

文章编号: 1000-5862(2017)04-0344-04

微创人工耳蜗手术导航匹配算法研究

周朝政¹, 谢 叻^{1, 2*}

(1. 上海交通大学国家数字化制造技术中心, 上海 200030; 2. 上海交通大学生物医学工程学院, 上海 200030)

摘要: 微创人工耳蜗通道(Minimal Cochlear Access, MCA)是一种直接从颞骨的表面向内耳钻出隧道, 然后在内耳植入耳蜗电极的手术治疗方式. 相比于传统开放的耳蜗植入手术, MCA具有创伤小、耗时少、快速恢复及较少的并发症等优点. 该手术的主要难点是要获取足够的精度, 通常小于0.50 mm. 该文对基于基准标志物的光学导航系统(Landmark-Based Optical Navigation System, LONS)的定量精度进行研究, 通过不同的表面配准算法来获得稳定的精度. 结果表明: 在相同初始化条件下, 颞骨模型匹配的目标配准误差(Target Registration Error, TRE)最小值为(0.16 ± 0.01) mm.

关键词: 微创人工耳蜗通道; 表面匹配; 迭代最近点算法

中图分类号: TP 391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2017.04.03

0 引言

术中导航匹配是计算机导航机器人辅助手术的关键步骤. 匹配过程是将患者解剖位置与预先扫描患者的CT或MRI图像相关联的过程, 这样使得预先设计手术程序可以精确地执行. 通常采用机械探针识别解剖特征点进行匹配, 但这种方法有侵入性伤害. 微创人工耳蜗通道是直接由颞骨的表面向内耳钻出隧道, 然后在内耳植入耳蜗电极的治疗方式. 它避开传统开放的耳蜗植入手术所必须的乳突切除术, 这使得患者受到的创伤变小, 更有利于术后康复. 这个手术过程的主要难点在于实现足够精度的匹配. 在手术过程中, MCA的路径必须通过面神经、鼓膜与外耳道这些重要结构的交接处, 其距离通常小于0.50 mm. 因此, 高精度的MCA匹配算法对于手术的成功至关重要.

迄今为止, 许多研究团队^[1-2]已经在他们的研究中探讨了基于基准标记的匹配方法. 由于基准标志是刚性固定的, 不存在丢失或位移的危险, 因此可以实现高的配准精度. 另一方面, 其他团队已经利用许多方法作为替代基于基准标记的配准方法, 包括利用基于解剖学标记点^[3-4]的方法、基于模板的方法^[5]、激光表面扫描^[6]或跟踪指针检测骨的表面^[7]

及可能涉及使用基于表面A-模式超声的方法^[8]. 然而, 这些方法都没有达到足以安全完成微创耳蜗植入手术的精度, 其匹配精度大约1~5 mm.

本文提出了利用光学导航系统实现微创人工耳蜗通道配准方法并获得了初步结果. 通过比较标准迭代最近点算法(Iterative Closet Point Algorithm, ICP)和ICP类似算法在4个颞骨模型上进行面匹配, 并以此评估算法匹配精度. 结果证明LibICP算法具有最好的匹配精度, 其值为(0.16 ± 0.01) mm, 适用于微创人工耳蜗植入手术.

1 算法分析

1.1 光学导航算法

光学跟踪系统需要跟踪系统和跟踪工具之间的直接视野, 并且跟踪工具必须作改变, 使得它们可以被跟踪. 通常通过附加至少3个可跟踪点或其他特征的标记框架, 例如边缘、角或定义的图案. 为了定位外科手术工具, 在已知配置的固定坐标系中同时用至少2个照相机拍摄图像, 并且通过三角测量提取3D坐标. 跟踪的特征必须相对于该坐标框架校准仪器创建坐标系统, 以便有效导航手术工具. 光学导航原理: 2维(或在线性传感器的情况下为1维)点的位置可以在3D中恢复, 通过在至少2个单独

收稿日期: 2017-03-10

基金项目: 国家自然科学基金重大课题(61190124; 61190120), 国家自然科学基金面上(61672341)和上海市科委(14441900800)资助项目.

通信作者: 谢 叻(1964-), 男, 江西南昌人, 教授, 博士生导师, 主要从事虚拟现实技术、数字化制造技术和手术机器人技术的研究. E-mail: lexie@sju.edu.cn

成像系统中的检测,其中变换矩阵是精确已知的.通过偏离成像装置之间的真实变换来引入误差.此外,由实际成像装置与理想针孔照相机模型的偏差引起的误差导致图像失真和重建误差,算法流程如图 1 所示.

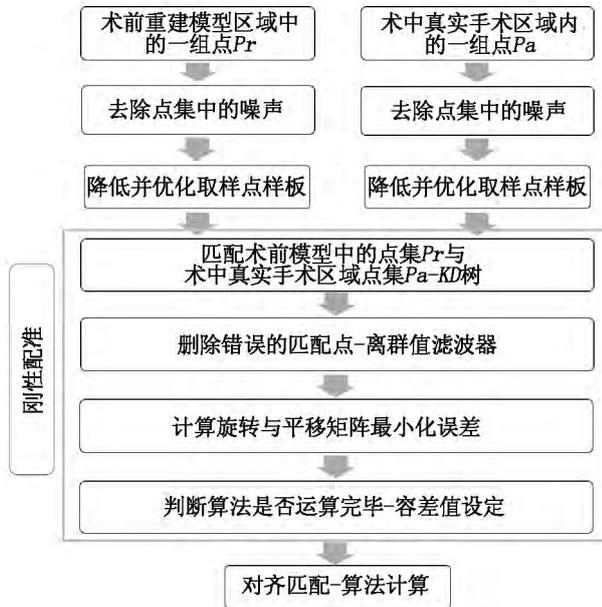


图 1 算法流程图

1.2 算法评估和优化

术前在颞骨模型双侧植入基准螺钉作为参照标记物,并获得颞骨模型的术前 CT 图像,使用标准的立方体算法分割乳突.在分割过程中定性地选择阈值.在配准过程中只需要颞骨模型的外表面进行匹配,利用图像处理软件从颞骨模型提取表面,将参考点位置和标记点位置分别定义在颞骨模型的表面上和内耳圆窗的中心.随后利用参考点位置计算相对于参照标记物的误差.此外,为了初始化 ICP 算法,在乳突表面上任意选择 4 个点作为初始化点.为了获取初始化点,将探针放置在初始化点的近似位置处的表面上,并且对 4 个初始化点中的每 1 个点获取 30 个值并求其平均.

在匹配过程中,分别对面匹配进行未初始化匹配和初始化匹配,其中初始化匹配包括配对点和主成分分析初始化.通过术前和术中检测螺钉标志物的位置,计算参照标记物变换矩阵,然后将计算的变换矩阵应用于颞骨模型表面,采用标准 ICP^[9]、Rigid ICP^[10]、Finite ICP^[11]、Sparse ICP^[12]、Reweighted ICP^[13] 和 LibICP^[14] 进行最终面匹配,并与目标标记物位置进行比较.

测试工作流程: 1) 初始化不同的 ICP 匹配算法,添加随机噪声评估目标点与参考点的精度; 2) 使用测量颞骨模型表面点的真实数据验证不同算法

匹配的准确性; 3) 优化其匹配结果.

1.3 算法精度评估

匹配算法的精度评估在 4 个颞骨模型中进行测试与评价. 2 个测量装置(LONS 和 Faro 测量仪) 分别收集颞骨模型表面上的点与螺钉基准点. 利用在尖端直径为 1.27 mm 的机械探针在颞骨模型的表面上获取表面点. 在获取表面点过程中, 确保机械探针的尖端始终与颞骨模型的表面接触. 分别用 LONS 和 Faro 测量仪采集表面点 5 次, 每次采集总共 3 000 点.

术前通过 CT 图像重建 3 维颞骨模型, 并分割出模型表面获得 52 170 个基准参考点. 对颞骨模型表面分别进行 Faro-to-Image(Faro 测量仪对 CT 模型) 和 Tracking-to-Image(LONS 测量系统对 CT 模型) 的面匹配分析, 然后将计算的变换矩阵应用于 2 组表面的点, 并在这些点之间计算目标配准误差(Target Registration Error, TRE) 相对于参考标记物的相对误差. 具体流程为: 通过 Faro 与 LONS 测量系统进行颞骨模型的表面点采集, 再分别评估 Faro-to-Image 和 Tracking-to-Image 面匹配算法的精度.

2 结果

实验结果表明: 在表面点相同的情况下, 最小的 TRE 匹配误差为(0.563 ± 0.040) mm, 需要花费约 0.624 s. 表 1 为在不同匹配算法下的最初匹配结果. 可见, 相同的匹配算法在不同初始化方法下的匹配精度波动较大. 如在配对点初始化下, 各算法的匹配精度区间为 0.20 ~ 31.02 mm; 不同的匹配算法在采用相同的初始化方法下的匹配精度波动也较大. 如不同的初始化方法下 Sparse ICP 匹配精度区间为 12.31 ~ 57.43 mm; 在使用配对点初始化下 Lib ICP Point-plane 匹配算法具有最好的精度, 其值为 0.20 mm, 且 Lib ICP Point-plane 匹配时间也较短, 为 3.07 s.

表 1 不同匹配算法的最初匹配结果 s

方法	配对点初始化	未初始化	主成分分析初始化	匹配时间
ICP Point-point	12.49	57.66	17.69	4.95
ICP Point-plane	10.70	55.84	31.78	1.61
Rigid ICP	31.02	101.49	28.68	4.90
Finite ICP	12.31	57.43	18.43	15.06
Lip ICP Point-point	1.35	14.33	2.62	2.50
Lip ICP Point-plane	0.20	50.98	0.30	3.07
Sparse ICP	3.50	80.03	41.79	14.85
Reweighted ICP	12.49	57.68	43.28	3.39

图 2 显示了骨模型面匹配点的数目与不同 ICP 算法匹配精度的关系. 可以看出, 初始化方法对于匹配精度的影响较大. 未初始化的所有匹配算法均不能获得较好的精度. 比较看来, 使用配对点初始化法对于获得较高的匹配精度尤为重要, 且使用 Lip ICP Point-plane 能获得最佳的匹配. 由图 2(a) 所示, Lip ICP Point-plane 算法随着匹配点数的增加, 其匹配精度值波动变化不大, 且能获得较好的匹配精度.

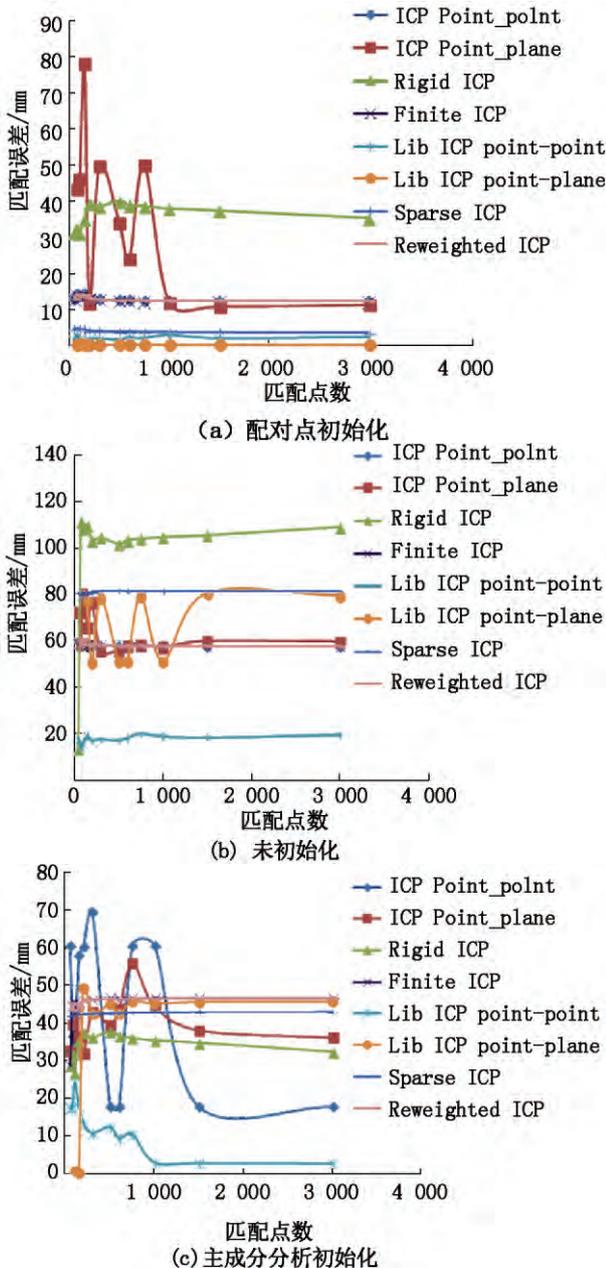


图 2 骨模型面匹配点的数目与不同 ICP 算法匹配精度的关系

图 3 显示了基于 Lip ICP Point-plane 算法的一个颞骨模型面匹配结果. 从图 3 可见, 其目标点的匹配精度很好(蓝色点为 LONS 采集点, 红色为模型参考点, 绿色为模型匹配后的点). 其他结果见表 2, 最佳的匹配精度为 (0.16 ± 0.01) mm.

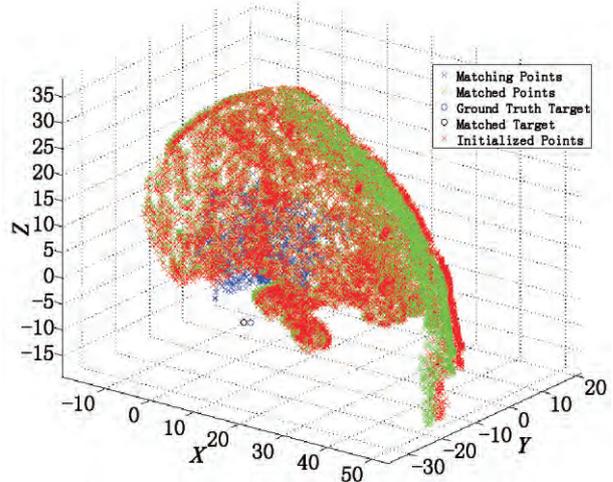


图 3 颞骨模型表面匹配结果

导航匹配误差主要可能来自 3 个部分. 1) 当手动收集颞骨模型表面的点时, 探针可能有时偏离表面, 这很可能带来数据采集的误差; 2) 采用的算法本身也会带来误差, 然后在 CT 图像分割模型时阈值的选取也将带来误差; 3) 导航误差与其校准误差也会增加最终匹配精度. 从使用的匹配算法结果可以得出结论, 一些算法利用配对点初始化产生较高的匹配精度, Lip ICP 的精度为 0.2 mm, 而利用主成分分析法初始化为 0.3 mm. 所有算法运行相对较快(小于 20 s). Finite ICP 算法运行缓慢(约 15 s), 而 Lip ICP 运行最快(3 s). 从表 1 得出结论, 匹配精度与初始化之间没有联系. 面匹配点的数目和算法匹配方法之间也没有相关性, 如图 2 所示. 然而, 配对点初始化对于所有选择的 ICP 算法是必要的, Lip ICP Point-plane 算法能够获得最佳的匹配精度.

3 结束语

本文通过评估标准 ICP 和 ICP 类似算法在 4 个颞骨模型上进行面匹配的初步结果, 实现了 LipICP 算法在微创人工耳蜗通道配准中高精度匹配, 这有利于后续人工耳蜗手术的精确执行.

表 2 Faro-to-Image 与 Tracking-to-Image 匹配结果比较 mm

方法	TRE			
	颞骨模型 1	颞骨模型 2	颞骨模型 3	颞骨模型 4
Faro-to-Image	0.03 ± 0.11	0.43 ± 0.10	0.29 ± 0.09	0.78 ± 0.15
Tracking-to-Image	0.28 ± 0.11	0.21 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.23 ± 0.07

4 参考文献

- [1] Abbasi H R ,Grzeszczuk R ,Chin S ,et al. Clinical fluoroscopic fiducial-based registration of the vertebral body in spinal neuronavigation [J]. Study Health Technol Inform , 2001 81: 1-7.
- [2] Alp M S ,Dujovny M ,Misra M ,et al. Head registration techniques for image-guided surgery [J]. Neurol Res , 1998 20(1) : 31-37.
- [3] Maurer C R Jr ,Aboutanos G B ,Dawant B M ,et al. Effect of geometrical distortion correction in MR on image registration accuracy [J]. J Comput Assist Tomogr ,1996 ,20(4) : 666-679.
- [4] Pelizzari C A ,Chen G T ,Spelbring D R ,et al. Accurate three-dimensional registration of CT ,PET ,and/or MR images of the brain [J]. J Comput Assist Tomogr ,1989 ,13(1) : 20-26.
- [5] Hauser R ,Westermann B ,Probst R. Noninvasive tracking of patient's head movements during computer-assisted intranasal microscopic surgery [J]. Laryngoscope ,1997 ,107(4) : 491-499.
- [6] Marmulla R ,Lüth T ,Mühling J ,et al. Automated laser registration in image-guided surgery: evaluation of the correlation between laser scan resolution and navigation accuracy [J]. Int J Oral Maxillofac Surg ,2004 33(7) : 642-648.
- [7] Herring J L ,Dawant B M. Automatic lumbar vertebral identification using surface-based registration [J]. J Biomed Inform 2001 34(2) : 74-84.
- [8] Mozes A ,Chang Tacheng ,Arata L ,et al. Three-dimensional a-mode ultrasound calibration and registration for robotic orthopaedic knee surgery [J]. International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 2010 6(1) : 91-101.
- [9] Besl P J ,McKay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Trans Pattern Anal ,1992 14(2) : 239-256.
- [10] Pennec X ,Roche A. Rigid point-surface registration using an EM variant of ICP for computer guided oral implantology [C]// Berlin Heidelberg: International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention ,Spring-Verlag 2001: 752-761.
- [11] 刘祝华 邵道文 钟华 等. 基于 Finite Ridgelet 变换的去噪算法研究 [J]. 计算机工程与应用 2005 41(18) : 42-44.
- [12] 王森 王璐 洪靖惠 等. 基于 Sparse ICP 的 3 维点云耳廓识别 [J]. 图学学报 2015 36(6) : 862-867.
- [13] 温雯 郝志峰 邵壮丰. 迭代重加权最小二乘支持向量机快速算法研究 [J]. 计算机科学 2010 37(8) : 224-228.
- [14] Geiger A ,Lenz P ,Urtasun R. Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite [C]// Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) , Washington D C: IEEE Computer Society , 2012: 3354-3361.

The Study on Navigation Matching Algorithm for Minimally Invasive Cochlear Surgery

ZHOU Chaozheng¹ ,XIE Le^{1,2*}

(1. National Digital Manufacturing Technology Center ,Shanghai Jiao Tong University ,Shanghai 200030 ,China;

2. School of Biomedical Engineering ,Shanghai Jiao Tong University ,Shanghai 200030 ,China)

Abstract: Minimal cochlear access (MCA) is a tunnel that is drilled in advance from the surface of the temporal bone directly to the inner ear and then inserting cochlear implant electrodes in the inner ear. DCA is advantageous over conventional cochlear implantation surgery in that it is little trauma ,less time-consuming ,fast recovery and less complication. The major challenge of this procedure is in the achievement of sufficient accuracy ,typically less than 0.5 mm. The quantitative accuracy of our landmark-based optical navigation system is investigated by utilizing different surface-based registration algorithms for obtaining a steady accuracy. The results show that the best target registration error (TRE) of cadaver temporal bone is(0.16 ± 0.01) mm in the same initialization conditions.

Key words: minimal cochlear access; surface matching; iterative closet point algorithm(ICP)

(责任编辑:王金莲)