

虚拟现实显示系统在超声引导穿刺手术中的应用

吕留帅^{1,2}, 王广志², 黄毅斌³, 吴剑¹

1. 清华大学深圳研究生院生物医学工程研究所, 广东 深圳 518055; 2. 清华大学医学院生物医学工程系, 北京 100084; 3. 深圳市中医院超声科, 广东 深圳 518033

【摘要】目的:虚拟现实技术可为临床医生在微创手术实施过程中增加空间立体感,提高手术的完成质量。为此,本文提出了一种应用于超声引导穿刺手术的无线头戴式三维显示系统。**方法:**本文提出三维显示系统利用跟踪设备跟踪头戴虚拟现实显示设备(HMD)、手术器械和超声图像,并在虚拟三维场景中的相应位置绘制它们的三维模型。图形工作站根据人眼的位置,构建出左右视角虚拟图像,并实时传输到头戴显示设备上。由于左右视角的视差,大脑产生强烈的立体感。**结果:**利用本系统进行穿刺实验,穿刺平均时间为24.33 s,相对于使用传统电脑屏幕作为显示设备的60.40 s,时间减少了59.7%,易用性大大提高,并保持了超声探头标定精密度和精确度分别为1.42 mm和1.12 mm。**结论:**本文提出的虚拟现实系统能够大大缩短超声引导穿刺手术的穿刺时间,提高手术的完成速度和质量。

【关键词】虚拟现实;超声手术导航;头戴显示设备;穿刺

【中图分类号】R318.6

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2016)08-0810-04

Application of virtual reality display system in ultrasound-guided puncture surgery

LÜ Liu-shuai^{1,2}, WANG Guang-zhi², HUANG Yi-bin³, WU Jian¹

1. Research Institution of Biomedical Engineering, Shenzhen Graduate School of Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 2. Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Department of Ultrasound, Shenzhen Traditional Chinese Medicine Hospital, Shenzhen 518033, China

Abstract: Objective Virtual reality technology can increase stereo feeling for clinicians in minimally invasive surgery, and improve the surgical quality. A new kind of wireless head mounted three-dimensional (3D) display system used for ultrasound-guided puncture surgery is introduced in the paper. **Methods** The tracking device of 3D display system was used to track head mounted display (HMD), surgical instruments and ultrasound image, and their 3D models were created at corresponding positions in a virtual 3D scene. Based on the current position of eyes, the virtual images of the left and right perspectives were constructed by graphics workstation and transmitted to HMD in real-time. Brain would produce strong stereo feeling for the parallax of the left and right perspectives. **Results** The average puncture time of proposed system and the display of traditional computer screen were respectively 24.33 s and 60.40 s, which showed the puncture time of proposed system reduced by 59.7%, significantly improving the usability. And the ultrasound probe calibration precision and accuracy of the proposed system were 1.42 mm and 1.12 mm respectively, which met the requirement of surgery. **Conclusion** The proposed virtual reality system can greatly shorten the puncture time and improve the quality and speed of operation.

Key words: virtual reality; ultrasound surgical navigation; head mounted display; puncture

前言

【收稿日期】2016-04-03

【基金项目】深圳市基础研究项目(JCY20140408153331811);清华大学深圳研究生院交叉基金

【作者简介】吕留帅,男,硕士,研究方向:超声手术导航, E-mail: llsh10129@qq.com

【通信作者】吴剑,男,博士,副教授,博士生导师,研究方向:微创介入治疗技术和手术导航技术, Tel:0755-26036353, E-mail: wuj@sz.tsinghua.edu.cn

微创手术具有创伤小、疼痛轻、恢复快等优点,大部分手术正在朝着微创手术的方向发展。但是越来越小的创口不可避免地导致越来越小的视野和操作空间^[1]。为此,各种图像引导的手术导航系统不断面世以解决这个问题,手术精确度得以大大提高^[2]。现在已经有一些临床可用的手术导航设备,如 eN-Light and NavSuite(Stryker Corporation, USA), Portable Nanostation(Praxim, France)和 MATRIX POLAR(Scopis medical/XION, Germany)等。另外,很多研

究机构也提出了他们的导航系统,如TUSS (Queen's University, Canada), VISIT (University of Vienna, Austria)等^[3-7]。但是这些系统都是使用电脑屏幕来显示导航信息,如手术路径、手术器械的三维模型以及各种模态信息,如超声二维图像、CT/MRI 三维图像。手术时,医生不得不在病人和屏幕之间来回切换视野,很不方便,并且影响手术的连续性^[2]。

头戴显示设备的显示视角可以和佩戴者的视角完全重合,显示效果相对于传统二维屏幕更加立体真实。现在,越来越多的头戴显示设备出现在市场上,如 Google Glass、Oculus rift、HTC Vive 等。各种头戴显示设备^[8-9]也被提出以满足手术要求,但是,这些设备或笨重、或昂贵,不利于普及和使用。随着近些年来高清显示设备的快速发展,手机显示屏幕已经达到了 4K 级别(如 Sony Z5 Premium),PPI (Pixel Per Inch)超过了 800,NTSC (National Television Standards Committee)色域超过 70%,这样高质量的显示设备也能很好的满足头戴式显示设备的显示要求。

基于此,本文研究了虚拟现实显示系统在超声引导穿刺系统的应用,该系统利用手机屏幕作为显示设备,并利用手机自带的无线网络通信(Wireless Fidelity, WIFI)模块,将工作站渲染好的三维场景图像实时传输到手机上。另外,本系统跟踪头戴虚拟现实显示设备(Head-Mounted Display, HMD)佩戴者头部的位,实时绘制佩戴者双目视角图像,不仅提供给佩戴者强烈的立体感,也方便佩戴者通过改变头部位置,调整视角,完成视野缩放,以达到轻便、易用,方便手术的目的。

1 系统和方法

1.1 系统构成

本系统的硬件设备包括:图形工作站、超声成像设备、图像采集卡、空间跟踪设备、全浸式头戴显示设备;软件部分:我们利用 Public Library for Ultra-Sound (PLUS)^[10]采集超声图像数据和空间定位设备的数据到图形工作站上,利用 3D Slicer^[11]作为数据处理平台,进行数据处理、三维场景渲染和视角调整等工作,整个系统如图 1 所示。为方便讨论,本文定义如下坐标系:W——世界坐标系,即空间定位系统固定端坐标系,H——固定在 HMD 上的位置跟踪器的坐标系,S——固定在超声探头上的位置跟踪器的坐标系,I——超声图像坐标系,N——固定在穿刺针上的位置跟踪器的坐标系,D——HMD 显示屏幕坐标系,定义以屏幕所在的平面为坐标轴的 XOY 平面。

同时约定,点 P 在坐标系 A 中的坐标表示为 P_A ,

从坐标系 B 到坐标系 A 的变换矩阵表示为 $T_{A \leftarrow B}$,即 $P_A = T_{A \leftarrow B} \times P_B$ 。

1.2 手术设备的标定

手术前需要通过超声探头标定和穿刺针标定来确定超声平面 I 和跟踪器 S 的空间位置关系 $T_{S \leftarrow I}$ 以及穿刺针 T 相对于跟踪器 N 的空间位置关系 $T_{N \leftarrow T}$,系统才能通过跟踪器 S 和跟踪器 N 确定超声平面和穿刺针的准确位置和姿态。我们采用 N 线模型^[12-14]对超声探头进行标定,采用旋转校正(Pivot Calibration)的方法^[15]对穿刺针进行标定。

1.3 立体现实系统

如图 1 所示,该系统利用空间定位设备跟踪 HMD、手术器械、超声图像和病人,根据它们的位置和姿态,图像工作站在三维场景中的相应的位置分别绘制出他们的三维模型和图像,构成一个虚拟的,和真实环境准确对应的三维场景。

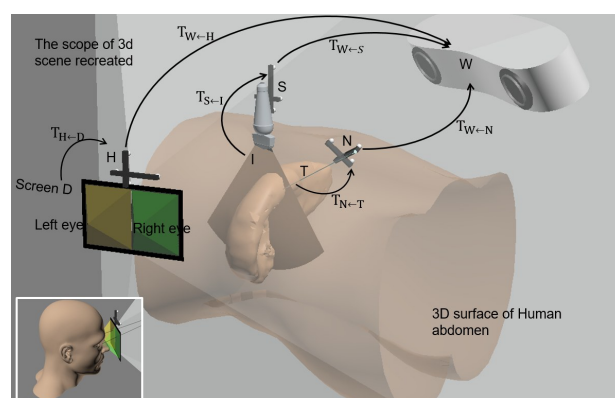


图1 全浸式头戴显示设备应用于超声引导手术

Fig.1 Full immersion head-mounted display (HMD) used for ultrasound-guided puncture surgery

通过测量估算出坐标系 H 中左右眼的位置 $P_{E1,H}$ 和 $P_{E2,H}$,以及屏幕坐标系 D 到坐标系 H 的变换矩阵 $T_{H \leftarrow D}$ (默认屏幕在 XOY 平面,视线的正方向为 $\vec{OZ} = (0,0,1,1)^T$),系统通过空间定位设备获取 $T_{W \leftarrow H}$,求得 $P_{E1,W} = T_{W \leftarrow H} \times P_{E1,H}$, $P_{E2,W} = T_{W \leftarrow H} \times P_{E2,H}$ 和视线正方向 $T_{W \leftarrow H} \times T_{H \leftarrow D} \times \vec{OZ}$,根据手机屏幕宽度和双眼到屏幕的距离设定视角大小 α ,系统的软件平台根据以上参数绘制左右视角下整个虚拟场景的图像,并通过 WIFI 将图像传输到手机上并显示在屏幕 D 的左右屏。

由于左右视角视差的存在,HMD 佩戴者会产生强烈的空间立体感^[16]。另外,系统会根据 HMD 和其他手术的位置变化实时更新屏幕 D 上显示的图像:医生可以通过改变头部位置以调整视野的大小和方向,方便操作。使用透明、融合等显示方法,显示实际中看不到的部位,如皮肤下的肝脏、手术器械、肿

瘤或靶点,以方便手术进行。

2 实验和结果

精度是一个手术导航系统的关键,我们做了多次试验对超声引导穿刺系统做了评估,主要包括穿刺针和超声探头的标定精度。其中,对穿刺针标定的均方根误差为0.58 mm。而对于超声探头标定,我们分别使用CR(Calibration Reproducibility)^[17]和PRA(Point Reconstruction Accuracy)^[18]来评估精密度和精确度,分别达到了(1.42±0.54) mm和(1.12±0.14) mm。

与精度一样,易用性也是评价一个系统的重要指标,因此,我们设计了模拟穿刺实验,评价整个系统的易用性。实验采用的硬件设备:超声成像设备(A6 B/W HCU, SonoScape)、弧形探头(C354, SonoScape)、光学跟踪设备(Polaris Vicra, DNI);工作站(Dell Precision T5600(Xeon E5-2603/8GB/250GB);图像采集卡(DVI2USB3.0, Epiphan);HMD屏幕(LG G3(D857)的手机屏幕5.5寸,2560×1440像素,LGE);线性标定模型。

本实验使用新鲜的肝脏做模拟穿刺实验,如图2所示,将肝脏浸没在盛有纯净水的有机玻璃水槽中,水槽底部有竖起的12根钢钉,钉尖埋藏在肝脏下方或者刺入肝脏,根据钉尖距离水槽底部的高度,分为25 mm靶点、30 mm靶点和35 mm靶点3种。

为验证本系统相对于传统的超声导航系统(采用传统二维屏幕作为显示设备)的易用性,实验分为两组:一组要求被试者戴上HMD,如图2所示,HMD中的显示器显示的内容和图中工作站显示器的内容完全一样,如图3所示,标记为A组;另一组要求被试者直接观看显示器进行操作,标记为B组。共有5位被试者参与实验,每个被试者都要参与两组实验,每组实验需要选择3种高度的靶点,将穿刺针的钉尖穿

刺到靶点位置。

本实验使用穿刺时间作为衡量易用性的标准。穿刺之前,利用超声找到穿刺靶点,并标记,被试者开始穿刺,此时开始计时,到被试者确定穿刺完成,计时终止。穿刺结束后,笔者会固定好穿刺针,剖开肝脏检查穿刺完成程度,如果穿刺针针尖没有到达靶点位置,则本次穿刺无效。穿刺时间结果如表1所示,A组平均穿刺时间为24.3 s,远少于B组的60.4 s,说明本系统大大提升了易用性。

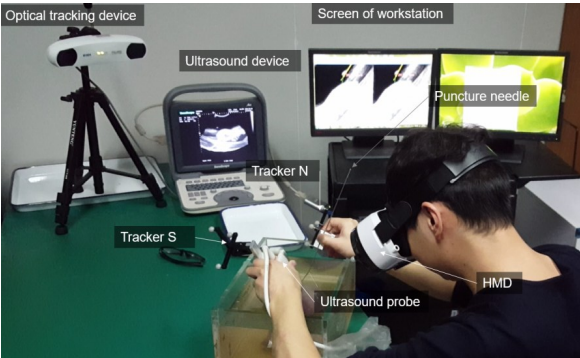


图2 被试者戴HMD进行穿刺实验
Fig.2 Puncture experiment with HMD

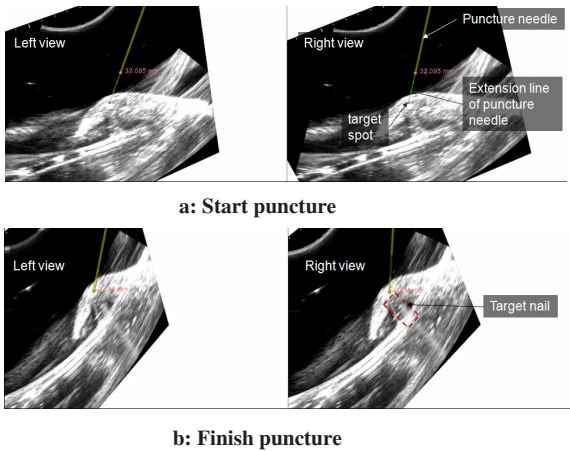


图3 穿刺时头戴显示设备屏幕显示的图像
Fig.3 Image displayed in HMD during puncturing

表1 实验穿刺时间(s)
Tab.1 Puncture time in experiment(s)

Subject	Group A			Group B		
	25 mm target	30 mm target	35 mm target	25 mm target	30 mm target	35 mm target
A	25.0	19.0	23.0	56.0	43.0	45.0
B	30.0	18.0	25.0	60.0	50.0	55.0
C	32.0	25.0	26.0	75.0	59.0	65.0
D	28.0	22.0	20.0	65.0	70.0	63.0
E	24.0	26.0	22.0	76.0	66.0	58.0
Average	27.8±3.3	22.0±3.5	23.2±2.4	66.4±8.9	57.6±11.1	57.2±7.9
Overall average		24.3±3.9			60.4±9.8	

3 讨论和总结

本文的模拟穿刺实验使用的水槽,不仅作为盛放肝脏容器,也对应手术中病人的身体。水槽上固定有定位设备,可以将水槽注册到世界坐标系W中,给医生一个大致的操作空间,类似的,可以通过配准算法将人体注册到世界坐标系统,并在HMD中显示虚拟人体和虚拟器官,由于肝脏放在水槽后已严重变形,我们并没有绘制三维模型,而是用水槽的三维模型来模拟人体。

本系统并没有对人眼和屏幕D的位置进行高精度的测量,而是进行了大致的估计,一方面,对这两个参数的测量精度并不会影响三维场景中其他手术器械之间的相对位置关系,也不会影响导航系统精度,只会对设定的视角有些许影响,导致设定视角和双眼真实视角有些许偏差,但是这并不会对操作和体验有太大影响,另外,系统用户界面也有视角相关参数调整,用户可以根据自身条件进行设定;另一方面,即便在佩戴时对双眼位置做了准确的测量,也会因为佩戴过程中眼球旋转和焦距的调整而导致真实视角发生变化,以至于设定视角和真实视角产生偏差。

上述的实验结果表明本系统不仅在精度方面达到了手术可接受的范围,在易用性方面也好于传统使用电脑屏幕作为显示设备的导航系统。一方面是因为基于虚拟现实的HDM提供的双目视角图像相比于传统的二维显示设备立体感更强烈,另一方面,本系统提供给手术医生的是实时的第一视角的双目图像,不再需要像传统导航那样要通过其他操作来改变视角,这些都简化了手术操作,方便手术进行,减少手术时间和病人痛苦,提高完成质量。

本系统还有一些技术方面的问题需要将来进一步探索和研究。首先,本系统采用的空间定位设备Polaris Vicra的有效定位空间为273mm×69 mm×69 mm,相对较小,一款测量范围更大的空间定位设备如Polaris Spectra(其有效定位空间为613 mm×104 mm×86 mm)更能满足系统要求。另外,本系统利用无线局域网进行图像数据传输,这样的设计带来便捷性的同时也增加了系统延时,另外图像工作站对三维场景的绘制时间也进一步增加延时,实时性表现有些许的影响。将来,我们需要更新硬件性能,优化算法以减少延时。

【参考文献】

[1] LINTE C A, MOORE J, WILES A D, et al. Virtual reality-enhanced ultrasound guidance: a novel technique for intracardiac interventions

- [J]. Comput Aided Surg, 2008, 13(2): 82-94.
- [2] CHEN X, XU L, WANG Y, et al. Development of a surgical navigation system based on augmented reality using an optical see-through head-mounted display[J]. J Biomed Inform, 2015, 55: 124-131.
- [3] KREISSL M E, HEYDECKE G, METZGER M C, et al. Zygoma implant-supported prosthetic rehabilitation after partial maxillectomy using surgical navigation: a clinical report[J]. J Prosthet Dent, 2007, 97(3): 121-128.
- [4] EWERS R, SCHICHO K, UNDT G, et al. Basic research and 12 years of clinical experience in computer-assisted navigation technology: a review[J]. Int J Oral Maxillofac Surg, 2005, 34(1): 1-8.
- [5] GRUNERT P, DARABI K, ESPINOSA J, et al. Computer-aided navigation in neurosurgery[J]. Neurosurg Rev, 2003, 26(2): 73-99.
- [6] MEYER U, WIESMANN H P, RUNTE C, et al. Evaluation of accuracy of insertion of dental implants and prosthetic treatment by computer-aided navigation in minipigs[J]. Br J Oral Maxillofac Surg, 2003, 41(2): 102-108.
- [7] WATZINGER F, BIRKFELLNER W, WANSCHITZ F, et al. Placement of endosteal implants in the zygoma after maxillectomy: a cadaver study using surgical navigation[J]. Plast Reconstr Surg, 2001, 107(3): 659-667.
- [8] CLEARY K, PETERS T M. Image-guided interventions: technology review and clinical applications[J]. Annu Rev Biomed Eng, 2010, 12: 119-142.
- [9] KELLER K, FUCHS H. Head mounted displays for medical use [J]. J Disp Technol, 2008, 4(4): 468-472.
- [10] LASSO A, HEFFTER T, PINTER C, et al. PLUS: An open-source toolkit for developing ultrasound-guided intervention systems[C]//4th Image Guided Therapy Workshop. 2011: 103.
- [11] PIEPER S, LORENSEN B, SCHROEDER W, et al. The NA-MIC Kit: ITK, VTK, pipelines, grids and 3D slicer as an open platform for the medical image computing community[C]//Biomedical Imaging: Nano to Macro, 2006. 3rd IEEE International Symposium on. IEEE, 2006: 698-701.
- [12] BOUCHET L G, MEEKS S L, GOODCHILD G, et al. Calibration of three-dimensional ultrasound images for image-guided radiation therapy[J]. Phys Med Biol, 2001, 46(2): 559.
- [13] PAGOULATOS N, HAYNOR D R, KIM Y. A fast calibration method for 3-D tracking of ultrasound images using a spatial localizer[J]. Ultrasound Med Biol, 2001, 27(9): 1219-1229.
- [14] 罗杨宇, 徐静, 鲁通, 等. 基于磁定位器的手动三维超声图像标定[J]. 中国生物医学工程学报, 2008, 27(2): 250-254.
- LUO Y Y, XU J, LUO T, et al. Calibration of free-hand 3D ultrasound image based on magnetic tracker [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2008, 27(2): 250-254.
- [15] CHEN X, LIN Y, WU Y, et al. Real-time motion tracking in image-guided oral implantology [J]. Int J Med Robot, 2008, 4(4): 339-347.
- [16] SUTHERLAND I E. A head-mounted three dimensional display [C]//Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I. ACM, 1968: 757-764.
- [17] PRAGER R W, ROHLING R N, GEE A H, et al. Rapid calibration for 3-D freehand ultrasound[J]. Ultrasound Med Biol, 1998, 24(6): 855-869.
- [18] CARBAJAL G, LASSO A, GÓMEZ Á, et al. Improving N-wire phantom-based freehand ultrasound calibration[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2013, 8(6): 1063-1072.

(编辑:薛泽玲)