

应用深度相机的手术导航注册算法研究

杨智坤,何炳蔚,陈水酉,张雅玲

(福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350116)

摘要:手术导航注册是实现手术导航、器械跟踪的关键技术。提出了一种基于深度相机的手术导航注册算法,结合点云配准的相关原理,构建 PCA 点云坐标系,提高了粗点云配准的速度,结合 CPD 精配准算法,完成手术导航注册,通过实验验证了该方法的有效性。

关键词:手术导航;注册配准;主成分分析;深度相机

中图分类号:TP275 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)04-0036-04

Research on Operation Navigation Registration Algorithm Based on Depth Camera

YANG Zhikun, HE Bingwei, CHEN Shuiyou, ZHANG Yaling

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Surgical navigation registration is the key technology in the surgical navigation and instrument tracking. In this paper, a surgical navigation registration method based on depth camera is proposed. According to the relevant principles of point cloud registration, the PCA point cloud coordinate system is constructed, which is used to greatly improve the speed of coarse point cloud registration, and the CPD fine registration algorithm is used to complete the surgical navigation registration. The effectiveness of this method is verified by experiments.

Keywords: surgical navigation; registration; principal component analysis; depth camera

0 引言

在神经外科手术中,手术导航系统可以跟踪手术器械和患者的空间位置,并将位置在显示器中实时显示^[1]。实现手术导航的关键步骤是术前获取病人空间与图像空间的转换关系,这一过程叫做空间注册^[2]。CT 或 MRI 医学图像所在的坐标系称为图像空间坐标系,患者所处的世界坐标系称为实际空间坐标系,两者注册的准确性将直接影响手术导航的精度。

现代无框架式神经外科导航中,病人真实空间与图像空间的注册方法在不断地发展与创新。通常是从图像空间和实际空间中待注册的数据集合,获取转换矩阵^[3]。目前临床上使用较为广泛的两种匹配方法分为基于标记点注册和基于面注册^[4]方法。基于标记点的注册方法是在病人解剖位置黏贴标记点,通过追踪系统捕捉标记点的位置,再与图像空间的坐标系进行注册;基于面注册是通过激光扫描器或 3D 探针获取病人真实空间的脸部几何信息,运用多模图像融合算法得到三维图像中人脸的三维信息,再利用算法关联两个空间的对应信息完成注册。

面注册不同于标记点注册,它无需黏贴标记点,且面注册是一个平均全局效果,克服了标记点注册不准确带来的误差^[5],但常规激光扫描仪获取人脸几何信息时费事费力,本文提出了一种基于深度相机的手术导航注册方法,将面注册问题转换为点云配准问题,有效解决面注册

过程中时效性问题,现介绍如下。

1 数据获取

本文以 2017 年某省立医院收治的一名侧脑室中度扩大的男性患者为研究对象,以该名患者的 CT 及 MRI 图像为原始数据,通过多模融合图像技术、三维重建技术,得到三维虚拟脑模型,如图 1 所示。通过软件可将模型点云化,虚拟模型点云所在的空间为图像空间。

将三维虚拟脑模型转换成 STL 文件,导入 3D 打印机配套软件中,并采用 Objet 350 Connex 彩色打印机。由于该打印机可以打印出不同硬度、不同颜色的模型,且精度高达 0.016 mm,能真实还原人脑颅骨结构,满足医学模型要求。最终完成各部分的实体模型制作,如图 2 所示,该实体模型所在的空间为实际空间。

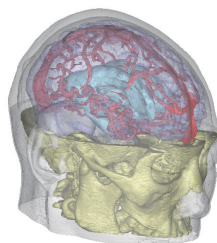


图 1 三维虚拟模型



图 2 三维实体模型

基金项目:福建省医学创新课题项目(2017-CX-14)

第一作者简介:杨智坤(1993—),男,江苏淮安人,硕士研究生,研究方向为手术导航、三维重建。

深度相机因能够感知环境中的深度信息使其具有十分独特的优势,在获取彩色图像的同时得到图像的深度信息,并在标定彩色和红外摄像机相对位置关系后,可快速获取彩色的场景三维点云图^[6]。文中所使用的传输和供电均使用 USB 数据线的 ASUS Xtion Pro 深度摄像机获取实体模型点云,如图 3 所示。



图 3 ASUS Xtion Pro 深度摄像机与深度图

2 基于点云的面注册方法

基于点云的面注册是通过特定的设备和算法获取物体表面特征,这些特征由大量的点构成点云。点云配准过程一般分为粗配准和精配准,本文采用图 4 所示的流程图进行点云面注册。

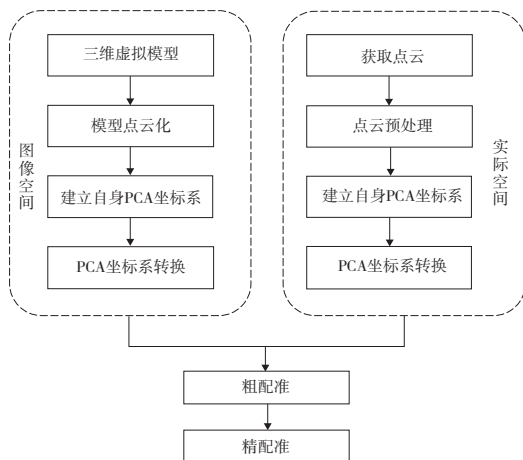
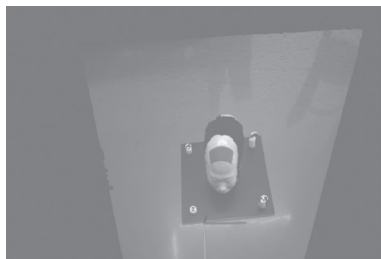


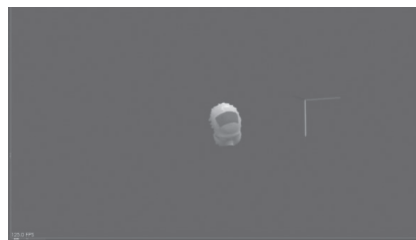
图 4 基于点云的面注册流程图

2.1 点云的预处理

深度相机获取点云过程中受到很多因素的影响,不可避免会产生噪声^[7]。在注册过程中,噪声点云将影响注册的精度,所以注册之前需要去掉噪声点;有时实际场景比较复杂,无效的点云信息较多,因此需要滤除无关的点云信息,完成目标点云的分割。经点云的预处理,可获得有效的点云数据,提高后续点云配准效率。点云预处理效果如图 5 所示。



(a) 点云处理前



(b) 点云处理后

图 5 点云预处理效果对比

2.2 PCA 坐标系原理

PCA(principal components analysis)即主成分分析方法,是一种通过降维的方式将复杂高维相关特征转变为低维独立特征的分析方法^[8]。顾名思义,主成分分析就是对数据提取出主要成分、主要信息,忽略次要的部分,起到降低数据规模的作用。数据中相对变化最突出的部分即为第一主成分,后续每个主成分都正交于前面组件的约束条件,因此得到的向量成分是不相关的正交基集。PCA 坐标变换是正交化的线性变换,即将原有的数据坐标变换到新的坐标系下。通过这种方式获得新的坐标轴,方差较大的方向都包含在前面的坐标轴中,后面的坐标轴包含的方差几乎为 0,因此,只保留前面 3 个坐标轴。

PCA 算法流程如下:

- 1) 以列计算出数据集 X 的平均值 $\bar{X}$,并计算出 $X_n = X - \bar{X}$;
- 2) 求 X_n 协方差矩阵,记为 Σ ;
- 3) 计算协方差矩阵 Σ 的特征值及特征向量;
- 4) 将特征值按从小到大排序,找出最大的几个及对应的特征向量。

以图像空间的头皮点云为例(图 6),其点云的中心点为原点,方差最大的 3 个方向为新坐标系的 x 、 y 、 z 轴,形成 PCA 坐标系下新的点云坐标。

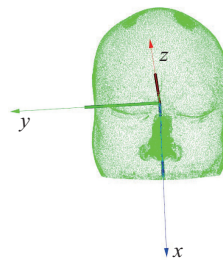


图 6 图像空间头皮点云 PCA 坐标系

2.3 PCA 坐标系下粗配准

确定各自的 PCA 坐标系后,需找到两个 PCA 坐标系之间的关系,设旋转、平移矩阵为 $M_{trans} = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3 \ \lambda_4]^T$,其中 λ_1 为一个四维行向量,设 $A(X) = \text{diag}(a, a, a, a)$ 为对角矩阵,且对角线上所有值都相同,因此旋转、平移矩阵的表达式可表示为:

$$\begin{pmatrix} A(u_1) \\ A(u_2) \\ A(u_3) \\ A(u_4) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A(v_1) \\ A(v_2) \\ A(v_3) \\ A(v_4) \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中: $u_i (i=1,2,3,4)$ 表示图像空间 PCA 坐标系中 3 个主成分向量和 midpoint 坐标; $v_i (i=1,2,3,4)$ 表示实际空间 PCA 坐标系中 3 个主成分向量和 midpoint 坐标。根据上述等式,可以求解得出初配准转换矩阵 M_{trans} ,通过粗配准可将两空间坐标系大致配置在一起,防止后续使用迭代配准算法时陷入局部最优值,而得不到正确结果。

2.4 精配准

近年来,有很多新颖的算法可以克服配准数据初始位置的限制,得到很好的配准效果,但有些算法过程较复杂,所需的时间较长,在对配准速度要求较高的医学上是很少被使用的。CPD (coherent point drift) 一致性点漂移算法是一种基于高斯混合模型 (GMM) 的点云配准算法,2010 年由 MYRONENKO A 等^[9]提出。CPD 算法包括刚性配准和非刚性配准两大类,文中的实体模型点云与虚拟模型点云配准为刚性配准。CPD 算法将两片点云的匹配问题转化为概率密度估计的问题,将其中一片作为 GMM 的质心,另一片点云则是由这些质心生成的数据点集,通过计算概率不断重置质心的位置,使其与数据点集的匹配度最高。

对于给定的两片点云,将目标点云 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}$ 看作是 GMM 的质心,源点云 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 是由 GMM 生成的数据点集,其中 M, N 分别为两片点云中的数目,定义点 x_n 的 GMM 概率密度函数为:

$$p(x_n | m) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{D}{2}}} \exp\left(-\frac{\|t - \varphi(s_m)\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

点云配准就是利用最大对数似然函数或者最小负数对数似然函数的方法不断重置 GMM 的质心,直到两片点云配准概率最大,此时协方差系数 σ^2 也随质心位置变化而变化。设 θ 为 GMM 质心改变的转换参数,即旋转平移参数,则负对数似然函数表示为:

$$L(\theta) = - \sum_{n=1}^N \log \sum_{m=1}^{M+1} p(m) p(x_n | m) \quad (3)$$

求得此时似然函数的最小值,重复迭代参数 θ 和概率密度函数 $p(x_n | m)$ 直到似然函数不再有明显变化,此时参数 θ 即为配准的转换矩阵。

3 实验及结果分析

图像空间与实际空间获得的信息以同样的格式.pcd 传输到计算机中,实现点云配准,本文使用的计算机主要配置为 Windows 10 专业版系统,CPU 为 i7-6700,主频为 3.40GHz,16GB DDR3 内存,NVIDIA GeForce GTX 1070 的显卡,开发软件是 Microsoft Visual Studio 2015 和 Visual C++,使用 MATLAB2016a 辅助显示配准结果。

将图像空间、实际空间转换到各自 PCA 坐标系下,并将它们在同一坐标系下显示,如图 7 所示。经过粗配准,效果如图 8 所示。

根据图 8 可以看出,图像空间点云与实际空间点云已

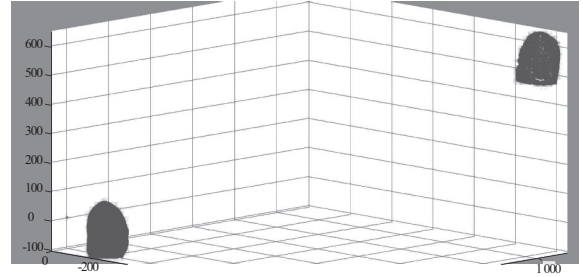


图 7 待配准的图像空间和实际空间头皮信息初始位置

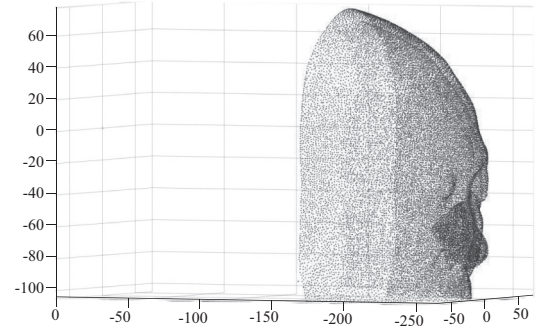


图 8 PCA 坐标系下的粗配准

大致配准。从图 9 和表 1 可以看出本文的算法与传统的 ICP 算法无论是在精度方面还是在误差方面相比有较大的优势,尤其是初始位置相差较大的点云,ICP 算法容易陷入局部最优解,配准效果不佳,本文算法可有效完成配准并得到旋转矩阵,如图 10 所示。对于在医学中,对算法鲁棒性要求较高的环境下,注册精度一般要求在 2 mm 以内,本文算法的精度为 7.56×10^{-4} m,满足要求。

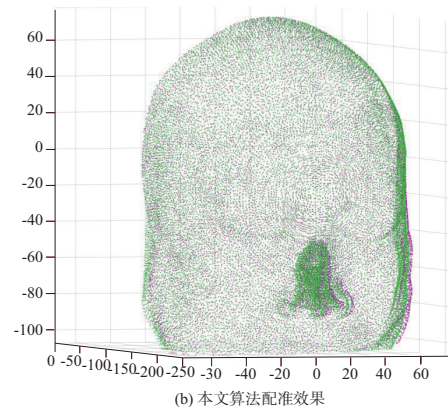
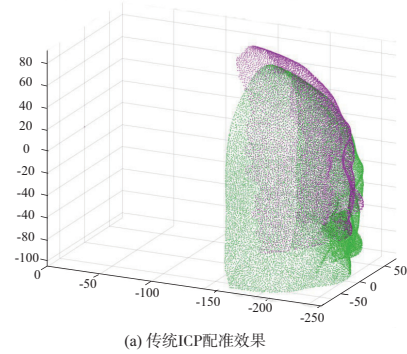


图 9 精配准实验对比

表 1 不同算法下点云配准结果比较

点云名称	传统 ICP 算法		本文配准算法		点云数量
	配准时间/s	配准误差/m	配准时间/s	配准误差/m	
头皮模型	85	4.38×10^{-3}	46	7.56×10^{-4}	40 000 左右
是否配准	否		是		

```

ICP has converged:0 score: 208.925
0.952755 -0.295923 0.0684685 -46.125
0.271002 0.929985 0.248368 1.09811
-0.137172 -0.218079 0.966243 -15.2987
0 0 0 1

```

图 10 获得的旋转矩阵

4 结语

基于深度相机的神经导航注册算法能够在保证精度的情况下,快速地将图像空间与实际空间进行注册,通过 PCA 坐标转换的方法快速完成粗配准,利用 CPD 精配准完成神经导航面注册。本文通过模型对算法进行验证,已证明该算法有较好的配准精度和配准速度,但还未进行临床实验,临床实验还需考虑诸多问题,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 白晶. IGS 系统注册导航和术前计划问题的研究[D]. 北京:清华大学, 2007.
- [2] KART E, STOLL J, JOAN D, et al. Assessment of registration accuracy during computer-aided oncologic limb-salvage surgery[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2015, 10(9):1469-1475.
- [3] 张丽霞. 基于 Kinect 的神经外科手术导航中配准技术的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2015.
- [4] FAN Y, JIANG D, WANG M, et al. A new markerless patient-to-image registration method using a portable 3D scanner[J]. Medical Physics, 2014, 41(10):101-109.
- [5] 苏文魁, 张毓笠, 李冬梅, 等. 手术导航系统及其应用概述[J]. 中国医疗器械杂志, 2010(4):284-288.
- [6] 李建勇, 刘雪梅, 刘雄. 基于 XTION 的机器人室内三维地图实时创建[J]. 机械与电子, 2017(4):71-75.
- [7] 赵夫群, 周明全, 耿国华. 颅骨点云模型的局部特征配准方法[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(8):1120-1127.
- [8] 王育坚, 吴明明, 高倩. 基于保局 PCA 的三维点云配准算法[J]. 光学技术, 2018, 44(5):53-59.
- [9] MYRONENKO A, SONG X. Point set registration: coherent point drift[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(12):2262-2275.

收稿日期:2019-03-25

(上接第 8 页)

- [7] 赵美英. 复合材料机械连接失效分析及强度影响因素研究[D]. 西安:西北工业大学, 2006.
- [8] 张纪奎, 马志阳, 程小全, 等. 复合材料三钉单搭连接有限元模拟与钉载分布[J]. 复合材料学报, 2012, 29(3):179-183.
- [9] 刘向东, 李亚智, 舒怀, 等. 多钉连接钉载分配特性研究方法[J]. 复合材料材料学报, 2013, 30(1):210-217.
- [10] FEO L, MARRA G, MOSALLAM A S. Stress analysis of multi-bolted joints for FRP pultruded composite structures[J]. Composite Structures, 2012, 94(12):3769-3780.
- [11] 张建宇, 刘丰睿, 山美娟, 等. 复合材料多钉连接钉载矢量传感器[J]. 复合材料学报, 2015, 32(5):1420-1427.
- [12] 李鹏, 周晚林, 李蓓, 等. 考虑间隙和拧紧力矩的复合材料钉载分配均匀化方法[J]. 航空学报, 2019, 40(3):290-301.
- [13] LAWLOR V P, MCCARTHY M A, STANLEY W F. An experimental study of bolt-hole clearance effects in double-lap, multi-bolt composite joints[J]. Composite Structures, 2005, 71(2):176-190.
- [14] MCCARTHY M A. An experimental study of bolt-hole clearance effects in single-lap, multi-bolt composite joints[J]. Journal of Composite Materials, 2005, 39(9):799-825.
- [15] 董大龙, 周翔, 汪海, 等. 分层对复合材料机械连接结构承载能力的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(1):61-69.
- [16] TAHERI Behrooz F, KASHANI A R S, HEFZABAD R N. Effects of material nonlinearity on load distribution in multi-bolt composite joints[J]. Composite Structures, 2015, 125:195-201.
- [17] 谢宗燕, 李想, 郭家平, 等. 考虑间隙配合的复合材料钉载分配均匀化方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(4):806-813.
- [18] 孙永波, 董艇舰, 刘昕, 等. 复合材料层板沉头连接钉载分配影

响因素研究[J]. 中国民航大学学报, 2016, 34(3):57-61.

- [19] LANGELLA A, CARBONE R, NELE L, et al. An analytical closed-form model to evaluate the peel and shear stresses in middle plane for adhesively bonded composite single-lap joints[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(1):3-17.
- [20] HYER M W, KLANG E C, COOPER D E. The effects of pin elasticity, clearance, and friction on the stresses in a pin-loaded orthotropic plate[J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(3):190-206.
- [21] 岳烜德, 安鲁陵, 云一坤, 等. 液体垫片对复合材料单搭接螺栓接头力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(1):50-60.
- [22] Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates: ASTM D5961 [S]. US: ASTM International, 2013.
- [23] Standard test method for open hole tensile strength of polymer-matrix composite laminates. ASTM D5766/D5766M-11 [S]. US: ASTM International, 2013.
- [24] Standard terminology for composite materials: ASTM D3878-2007 [S]. US: ASTM International, 2007.
- [25] ARMANIOS E A, BUCINELL R B, WILSON D W, et al. Temperature effects on ultimate bearing strength of polymeric composite joints[J]. Journal of Composites Technology & Research, 2002, 24(1):17-23.
- [26] WALKER S. Thermal effects on the pin-bearing behavior of IM7/PETI-5 composite joints[J]. Journal of Composite Materials, 2002, 36(23):2623-2651.

收稿日期:2019-03-14