arXiv:2304.01027v1 [cs.RO] 3 Apr 2023

用于脑外科手术的自动化机器人术中超声

Michael Dyck*[1,2], Alistair Weld*[3], Julian Klodmann[1],Alexander Kirst[1],Giulio Anichini[4],Luke Dixon[4], Sophie Camp[4],Stamatia Giannarou[3],Alin Albu-Sch¨affer[1,2]

I. 引言

在脑肿瘤切除过程中，即使是经验丰富的神经外科医生和神经放射科医生，也难以定位癌变组织并delineate 正常与病变组织边界 [1]。手术室通常借助术中成像来制定和更新手术计划。超声（US）因易于集成到手术室和手术流程中，成为完成这项任务的合适工具。然而，由于解剖结构定位和数据解读困难，这一工具的广泛应用受到限制。

近年来，已有多篇关于机器人超声扫描各种应用的研究发表。脊柱的机器人超声扫描是一项定义明确的跟踪任务。 [2] 采用语义分割网络对脊柱进行分割，并结合深度图生成机器人轨迹。[3] 提出了一种自动化肺部诊断方法，利用位姿估计网络识别胸部区域以确定路径。 [4]采用图像质量优化和交互力调节来优化探头位姿和表面耦合。

本文介绍了一种机器人框架，并在软组织仿真脑模型上对其进行了设计和测试，以模拟脑肿瘤手术期间的术中超声（iUS）扫描。我们的工作在 [5], [6] 中介绍的内容基础上展开。

II. 方法

我们的机器人术中超声组织扫描平台的工作流程如图 2 所示。

A. 软组织仿真脑模型

使用 GELITA® GELATINE 弹道 *3* 型和仿脑硅胶模具制作了定制的软组织仿真脑模型。为模拟软组织并延长仿体的耐用性，仿体中含有水、甘油和明胶，重量比分别为 45:45:10。受 [7], 启发，我们在仿体中放入了不同的物体，包括：

[1]机器人与机电一体化研究所，德国航空航天中心，[2]信息学系，慕尼黑工业大学， [3]Hamlyn机器人外科中心，伦敦帝国理工学院， [4]神经外科，查令十字医院，伦敦帝国理工学院，英国

*这些作者对本研究贡献相同 - michael.dyck@dlr.de, a.weld20@imperial.ac.uk。本项目得到国际科学与工程研究生院（IGSSE）、慕尼黑工业大学研究生院、英国研究与创新署（UKRI）人工智能医疗保健博士培训中心（EP/S023283/1）、英国皇家学会（URF\R\201014]）以及NIHR帝国理工生物医学研究中心的支持。作者感谢*ImFusion GmbH*，特别感谢Marco Esposito博士为我们提供软件的学术许可，并在整个研究过程中给予持续支持。

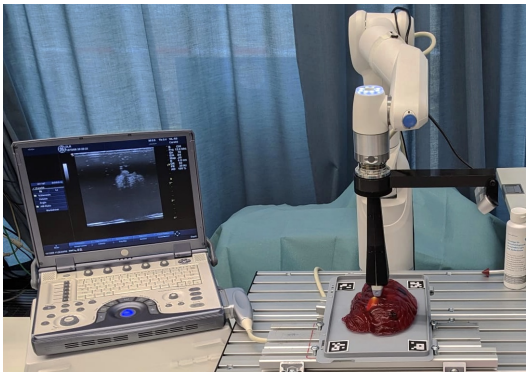


图 1. 实验装置，展示了安装有探头和相机支架的机械臂，以及对定制脑部仿体进行扫描。

橄榄、葡萄、蓝莓、螺钉。这确保了仿体的超声记录中包含随机特征。

B. 定位与表面重建

定位时，首先在该区域周围手动放置四个 ArUco 标记。然后将相机置于感兴趣区域上方，使所有标记都能出现在图像中。这样即可初始化自动定位与重建流程。使用 OpenCV[8] ArUco库，可以识别这四个基准标记。利用这些点，可以计算出一个包含仿体的平面，该平面由中心点和法向量定义。根据检测到的平面，机器人会自动调整相机，使其 z 轴以 45° 角朝向平面中心，距离为 30 cm。使用 ImFusion GmbH 的*ImFusionSuite* 软件解决方案中的 RGB-D重建算法，并执行简单的旋转轨迹——即使相机绕已识别平面的法向量旋转——即可提取出组织仿体的三角网格。

C. 阻抗控制超声扫描

我们采用 [9]中介绍的阻抗控制器。在表面网格上定义与表面相关的坐标。这些坐标包括换能器与表面之间的距离$d \in \mathbb{R}$，以及使探头轴线与表面法线对齐的三个方向坐标 $\varepsilon \in \mathbb{R}^{3\times1}$。另外两个坐标（$s_1$,$s_2$）$\in \mathscr{X} \subset \mathbb{R}^2$ 用于控制换能器在表面上的位置。我们将所有坐标组合成一个向量$\rho = (s_1, s_2, d\ \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)^T \in \mathbb{R}^{6\times1}$（参见图 2），并通过 [10]实现统一阻抗控制框架

$$\tau = J_\rho^T(q)[K_\rho(\rho_d - \rho(q)) + D_\rho(q)(\dot{\rho}_d - \dot{\rho})]. \qquad (1)$$

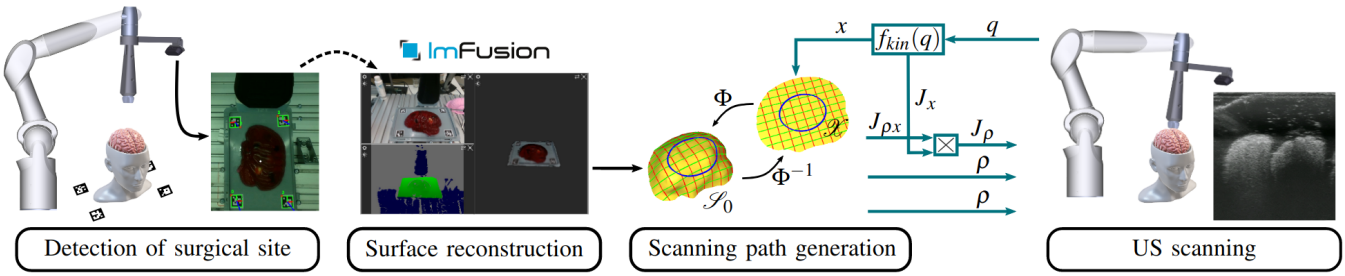


图 2. 我们的术中超声组织扫描平台的工作流程。通过立体相机自动检测物体位置并对其表面进行 RGB-D 重建，生成仿体的三角网格。阻抗控制器将该网格的几何信息纳入实时控制回路，引导超声探头建立接触并执行扫描轨迹。图片基于 [6]。

此处，K_ρ,D_ρ分别表示对称正定的刚度矩阵和阻尼矩阵。$q \in \mathbb{R}^{7\times1}$表示机器人的广义构型坐标，$(\rho_d, \dot{\rho}_d)$表示坐标系中的期望位置和速度；$J_\rho \in \mathbb{R}^{6\times6}$表示将关节速度 $\dot{q}$ 映射为速度 $\dot{\rho}$的雅可比矩阵。对距离进行控制会使超声换能器与组织之间产生被动交互力，其大小取决于控制器和物体的刚度。

III. 结果

实验装置如图 1 所示。我们使用了一台具有七个自由度（DoF）的 DLR MIRO 手术机械臂。机械臂上安装了 Intel® RealSenseTM深度相机 *D435i*和一支 *GE12L-RS* 线阵超声探头。超声换能器连接至*GE LOGIQ e*超声设备。*ATI Mini45* 力/力矩传感器在扫描过程中测量六个自由度上的交互力。标记检测和表面三维重建的结果如图 2 所示。图 3 展示了超声探头与仿体之间的交互力。超声探头与表面法线对齐（$\varepsilon_d = 0_{3\times1}$）。距离坐标的设定值（$d_d$）持续减小（穿透深度增加），并保持在根据超声图像质量定性选定的手动数值上。实验过程中记录的超声图像示例展示了接触建立的不同阶段：从左侧接触极少，到右侧探头-组织耦合良好。通过控制距离而非力，可以实现探头与表面的安全耦合，且不受组织特性和几何形状的影响。

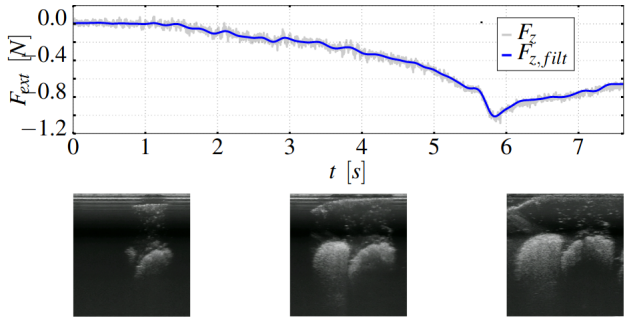


图 3. 建立接触过程中超声换能器与脑部仿体之间的交互力。下方的超声图像是在交互过程中采集的，显示了超声接触的不同阶段。

IV. 结论

本文提出了一种用于自动化机器人术中脑部超声扫描的框架。在复杂的定制脑部仿体上进行测试后，结果表明，该框架能够实现扫描部位定位和表面重建，并支持以较低交互力进行探头伺服控制。未来的工作将聚焦于探头位姿的视觉伺服控制和超声质量优化，同时尽可能降低所需的交互力。

参考文献

[1] L. Dixon, A. Lim, M. Grech-Sollars, D. Nandi, and S. J. Camp, “脑肿瘤手术中的术中超声：综述与实施指南”，*Neurosurgical Review*，第45卷，第2503–2515页，2022年。

[2] M. Victorova, M. K.-S. Lee, D. Navarro-Alarcon, and Y. P. Zheng, “循曲而行：通过基于学习的棘突定位实现脊柱侧弯评估的机器人超声导航”，*IEEE Access*，PP卷，第1–1页，2021年。[3] X. Ma, Z. Zhang, and H. K. Zhang, “面向机器人肺部超声成像的自主扫描目标定位”，*2021*年 *IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议 *(IROS)*，第9467–9474页，2021年。[4] Z. Jiang, M. Grimm, M. Zhou, Y. Hu, J. Esteban, and N. Navab, “用于精确机器人超声采集的自动基于力的探头定位”，*IEEE*工业电子学汇刊，第68卷，第11期，第11 200–11 211页，2021年。[5] A. Weld, M. Dyck, J. Klodmann, G. Anichini, L. Dixon, S. J. Camp, A. Albu-Sch¨affer, and S. Giannarou, “用于神经外科手术切除引导的协作式机器人超声组织扫描”，第*14*届哈姆林医疗机器人研讨会论文集，第abs/2301.08174卷，2022年。[6] M. Dyck, A. Weld, J. Klodmann, A. Kirst, L. Dixon, G. Anichini, S. J. Camp, S. Giannarou, and A. Albu-Sch¨affer, “用于神经外科手术切除引导的协作式机器人超声组织扫描”，*IEEE*医疗机器人与仿生学汇刊，2022年，已投稿待发表。[7] H. Morehouse, H. P. Thaker, and C. Persaud, “在明胶中添加 Metamucil 制作逼真的乳腺活检仿体”，《医学超声杂志》，第26卷，2007年。[8] Itseez, “开源计算机视觉库”，https://github.com/ itseez/opencv，2015年。[9] M. Dyck, A. Sachtler, J. Klodmann, and A. Albu-Sch¨affer, “利用离散微分几何对任意曲面进行超声扫描的阻抗控制”，*IEEE*机器人与自动化快报，第7卷，第3期，第7738–7746页，2022年。[10] A. Albu-Sch¨affer, C. Ott, and G. Hirzinger, “用于柔性关节机器人的位置、力矩和阻抗控制的统一无源性控制框架”，《国际机器人研究杂志》，第26卷，第1期，第23–39页，2007年。