arXiv:2302.02946v2 [cs.HC] 4 May 2023

用于结肠增生诊断的沉浸式虚拟结肠镜查看器的开发

若˜昂·塞拉斯*
IST - ULisboa

Anderson Maciel†
IST - ULisboa, INESC-ID

Soraia Paulo‡
IST - ULisboa, INESC-ID

Andrew Duchowski§
克莱姆森大学

Regis Kopper¶
北卡罗来纳大学格林斯伯勒分校

Catarina Moreira‖
昆士兰科技大学

Joaquim Jorge**
IST - ULisboa，INESC-ID

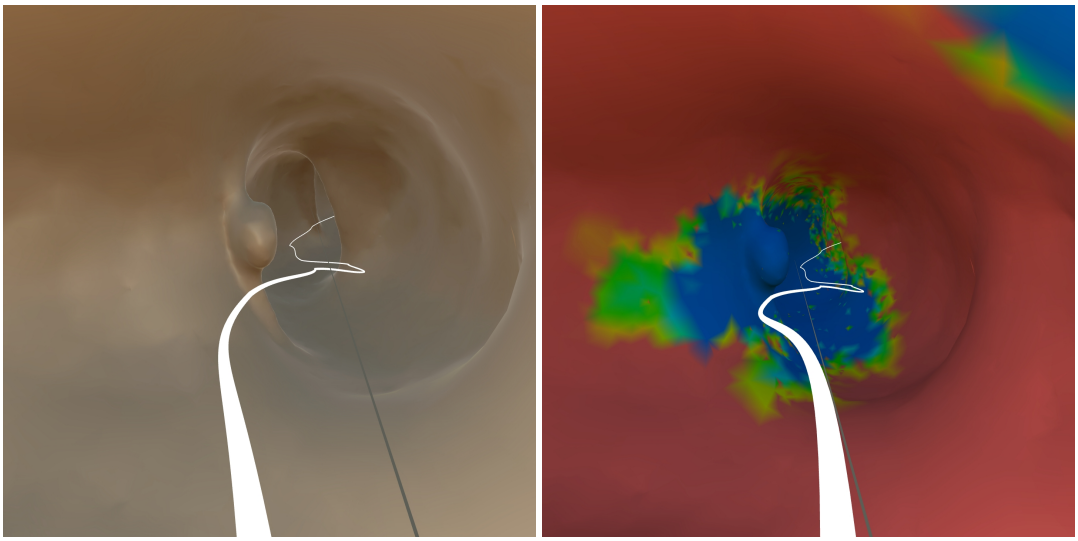


图 1：左：在虚拟现实中从结肠内部观察到的视图。右：颜色映射视图，蓝色表示已检查区域，红色表示尚未查看区域。

摘要

基于桌面的虚拟结肠镜检查已被证明有助于识别结肠异常。该过程准确，但耗时较长。将沉浸式界面用于虚拟结肠镜检查尚处于起步阶段，人们对此也尚未充分了解。在本研究中，我们提出了一种新设计，探索虚拟现实范式中的各种元素，旨在提高沉浸式分析的效率，同时保持其有效性。我们还计划邀请专家开展实验，以评估覆盖率、检查时长和诊断准确性等因素的综合影响。

索引词： 以人为中心的计算—人机交互（人机交互）—交互范式—虚拟现实；应用计算—生命与医学科学—计算生物学—成像

1 引言

2020年，结直肠癌（CRC）发病率居第三位，也是癌症相关死亡的第二大原因 [8]。

*电子邮箱： nuno591lopes@gmail.com
†电子邮箱： anderson.maciel@tecnico.ulisboa.pt
‡电子邮箱： soraiafpaulo@tecnico.ulisboa.pt
§电子邮箱： aduchow@clemson.edu
¶电子邮箱： kopper@uncg.edu‖电子邮箱： catarina.pintomoreira@qut.edu.au **
电子邮箱： jorgej@tecnico.ulisboa.pt

近年来，医学成像领域取得了显著进展，为各种疾病的诊断和治疗提供了新的改进方法。其中一项创新是 CT 结肠成像，也称为虚拟结肠镜检查。与其他 CT 检查不同，仅凭切片图像体数据几乎无法诊断结肠息肉和憩室。相反，结肠内表面会被重建为三维图像，并以观察者位于结肠中线处的视角显示在放射科医生的监视器上。结合极宽视野的投影，这种方式能够实现隧道式导航（见图 2），使结肠增生清晰可见，专家也因此能够对其进行测量。

二十多年来，虚拟现实一直应用于科学和数据可视化领域，并取得了令人振奋的成果 [3, 11]。虚拟现实的若干特性，例如临场感、自然环视、导航和操控等，在数据具有多维特征时，有助于用户更专注、更高效地完成可视化任务。

在此背景下，我们提出开发一款用于诊断结肠增生的沉浸式虚拟结肠镜检查观察器。该观察器运用最先进的技术，创建高度逼真且具有交互性的结肠三维表示，使医生能够比以往更细致地识别和检查增生。这种方法有望提高结肠增生诊断的准确率和/或效率，同时提供一种比传统结肠镜检查程序和现有桌面端实现更舒适、侵入性更低的替代方案。

将桌面查看器转换为沉浸式查看器，听起来相当直接。然而，文献中很少有研究采用沉浸式界面进行结肠诊断可视化，也没有研究为这种可视化及相关交互操作的设计提供一致的指导方针。

本文介绍了开发一款虚拟现实应用的初步成果，该应用允许用户沉浸其中，进入虚拟结肠，并系统地探索其全长，以寻找具有临床意义的发现。我们的虚拟现实应用还利用眼动追踪和一系列虚拟现实隐喻，旨在使放射科医生的工作至少同样准确且耗时更少，从而帮助更多患者获得这项检查。

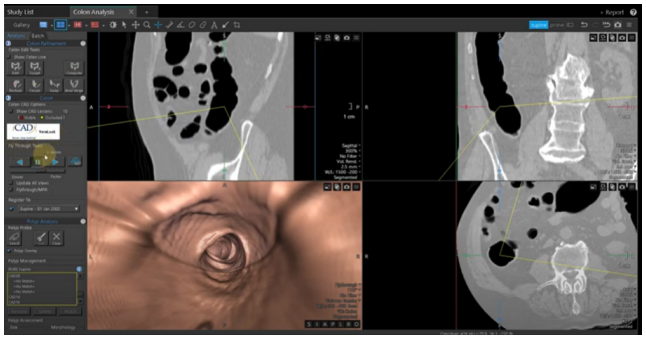


图 2：桌面式虚拟结肠镜检查的 2×2 视图配置。

2 背景与相关工作

如今，全结肠镜检查（TC）是检测结直肠癌最准确的方法。尽管如此，由于具有侵入性，需要将内窥镜经直肠插入，因此这种检查存在诸多缺点和并发症，例如引起不适、需要进行检查前准备、存在穿孔风险等。

虚拟结肠镜检查（VC）旨在解决全结肠镜检查的部分缺点。借助 CT扫描和桌面程序，放射科医生可以沿两个方向在重建的结肠中导航：从直肠到盲肠，再从盲肠返回直肠，以免漏掉皱襞中的异常。虽然它避免了侵入性，但也有自身的缺点。导航仅限于单一视图，导致对息肉类型的不确定性增加，进而提高了转诊接受结肠镜检查的比例和总体成本。虚拟结肠镜检查能够检测出大多数结肠异常，但耗时很长，远超传统的全结肠镜检查。此外，该检查只关注结肠内部，结肠外病变仍可能存在。因此，需要进一步检查会增加成本，而且还可能出现假阳性。

最后，研究者提出了沉浸式虚拟结肠镜检查（IVC）。与虚拟结肠镜检查类似，结肠的三维模型由CT扫描重建而成。然而，生成的三维结肠表面是在虚拟现实环境中显示的。IVC允许放射科医生通过自然的头部和身体运动，自由探索结肠的内部和外部，借助立体视觉和视差线索更好地分析体积数据，同时仍具备与虚拟结肠镜检查相同的功能。由于放射科医生不受单一路径和视角的限制，因此可以实现许多可能的操作。测量也可以直接在三维空间中进行。尽管具有这些可能性，放射科医生并不关注华而不实的VR交互。我们在设计用于IVC的VR界面时所面临的主要问题是效率。因此，我们面临的主要挑战是在保持高保真度的同时缩短检查时长。在本文后文中，我们将介绍如何设计交互方式，以提高检查效率。

2.1 异常

所述结肠检查的目标相同：发现并分类结肠中的异常。任何人都可能出现这类异常，分为 5 种：

腺瘤性（管状腺瘤） - 这是最常见的结肠息肉类型，大多为良性。它们可能转变为其他癌变类型，但这一过程可能需要数年，并且可以通过定期筛查来预防；

锯齿状息肉 - 这种息肉是否会癌变，取决于其大小和位置。若息肉较大，通常呈扁平状且位于结肠上段，则属于癌前病变。由于其特征，这类息肉很难被发现。

增生性息肉 - 如果锯齿状息肉较小且位于结肠下段，则称为增生性息肉；它们极少发生恶变。

炎性息肉 - 多见于患有炎症性肠病的人群，也称为假息肉。它们是结肠慢性炎症的产物。炎性息肉属于良性息肉，通常不会转变为癌变类型。

绒毛状腺瘤（管状绒毛状腺瘤） - 这类息肉通常为无蒂（扁平）状，癌变风险较高。较小的息肉可在结肠镜检查过程中切除，较大的息肉则可能需要额外手术才能彻底切除。

所有类型的息肉都应予以识别，尤其是腺瘤，它们更容易转变为癌变息肉。呈扁平状时，它们可能很难被发现。此外，锯齿状息肉是结直肠癌的重要危险因素，因为息肉可能太小而未被察觉，特别是在肠道准备不充分时 [8]。

考虑到放射科医生的需求，先前的研究探讨了虚拟现实对诊断的影响 [12]。随后，一些论文尝试利用具备空间感知能力的显示器 [4] 和沉浸式虚拟现实来改善他们的体验。首先，为了帮助用户在虚拟现实中导航，先前的论文表明，微缩世界和传送是减少耗时、改善用户在结肠等洞穴状环境中方向感的有效方式 [2, 10]。其次，对结肠内路径导航方法的比较表明，尽管“飞越”的准确率最高，但“飞行穿越”最受欢迎 [9]。

在界面和交互方面，有许多可用且经过研究的交互与选择技术。在本项目中，我们决定采用基于射线的技术 [1, 5]。此前已有研究开发过类似的系统 [7], ，但当时使用的头戴式显示器分辨率不足，并且收到了大量有关晕动症的投诉。

我们依赖的另一项技术是眼动追踪。此前已有研究探讨了用于医疗用途的眼动追踪工具。研究表明，这些工具作为可视化辅助工具能带来显著益处。研究还提出并说明了用于评估此类工具的指标 [6]。

3 虚拟结肠镜设计

在虚拟结肠镜中，放射科医生通常可以沿着结肠的中心线以不同速度导航、为可疑区域添加书签、测量区域、列出已测量的区域，并检查可疑区域的 CT 扫描以确定诊断。有时，一滴黏液的形状会像息肉。CT图像中的密度值可用于区分两者。

在我们的虚拟结肠镜设计中，我们尝试通过虚拟现实元素和隐喻来支持相同的任务。

虚拟环境中包含一片无限延伸的地平线景观，虚拟结肠漂浮其中。进入虚拟环境后，用户会从外部看到处于解剖学位置的结肠。他们还会看到自己正在操作的两个控制器的虚拟化身，并看到指示操作方法的标签。用户可以用左手旋转结肠模型，用右手指向结肠上希望开始分析的位置。图3展示了这一初始视图。

由于接受过传统技术的培训，放射科医生通常会从直肠向结肠进行导航。因此，假设他们朝向直肠并传送到那里。从那里开始，放射科医生使用飞越技术沿中线对结肠进行导航

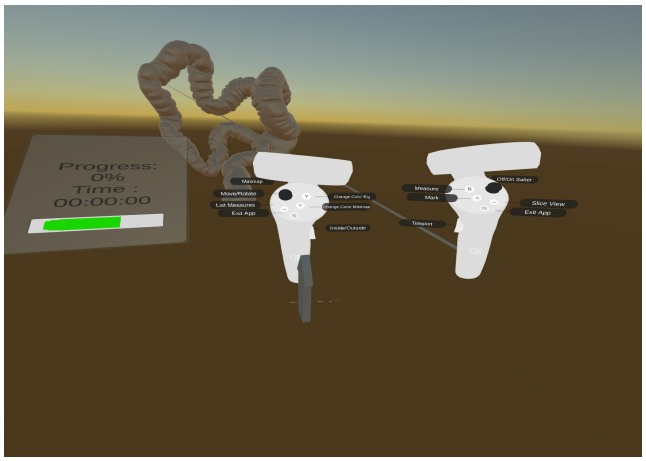


图 3：结肠外部的虚拟环境，展示控制方式。

。通过右手操纵杆自然选择五种不同的速度。运动方向是中线的切线方向，但放射科医生可以环顾四周；回头看时，导航方向会反转。仍允许轻微、自然的头部和身体动作，这有助于快速靠近结肠壁以查看细节，或将头部向侧面倾斜以更好地感知深度特征。

有几种提示可帮助用户确定自身方位。首先，解剖结构可以让专科医生识别当前所见的结肠部分。其次，我们提供了一个始终指向垂直方向的箭头对象。最后，可以切换显示一个描绘结肠外部视图的微缩世界（WIM），它会附着在左手上（图 4）。用户既可以在微缩世界（WIM）上指向其他位置，也可以直接指向结肠，以传送到其他位置。传送目的地是沿中线路径距第一个射线交点最近的位置。中线路径上显示的线起初为白色，已访问过的线段则会变为绿色。

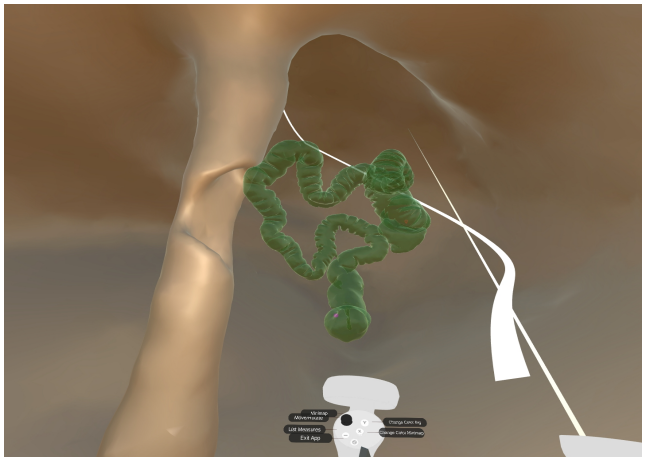


图 4：附着在手上的微缩世界。

桌面应用程序中没有类似功能的另一项功能，是计算用户注视结肠壁各点所花时间的能力。我们以视口中心为参照，将一组向量投射到模型上，并为被向量命中的点累计时间。在具备眼动追踪功能的情况下（我们的原型便具备此功能），会以视口中的相应眼睛位置取代视口中心，从而提高计算所得时间的可靠性。随后，时间会映射为颜色，放射科医生可查看热力图，确认没有遗漏任何区域。热力图既可应用于 WIM（图 5），也可应用于结肠模型本身（图 1）。此外，各点的注视时间对于今后验证 VR界面以及对阅片模式进行荟萃分析，都具有重要价值。

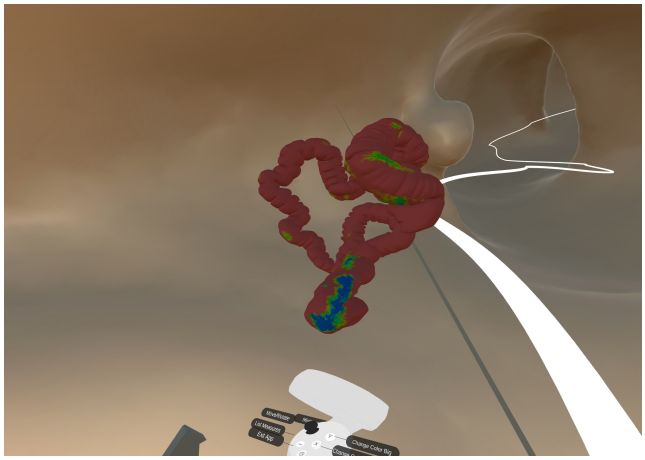


图 5：覆盖率热力图，在微缩世界上显示结肠各区域被观察的时长。

该界面允许用户指向并为区域添加书签，以便后续分析和分类。界面提供书签列表，选择其中一项即可将用户传送到相应位置，快速访问该区域。除了添加书签，还可以在三维环境中进行测量。桌面应用通常在三个平面上进行测量，而我们提供了一种工具，可在结肠上选择任意两个点并测量它们之间的距离（见图 6）。

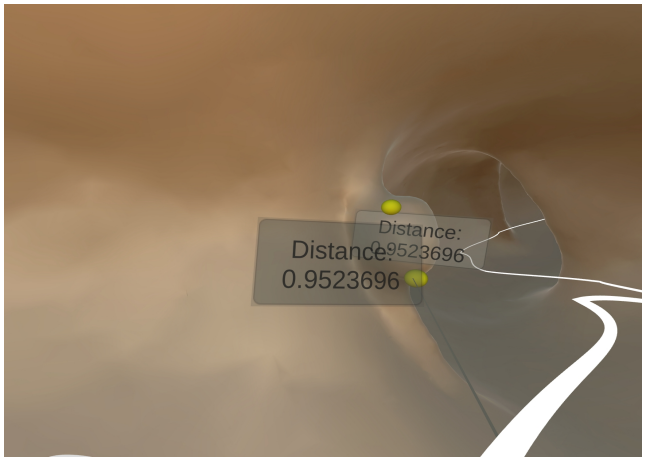


图 6：用于测量异常大小的距离测量工具。

最后一个也是至关重要的功能，是能够分析CT扫描中异常的位置。桌面应用通常会采用“分屏”方式显示三个标准平面，而我们提议利用三维空间来实现这一点。在当前的实现中，将指向某个位置时，浮动面板上会显示相应的CT图像（见图7）。移动指向射线会使图像更新为新位置对应的图像。不过，这是一项关键功能，我们希望通过实验进行研究。我们还将考虑其他方法，例如将图像与模型配准，并以交互方式构建任意平面。

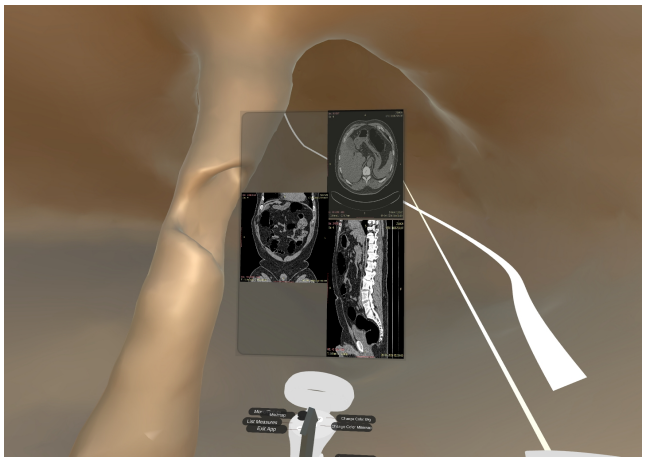


图7：切片视图

4 最终评论

我们向专家展示了当前开发成果，并征求了非正式反馈。在这一迭代过程中，我们进行了多次重新设计。下一步是详细制定一项正式实验方案。主要目标是比较不同条件下的覆盖率、准确率和效率。我们假设，沉浸式界面能够缩短检查所需时间，同时保持与桌面方式相近的假阳性率和假阴性率。

我们将招募来自多家医院的一组放射科医生，使用基于带有真实值的公共数据生成的结肠进行虚拟结肠镜检查。他们将分别进行一次结肠镜检查（从直肠到盲肠）、两次结肠镜检查（从直肠到盲肠，再从盲肠到直肠），以及使用传统桌面虚拟结肠镜检查进行两次检查（从直肠到盲肠，再从盲肠到直肠），后者是临床环境中的常规设置。在所有测试中，我们将比较覆盖面积、耗时以及发现的异常特征。

我们认识到，为避免不同条件之间产生记忆效应，采用组间实验方案更适合本次分析。不过，由于具备虚拟结肠镜检查经验的专业放射科医生人数有限，部分变量仍将在组内进行测试。初步计划是让参与者体验所有条件，但使用不同的结肠，并随机安排结肠和界面的顺序。

该系统将安装在 Pico Neo 3 Pro Eye 头戴式显示器上。所有操作都会被记录下来，以便进行模式分析；参与者的反应也将纳入讨论，以分析量化结果。操作模式和检查结果还将与主观舒适度和晕动症进行交叉分析。

致谢

本研究部分由巴西国家科学技术发展委员会项目 311251/2020- 0 资助，并由基金会˜科学与技术（葡萄牙科学与技术基金会）通过资助项目 2022.09212.PTDC（XAVIER）、UIDB/50021/2020，以及卡内基梅隆大学葡萄牙分校资助项目 SFRH/BD/151465/2021 提供支持；上述资助均在联合国教科文组织人工智能与扩展现实教席的支持下开展。

参考文献

[1] F. Argelaguet 和 C. Andujar。虚拟环境中三维对象选择技术综述。《计算机与图形学》，37(3)：121– 136, 2013 10 1016 2012 12 003 。doi：./ j.cag. . . D. Coffey、N. Malbraaten、T. B. Le、I. Borazjani、F. Sotiropoulos、A. G. Erdman 和 D. F. Keefe。交互式切片窗口内操作：使用多表面多点触控虚拟现实界面浏览和探查体数据集。《*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊》，18(10)：1614–1626，2012。doi：10.1109/TVCG.2011.283 [2] [3] A. Fonnet 和 Y. Prie。沉浸式分析综述。《*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊》，27(03)：2101–2122，2021年3月。doi：10.1109/TVCG.2019.2929033[4] J. G. Grandi 和 A. Maciel。医学图像的交互式空间感知可视化。《国际计算机辅助放射学与外科学杂志》，5：347–348，2010年。[5] T. Grossman 和 R. Balakrishnan。三维体积显示器选择技术的设计与评估。载于第*19*届美国计算机协会用户界面软件与技术年度研讨会论文集，UIST '06，第3–12页。美国计算机协会，美国纽约州纽约市，2006年。doi：10.1145/1166253.1166257[6] E. Helbren。对运动医学图像进行眼动追踪：用于*CT* 结肠成像的新型研究工具的开发与调查。博士论文，2019年4月。[7] S. Mirhosseini、I. Gutenko、S. Ojal、J. Marino 和 A. Kaufman。沉浸式虚拟结肠镜检查。《 *IEEE* 可视化与计算机图形学汇刊》，25(5)：2011–2021，2019年。doi：10.1109/TVCG.2019.2898763[8] 密歇根大学健康中心。结肠和直肠息肉。最后访问日期：2022年1月10日。[9] S. F. Paulo、D. Medeiros、P. B. Borges、J. Jorge 和 D. S. Lopes。改进沉浸式结肠成像中的摄像机运动路径。载于*2020*年*IEEE*虚拟现实与三维用户界面会议摘要与研讨会（*VRW*），第748–749页，2020年。doi：10.1109/VRW50115.2020. 00225[10] R. Stoakley、M. J. Conway 和 R. Pausch。WIM 上的虚拟现实：交互式微缩世界。载于*SIGCHI*人机交互系统大会论文集，CHI '95，第265–272页。ACM Press/Addison-Wesley 出版公司，美国，1995年。doi：10.1145/223904.223938[11] A. van Dam、A. Forsberg、D. Laidlaw、J. LaViola 和 R. Simpson。用于科学可视化的沉浸式虚拟现实：进展报告。*IEEE* 计算机图形学与应用，20(6)：26–52，2000年。doi：10.1109/38.888006[12] J. Venson、J. A. Berni、C. E. da Silva Maia、A. M. da Silva、M. C. d'Ornellas 和 A. Maciel。放射科医生在虚拟现实中执行诊断任务的案例研究。载于*InMEDINFO 2017*：通过信息学实现精准医疗：第*16*届世界医学与健康信息学大会论文集，第245卷，第244页。IOS Press，2018年。