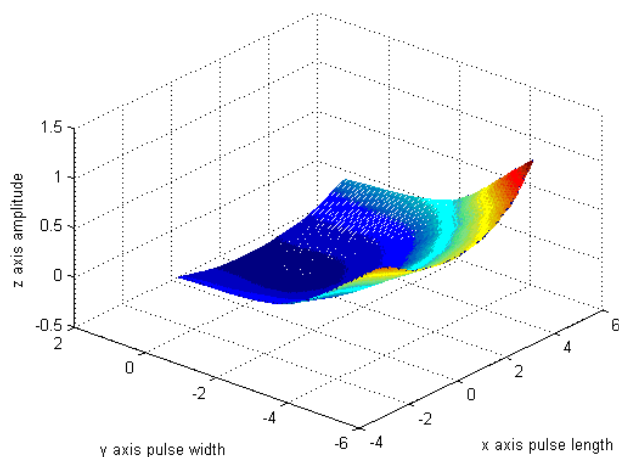


图14 插值三维图

Fig.14 3D interpolation graph

5 结果与分析

由图11和图14的三维图可知,两种方法重构的脉搏形态三维图都能够体现出脉搏的三维形态变化,但是由于脉搏的跳动幅度极其的微小致使气囊探头薄膜的变化也极其微小,因此,若提取的空间点过少,仅通过插值来构成光滑的三维曲面,在微小的细节上存在一定的问题。所以利用本文方法相比双目视觉测量原理得到的脉搏形态三维图优势具体表现在以下3个方面:

(1)提取的空间离散点多。从图13和图9可知,在相同的区域利用双目视觉测量原理得到了18个离散特征点,然而通过有限元模拟得到了130个离散特征点。

(2)脉搏三维形态更切合实际。从图14可以看出构造的三维曲面过于平滑,而实际上气囊探头薄膜与桡动脉接触的区域受到的脉搏搏动力大小不均匀致使气囊探头薄膜变化形式呈现出光滑微小的凸凹形态,图11能体现该特点。

(3)节约时间。通过双三次插值得到的三维曲面消耗的时间多于利用“三角形”法连接成三维曲面的时间,实验证明(软件:Matlab R2010a,计算机配置: Intel E4600 双核处理器,主频 2.4 GHz,内存 1.5 GB)通过双三次插值构造的三维曲面所用时间是 0.405 365 s,而利用三角形法连接成三维曲面的时间是 0.284 986 s。

因此通过本文方法所构成的三维曲面更能切合指感施压下切脉皮肤表面的时空域变化,且节约了时间。另外,本文方法的结果为基于双目视觉测量原理的结果提供了参考,进一步发现了其不足,为提

高双目视觉脉搏测量及三维重构的精度提供了参考依据。

6 结 论

本文基于双目视觉脉搏图像传感器工作原理, 利用PRO/E建立传感器模型, 运用Abaqus有限元软件对传感器模型进行模拟分析得到脉搏形态三维图。利用本文方法所重构的脉搏形态三维图, 解决了基于双目视觉测量原理得到的空间离散特征点少、通过插值构造的三维曲面存在误差的问题, 使指感施压下切脉皮肤表面的时空域变化得以呈现。

本文现阶段仅对脉搏的形态进行三维重构, 没有对三维形态图进行分析, 在此基础上结合中医对脉搏一维图的分析方法对重构的脉搏形态三维图进行时空域分析, 能够提取更多的脉搏特征信息, 为中医诊断给出许多有价值的信息, 这将是下一步的工作。

【参考文献】

- [1] 李灿东, 吴成玉. 中医诊断学[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2012: 103-108.
Li CD, Wu CY. Diagnostics of Traditional Chinese Medicine[M]. Beijing: China Press of Traditional Chinese Medicine, 2012: 103-108.
- [2] Shu JJ, Sun YG. Developing classification indices for Chinese pulse diagnosis[J]. Complement Ther Med, 2007, 15(3): 190-198.
- [3] 林冬梅, 张爱华. 基于图像熵的脉搏波提取算法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(9): 3731-3738.
Lin DM, Zhang AH. A novel pulse wave extraction algorithm based on image entropy [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(9): 3731-3738.
- [4] Lin Y, Leng H, Yang G, et al. An intelligent noninvasive sensor for driver pulse wave measurement[J]. IEEE Sens J, 2007, 7(5): 790-799.
- [5] 蔡铁珩, 沈兰荪, 黄祥林. 脉象分析仪的研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2002, 16(4): 55-58.
Cai YH, Shen LS, Huang XL. Progress of the pulse analytical instruments[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2002, 16(4): 55-58.
- [6] 张爱华, 周义勇, 朱亮. 图像化脉象采集装置的研制[J]. 传感器技术学报, 2006, 19(4): 1261-1263.
Zhang AH, Zhou YY, Zhu L. Development of pulse acquisition device based on image [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(4): 1261-1263.
- [7] 王平. 基于视觉测量的脉搏信息检测[D]. 兰州: 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 2014.
Wang P. Pulse information detection method based on vision measurement[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology College of Electrical and Information Engineering, 2014.
- [8] 苏金明. MATLAB 实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 255-258.
Su JM. MATLAB practical tutorial [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 255-258.
- [9] 钟日铭. Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 427-434.
Zhong RM. From the introduction to the master of Pro/ENGINEER Wildfire 5.0[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 427-434.
- [10] 刘展. ABAQUS6.6 基础教程与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 242-256.
Liu Z. Basic tutorial and example of ABAQUS6.6 [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008: 242-256.
- [11] Schneider MS, Borkow JE, Cruz IT, et al. The tensiometric properties of expanded guinea pig skin[J]. Plast Reconstr Surg, 1988, 81(3): 398-403.
- [12] 赵杰, 程晓亮, 于舒春. 一种新的空间离散点集的直接三角剖分方法[J]. 机械工程师, 2006, 16(11): 46-48.
Zhao J, Cheng XL, Yu SC. A new approach of directly triangulation of 3D scattered points[J]. Mechanical engineer, 2006, 16(11): 46-48.