头戴式显示器上增强现实应用程序的特征与性能研究：Hololens 应用商店研究

Pubudu Wijesooriya、Sheikh Muhammad Farjad、Nikolaos Stergiou 内布拉斯加大学奥马哈分校{pwijesooriya, sfarjad,nstergiou}@unomaha.edu

Spyridon Mastorakis 圣母大学 mastorakis@nd.edu

arXiv:2303.07523v1 [cs.MM] 13 Mar 2023

摘要—近年来，基于头戴式显示器（HMD）的增强现实（AR）备受关注。然而，多年来究竟开发了哪些基于 HMD 的 AR 应用程序，以及它们在 HMD 上运行时的系统性能如何，仍不清楚。本文旨在对此进行探讨。鉴于 HoloLens 头显应用广泛，我们的研究聚焦于 Microsoft HoloLens 应用商店中的应用程序。研究主要分为两部分：（i）我们收集 Microsoft HoloLens 应用商店中应用程序的元数据，以了解其特征（例如类别、定价、所请求的权限、硬件和软件兼容性）；（ii）我们在 HoloLens 2 头显上运行这些应用程序并与之交互，同时收集系统相关指标（例如内存和存储使用量、CPU 和 GPU 相关操作所耗费的时间），以考察应用程序的系统性能。本研究得出了一些有趣的发现，并与研究界分享。

索引词—**HoloLens、增强现实、测量**

I. 引言

近年来，基于头戴式显示器（HMD）的增强现实（AR）应用日益受到关注 [1]。人们开发了各种 AR HMD 应用，也推出了多款头戴式设备，例如 Microsoft HoloLens [2] 和 Magic Leap [3]。尽管发展迅速，但多年来实际开发了哪些类型的应用，以及这些应用在 HMD 上运行时会占用哪些资源（例如计算、内存、存储），仍不清楚。换言之，这些应用在 HMD 上运行时的系统性能如何，尚未得到明确了解。这些信息有助于深入了解 AR 应用在现实世界中的使用场景，并为 AR 应用和 HMD 的未来设计与开发决策提供参考。

基于上述观点，本文研究了 AR HMD 应用的特征和系统性能。鉴于 HoloLens 头显近年来得到了广泛使用，我们的研究聚焦于 Microsoft HoloLens 应用商店中的应用。本文的贡献主要有两方面：

- 我们收集了 HoloLens 应用商店中可用应用程序的元数据。这些元数据让我们得以了解多年来开发的增强现实应用的特征，例如其类别、目标受众、硬件和软件兼容性、定价以及所需的头显权限。
- 我们与每个应用程序交互五分钟，并收集其性能方面的系统相关数据以及每个应用程序在 HoloLens 2 头显上运行时占用的资源（例如计算、内存、存储）。根据这些数据得出的结论，可以为增强现实应用程序和头戴式显示器开发者提供有用的指导。

据我们所知，本文是社区迄今开发的增强现实头戴式显示器应用中，首批尝试了解其性质、系统性能及影响的研究之一。我们通过以下链接向研究社区公开所收集的数据：https://drive.google.com/drive/folders/1A4815PtyC6CIm-TnS8BgoT1DqehDVaQf?usp=sharelink。

II. 背景与动机

Microsoft 于 2016年 发布了 HoloLens。HoloLens 多年来一直在 Project Baraboo 项目框架下开发。它是首款让用户能够体验增强现实环境，并与该环境进行交互的头戴式显示器。该设备基于 Windows 混合现实（WMR）平台，搭载 Windows 10 和 11 操作系统。WMR 负责在真实世界环境中渲染虚拟对象，并使用户能够与 WMR 叠加的 3D 虚拟叠加层进行交互。在 HoloLens 取得进展之后，Microsoft 发布了名为“HoloLens 2”的第二代产品。HoloLens 2 支持开发游戏和娱乐应用，同时也为企业市场和商业客户提供支持。与上一代产品相比，HoloLens 2 凭借改进的手势跟踪系统和更大的视场，为用户带来更优质的体验。

A. HoloLens 与传统增强现实头戴式显示器

1) 全息处理单元：全息处理单元（HPU）可能是 HoloLens 最重要的组件。它是一种定制的多处理器，负责处理从机载传感器传送到头戴式设备的信息，包括飞行时间深度传感器、惯性测量单元和头部跟踪摄像头。HPU 有助于预先计算传感器数据、进行手势识别、绘制用户周围环境的地图，以及在现实世界中维持虚拟三维物体的位置。

2）共享增强环境：HoloLens 提供了一个围绕用户的共享环境功能。不同用户可以通过配对各自的头戴式设备，共享同一个增强环境。共享设备之间建立的通信信道

本文已被 2023年IEEE国际通信会议（ICC 2023）录用。© 2023 IEEE。允许个人使用本材料。任何其他用途均须获得 IEEE 的许可，无论是在当前还是未来的媒体中，包括为广告或宣传目的重印或再版本材料、创作新的汇编作品、转售或重新分发至服务器或列表，或在其他作品中重复使用本作品的任何受版权保护的组成部分。

使用户能够利用手势追踪等操作来修改投影虚拟环境。此功能有助于开发用于协作活动的应用 [4]

3) 手势追踪：与传统的增强现实头戴式显示器不同，HoloLens 并不主要依赖光学标记来确定虚拟对象的坐标。虚拟触摸交互、手部射线指针、空中点击和凝视提供了灵活多样的手势操作。沉浸式环境结合 HPU，使 HoloLens 能够识别手势。

B. 研究动机

HoloLens 头显一直是最受欢迎、使用最广泛的增强现实头戴式显示器之一。然而，该设备在很大程度上仍是专有的，关于其内部运行机制的信息也十分有限。此外，近年来开发并面向头戴式显示器运行的 AR 应用数量不断增长，尤其是面向 HoloLens 的应用，但以下问题仍不清楚：(i) **这些年来开发了哪些 AR 应用**——例如，这些应用的性质、发布时间、所需的软件和硬件支持，以及它们在头戴式显示器上运行时需要哪些权限；以及 (ii) **这些应用在头戴式显示器上运行时需要/占用哪些系统资源（例如存储、内存、计算资源）**。

了解 (i) 和 (ii) 不仅能为人机交互和扩展现实（XR）领域的研究群体提供有益见解，也能为计算机系统领域的研究群体带来启发。这些见解最终有助于揭示多年来广受欢迎以及一直被忽视的增强现实应用场景，并为未来的增强现实应用研究与开发，以及头戴式显示器软件和硬件的开发提供参考。

C. 主要目标

本文旨在通过研究 Microsoft 应用商店中的 AR 应用，初步探索我们上文讨论的动机。我们的研究分为两大部分：(i) 首先，我们收集并分析应用元数据（第 III 节）；(ii) 然后，我们与这些应用进行交互，收集它们在 HoloLens 头显上运行时与系统性能和资源使用相关的数据。

III. 应用元数据

本节介绍我们对 HoloLens 应用程序元数据的研究，这些元数据为每个应用程序提供描述性概览
应用程序。我们开展这项研究的目的是了解多年来开发的应用程序。

A. 收集

我们通过以下两个来源收集了 451 个 AR 应用的元数据：

- **应用程序 Web 门户：**收集元数据的主要来源是 Microsoft Web Portal。虽然 HoloLens Web 门户提供了大多数应用程序的元数据，但也有一些应用程序未列在网站上。
- **HoloLens 头显：**对于未列在 Web 门户上的应用程序，我们通过直接浏览头显中的应用程序商店来收集其元数据。

B. 描述

收集的元数据包含有关 HoloLens 应用程序的各种属性，包括每个应用程序的应用名称、类别、评分、发行商、开发者、文件大小、发布日期、权限、语言，以及所需的软件和硬件支持。这些属性有助于我们了解自第一代 HoloLens 发布以来 AR 开发者所开发的应用程序的特点。

C. 分析

1) 语言学研究：HoloLens 应用程序支持 65 种语言。图 1 所示的结果表明，绝大多数应用程序使用的语言是英语。6.9% 的应用程序支持多种语言。在这些应用程序中，英语都是支持语言之一，其他支持的语言可能包括西班牙语、德语、法语、意大利语、日语、中文和葡萄牙语。最后，只有三个应用程序（占所有应用程序的 0.6%）仅支持英语以外的一种语言（具体而言是德语或中文）。

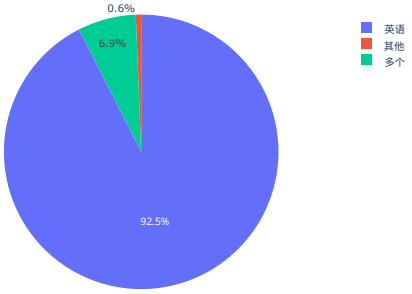


图1. 应用程序支持的语言可视化图。

2）类别分析：表I列出了可用的 HoloLens 应用程序所属类别。大多数应用程序被归入娱乐、教育、生产力和商业类别。少部分应用程序被归入其他类别，例如动作与冒险、实用工具、模拟、益智与问答、开发者工具、多媒体设计和体育。最后，我们将一些应用程序（占所有可用应用程序的 3.33%）归入一个名为“其他”的类别。该类别涵盖了不太热门的应用程序类别，例如图书与参考、健康与健身以及竞速与飞行。

3）目标受众：考察年龄因素时，如图2所示，我们发现 93.8% 的应用程序适合所有年龄段的人群。约 1.8% 和 4% 的应用程序分别仅适合至少 10 岁和 13 岁的人群。两款应用程序要求用户年满 17 岁。

4）应用程序请求的权限：表 II 展示了 HoloLens 应用程序请求的权限。大多数应用程序会请求访问用户当前及过去的周围环境、麦克风和互联网的权限。

表 I HoloLens 应用程序类别。

类别	百分比 应用程序（%）
娱乐	14.86
教育	14.63
生产力	14.41
商业	10.86
动作与冒险	5.54
实用工具	4.21
模拟	3.99
益智与问答	3.33
其他	3.33
开发者工具	2.66
多媒体设计	2.44
体育	1.99
策略	1.99
家庭与儿童	1.99
纸牌与棋盘	1.55
医疗	1.33
音乐	1.33
新闻与天气	1.33
照片与视频	1.33
射击游戏	1.11
购物	1.11
导航与地图	1.11
旅行	1.11
生活方式	1.11

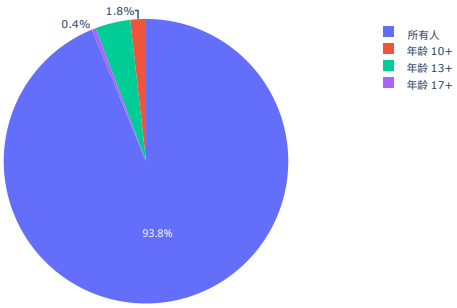


图 2. HoloLens 应用程序的目标受众与年龄的关系。

相当一部分应用程序还会请求将头戴式设备用作服务器的权限（通常用于接收来自互联网的传入数据，以及向应用程序开发者发送调试日志）、访问本地网络的权限（通常供通过局域网通信和/或在各种本地设备之间共享数据的应用程序使用），以及访问网络摄像头的权限。应用程序请求的其他权限包括访问头戴式设备上存储的各种库和文件（例如图片、视频和音乐）、访问用户当前位置、访问注视输入（通常用于交互式应用程序），以及访问 3D 对象。

根据收集到的元数据，一个有趣的发现是，少数应用程序请求访问所有系统资源、用户账户的用户名甚至密码，以及以管理员身份运行的权限。授予此类权限可能会给用户带来安全风险。例如，如果应用程序能够访问用户的 Microsoft 账户凭据，这些凭据可能会遭到泄露。如果允许应用程序以管理员权限运行，头戴式设备本身也可能遭到入侵。

5）支持的硬件架构：图 3 展示了 HoloLens 应用程序支持的硬件架构。收集到的元数据显示，大多数（61%）可用应用程序仅兼容 x86 架构。这种对 x86 架构的独家兼容性

表 II HoloLens 应用程序请求的权限。

权限	百分比 应用程序（%）
访问当前及过去的周围环境	76.50
访问麦克风	73.60
访问互联网连接	64.97
访问互联网连接并充当服务器	40.58
访问家庭或工作网络	36.58
访问网络摄像头	32.59
访问图片库	13.52
访问视频库	8.20
访问注视输入（通常用于 应用程序内的交互）	7.54
与已配对的蓝牙设备通信	7.09
其他（例如，屏幕投影、访问联系人、 运行时获取管理员权限、访问账户用户名 和密码、访问设备证书）	7.09
访问支持人机接口的设备 设备 (HID) 协议	6.65
访问 3D 对象	5.76
访问音乐库	4.88
访问当前位置	4.43
使用存储在外部存储设备上的数据	3.77
无信息	3.55
访问支持近场 通信（NFC）服务的设备	3.32
访问所有系统资源	2.66
访问用户账户的用户名和图片	2.44
发现并启动应用程序 在用户已登录的其他设备上	2.22
访问设备的互联网语音服务	1.55
扫描并连接到 WiFi 网络	1.55
访问企业域凭据	1.33
访问媒体播放器 在后台运行时	1.11

将这些应用程序的运行范围限制在第一代 HoloLens（Hololens 1）上。有人可能会认为，支持 x86 架构的应用程序可以转换为支持第二代 HoloLens（HoloLens 2）的 ARM 架构。的确如此，但整个过程相当繁琐，而且需要获取应用程序源代码。

如上所述，第二代 HoloLens 采用 ARM 架构。约 7.6% 的可用应用程序仅支持 ARM 架构。约 4.4% 的可用应用程序仅支持 x64 架构。我们认为，这些应用程序要么用于将头戴式设备与计算机/外围设备配对，要么兼容支持 Windows 混合现实平台的第三方头戴式设备（例如戴尔、宏碁和三星）。16.6% 的可用应用程序支持全部三种架构（x86、x64 和 ARM），而 6.4% 的应用程序同时支持 x86 和 ARM。最后，支持 x86 和 x64 以及 ARM 和 x64 的可用应用程序所占比例较小。

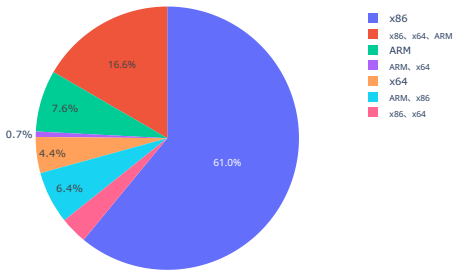


图 3. HoloLens 应用程序支持的硬件架构。

6）软件支持：图 4 展示了 HoloLens 应用程序所需的最低软件支持要求。该图表明，所有应用程序至少都需要 Windows 10 软件支持。大多数应用程序（55.7%）要求使用特定版本（发行版）或更新版本的 Windows 10，其余应用程序（44.3%）未指定最低

所需的 Windows 版本。40.1% 的应用程序将 Windows 10 build 10240 作为最低要求。这是 Windows 10 的原始发行版本，于 2015年7月29日 向公众开放。最后，15.6% 的应用程序要求使用较新版本（发行版）的 Windows 10。

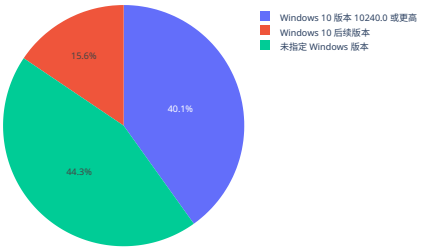


图 4. HoloLens 应用程序所需的最低软件支持。

7) 应用程序文件大小：图 5 展示了 HoloLens 应用商店中列出的应用程序文件大小。可用应用程序中，47.5% 的文件大小小于 100 MB。41% 的应用程序文件大小介于 100 MB 至 400 MB 之间。最后，可用应用程序中有 8.6% 的文件大小介于 400 MB 至 900 MB 之间，而文件大小大于 900 MB 的仅占 2.9%。

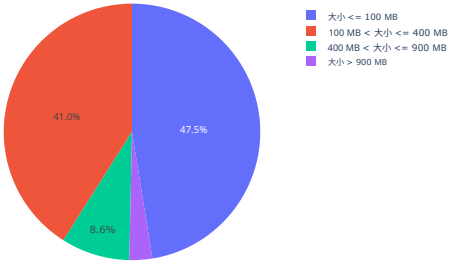


图 5. HoloLens 应用商店中列出的应用程序文件大小。

8) 发布年份：如图 6 所示，大多数应用程序是在 2016年至2018年间开发的。一个有趣的观察是，甚至在第一代 HoloLens 于 2016年正式发布之前，就已有应用程序开发完成。据我们了解，这些应用程序是在 Project Baraboo 项目框架下、HoloLens 的开发期间使用的。最后，收集到的元数据显示，只有 15.4% 的可用应用程序于 2019年及之后发布。

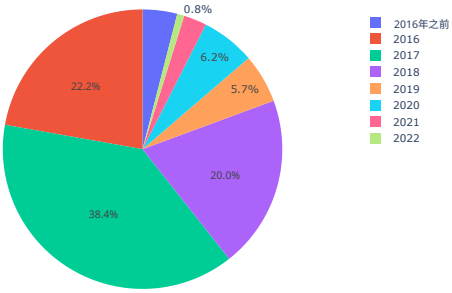


图 6. 按发布年份对 HoloLens 应用程序进行分类。

9) 应用程序定价：在图 7 中，我们展示了 HoloLens 应用程序定价的分类。绝大多数应用程序（86.7%）都是免费的，另有 3.8% 属于所谓的“免费+”应用程序，即用户可以免费下载，但可选择进行应用内购买（例如，解锁高级功能）。需要用户预先付费下载的应用程序约占所有应用程序的 9.5%。其中大多数（占所有应用程序的 6.9%）售价低于 10 美元，而 2.6% 的应用程序售价高于 10 美元。应用商店中最贵的两款应用程序售价均为 999.99 美元。

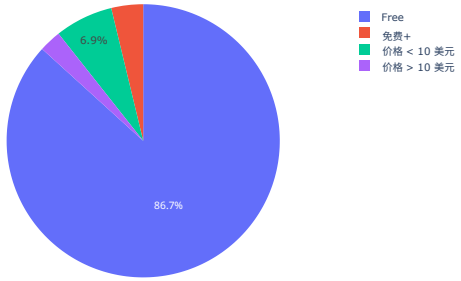


图 7. 按定价对 HoloLens 应用程序进行分类 。

IV. 系统相关数据

本节收集了跟踪文件，用于展示应用程序在 HoloLens 2 头显上运行时的系统性能。我们为 141 个兼容 HoloLens 2 ARM 架构的应用程序收集了此类跟踪数据。

A. 收集

我们收集了所有兼容 HoloLens 2 头显的应用程序的跟踪文件，并在与每个应用程序交互五分钟（300 秒）的时间内进行记录。为了收集这些跟踪数据，我们使用了 Windows 设备门户。它是随 Windows 设备提供的 Web 服务器，并提供用于实时监控 Windows 设备性能的工具 [5]。为了捕获头显运行期间各种系统级参数的数据，我们创建了自定义性能记录配置文件，并使用这些配置文件配置了头显上运行的 Windows 设备门户实例。我们将捕获的数据存储在事件跟踪日志 (ETL) 文件中。

B. 描述

我们通过 Windows 性能分析器检查 ETL 文件，并使用 Python 脚本自动从这些文件中提取数据。我们重点关注与以下系统资源类别相关的数据：中央处理器 (CPU)、图形处理器 (GPU)、内存和存储。通过调查应用程序在头显上运行时与这些类型的头显资源相关的数据，我们可以得出有关系统性能以及应用程序运行所需头显资源的结论。

C. 分析

1）CPU 资源：图 8 展示了头戴式设备运行可用应用程序时执行 CPU 相关操作所花费的时间。一个有趣的发现是，约 45% 的应用程序的 CPU 时间超过了我们与这些应用程序交互的时长，即五分钟（300 秒）。这是因为头戴式设备配备了八个

CPU 核心，因此应用程序会并行使用多个 CPU 核心来提升性能。在此背景下，我们的结果累计计算了应用程序运行期间所有 CPU 核心执行 CPU 相关操作所花费的时间。

与 GPU 和存储相关操作所耗费的时间相比（我们将在本节其余部分详细讨论这些操作），结果表明，头戴式设备在 CPU 相关操作上花费的时间更多。这是因为 CPU 是应用程序执行大多数类型计算和操作所使用的资源，例如处理输入、动画和物理运算。另一方面，GPU 仅用于有限的一组操作，主要包括 3D 对象渲染；而存储的使用频率更低，因为应用程序不需要大量持久化数据存储（即头戴式设备关闭后仍然保留的数据）。

对所收集 CPU 相关数据的进一步分析表明，在应用程序运行期间，头戴式设备主要使用八个可用 CPU 核心中的四个。其余四个 CPU 核心的平均利用率远低于 1%（通常接近 0.1%）。

2) GPU 资源： 图 8 展示了头戴式设备运行可用应用程序时执行 GPU 相关操作所花费的时间。结果表明，头戴式设备在 GPU 相关操作上花费的时间少于 CPU 相关操作。据我们理解，主要原因是，与用于执行各种其他操作的 CPU 相比，头戴式设备的 GPU 仅用于有限（但仍要求较高）的一组操作，主要是 3D 对象渲染。

进一步分析结果表明，大多数应用程序（约 57%）在头显上运行时，需要使用超过 60% 的头显 GPU 资源。另一方面，约 24% 的可用应用程序在运行期间使用的头显 GPU 资源不到 20%。对 GPU 资源需求较高的应用程序（即需要使用头显大部分可用 GPU 资源的应用程序）通常具有沉浸式图形，并涉及大量 3D 对象渲染操作；而图形较为简单的应用程序则使用较少的 GPU 资源。

3) 内存资源： 图 9 展示了运行可用应用程序时 HoloLens 头显的内存使用量（消耗）。可用内存总量为头戴式设备的内存为 4GB。我们的结果表明，6.5% 的应用程序的内存消耗低于 3GB。48.9% 的应用程序在头戴式设备上运行时，内存消耗介于 3GB 和 3.5GB 之间。44.6% 的应用程序在头戴式设备上运行时，内存消耗超过 3.5GB。

进一步分析结果表明，约有 12% 的可用应用程序在运行期间的不同时间点会完全占满可用内存资源。进一步分析还表明，在运行期间完全占满内存资源的应用程序会遇到大量缺页。当应用程序需要访问本应存储在主存中的数据时，就会发生缺页；然而，这些数据不得不存储在头戴式设备的存储资源中，因为主存已被完全占满。在这种情况下，应用程序访问这些数据所需的时间会更长，因为通常访问存储资源比访问主存更慢，正如我们将在下文第 IV-C4 节中进一步讨论的那样。

4) 存储资源：图 9 展示了 HoloLens 应用程序在头戴式设备上运行时的存储使用量（消耗量）。我们的结果表明，应用程序的存储使用量有限，因为绝大多数应用程序占用的存储空间不到 0.5 GB。与上一小节讨论的内存使用量结果相比，我们的结果表明，应用程序占用的内存多于存储空间。我们认为，这是因为访问主存比访问存储更快。此外，通常在主存被完全占用时会使用存储（内存分页），也会用存储来保存头戴式设备关机后仍需保留的数据。然而，应用程序存储的大多数数据在头戴式设备关机后都不需要保留，因为这些数据主要是在应用程序运行期间使用的。

图 8 展示了头戴式设备从存储资源读取数据以及向其中写入数据所花费的时间。与上述表明应用程序对存储资源的使用有限的结果一致，存储使用量较低，且操作速度快于 CPU/GPU 操作。

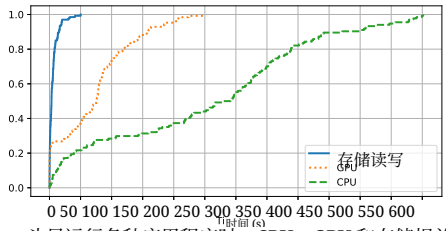


图 8. HoloLens 头显运行各种应用程序时，CPU、GPU 和存储相关操作耗时的累积分布函数图。

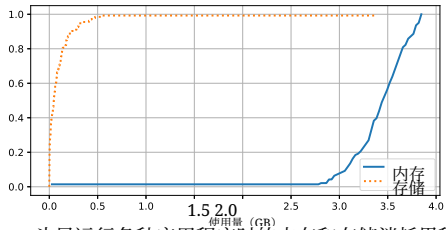


图 9. HoloLens 头显运行各种应用程序时的内存和存储消耗累积分布函数图。

V. 相关工作

虚拟现实（VR）和增强现实的应用场景：研究领域利用虚拟现实创建适用于各种应用场景的沉浸式环境。可视化和沉浸感有助于用户以有效的方式与周围环境互动并理解环境[6]。Ritter 等人研究了空手道运动员在虚拟环境中的反应 [7]。Iyer 等人提出了利用虚拟现实促进体育公共关系和沉浸式新闻发展的方法 [8]。军事和教育领域使用虚拟现实头显进行培训、教学并改善心理健康[9], [10]。虚拟现实也能促进旅游业的发展 [11]。

AR 应用探索的是增强用户对现实世界感知的应用场景，而非创建一个

独立的虚拟世界。例如，在制造业中，工人可以在组装制造零件的过程中查看相关操作说明 [12]。在教育领域，学生可以在增强现实课堂环境中与彼此及教师互动，并操控 3D 对象来探索和理解不同概念 [13]。在旅游中，游客游览著名景点时可以收到实时反馈 [14]。在临床环境中，医务人员可以使用增强现实提供有效的临床护理 [15]。

应用基准测试与审计：应用基准测试和审计分别是用于量化应用程序性能以及识别安全和隐私问题的技术。Richoz 等人 [16] 通过在移动设备上运行的分类器对应用程序进行了基准测试。Trimananda 等人 [17] 研究了 140 款 Oculus VR 应用程序，捕获了这些应用程序产生的网络流量，并分析了它们的隐私政策。Adams 等人 [18] 通过访谈虚拟现实用户和开发者，探讨了虚拟现实的安全与隐私问题。最后，Miller 等人 [19] 研究了用户在虚拟现实环境中的身体动作，并展示了这些动作如何帮助识别个人特征。

其他相关工作：Park 等人 [20]回顾了 44 篇于 2016年 至 2020 年 期间发表的关于 HoloLens 应用程序的论文。他们发现，这些应用程序可分为五类：医疗和手术辅助、医学教育与模拟、工业、建筑与土木工程，以及其他工程类别。

VI. 结论

本文研究了 Microsoft HoloLens 应用商店中提供的 AR 应用。根据我们的分析，我们得出了以下四个主要结论：

- 现有的 AR 应用主要集中在四个类别：娱乐、教育、生产力和商业。其他类别也有一些应用程序，但数量要少得多。

- HoloLens 应用程序通常会请求多种权限，例如访问用户过去和当前周围环境的权限、访问头显麦克风的权限，以及访问本地网络的权限，以便头显能够通过防火墙进行通信并与本地设备共享数据。这些权限可能引发安全和隐私方面的担忧。此外，少数应用程序可能造成更为严重的安全影响，因为它们请求访问所有系统资源和用户账户凭据的权限，以及以管理员身份运行的权限。

- 大多数适用于 HoloLens 的 AR 应用都兼容第一代 HoloLens，因此如今已过时且使用不便。这是因为第一代 HoloLens 头显不仅已停产，而且目前针对该头显提供的软件支持也相当有限（如果仍有支持的话）。

- 在 HoloLens 2 头显上运行时，AR 应用主要占用 CPU 和内存资源。应用程序运行期间，对 GPU 和存储等资源的使用程度较低。

我们最终认为，要让扩展现实广泛融入日常生活，需要人机交互、计算机系统与网络、安全和隐私等多个领域共同努力。我们希望本文能为这些领域的研究人员提供有益的见解，助力实现这一愿景。

致谢

本研究部分经费由美国国家科学基金会（资助项目 CNS-2104700、CNS-2306685、CNS-2016714 和 CBET-2124918）、ACM SIGMOBILE 以及美国国立卫生研究院（资助项目 NIGMS/P20GM109090）提供。

参考文献

[1] Kangsoo Kim 等人。重新审视增强现实研究趋势：回顾 ISMAR 的第二个十年（2008–2017）。*IEEE*《可视化与计算机图形学汇刊》，24(11):2947–2962，2018年。[2] Microsoft HoloLens 2 网站。https://www.microsoft.com/en- us/hololens。[3] Magic Leap 2 网站。https://www.magicleap.com/en-us/。[4] Aida Vidal-Balea 等人。基于 Microsoft HoloLens 2 和边缘计算的增强现实教学系统：分析、设计与实践验证。《工程学论文集》，2(1)，2020年。[5] Windows 设备门户概述。https://learn.microsoft.com/en-us/windows/uwp/debug-test-perf/device-portal。[6] Erica Southgate 等人。将沉浸式虚拟现实融入课堂：弥合研究与实践鸿沟的伦理、组织与教育经验。《国际儿童与计算机交互期刊》，19:19–29，2019年。[7] Yvonne Ritter、Melina Droste、Dan B¨urger、Stefan Pastel 和 Kerstin Witte。比较空手道组手在现实世界与虚拟现实中的反应行为。《体育工程》，25，2022年。[8] Shravan Regret Iyer、John Pavlik 和 S. Venus Ji。利用虚拟现实（VR）开展体育公共关系与体育新闻：对“俄罗斯 2018”和“卡塔尔 2022”国际足联世界杯 VR 内容制作的定性分析。《体育与旅游期刊》，第 1–28 页，2022年。[9] Lei Fan、Jing Chen、Yuandong Miao、Jie Ren 和 Yongtian Wang。基于增强现实的多车辆协同军事训练仿真系统。载于 *2019*年 *IEEE* 混合与增强现实国际研讨会附属会议（*ISMAR-Adjunct*），第 128–133 页，2019年。[10] Imogen H Bell 等人。虚拟现实作为心理健康研究与实践中的临床工具。《临床神经科学对话》，2020年。[11] Julia Beck、Mattia Rainoldi 和 Roman Egger。旅游业中的虚拟现实：最新进展综述。《旅游评论》，2019年。[12] Andrew YC Nee、SK Ong、George Chryssolouris 和 Dimitris Mourtzis。增强现实在设计与制造中的应用。《国际生产工程科学院年刊》，61(2):657–679，2012年。[13] Misty Antonioli、Corinne Blake 和 Kelly Sparks。增强现实在教育中的应用。《技术研究期刊》，2014年。[14] Zornitza Yovcheva、Dimitrios Buhalis 和 Christos Gatzidis。面向旅游业的智能手机增强现实应用程序。《旅游研究电子评论》（*ERTR*），10(2):63–66，2012年。[15] Donald M Hilty 等人。远程临场、虚拟现实和增强现实在临床护理中的应用综述。《行为科学技术期刊》，5(2):178–205，2020年。[16] Sebastien Richoz 等人。在移动设备上对用于基于视觉的交通工具识别的深度分类器进行基准测试。载于*2019*年 *ACM*普适与泛在计算国际联合会议论文集及*2019*年 *ACM* 可穿戴计算国际研讨会论文集，第 803–807 页，2019年。[17] Rahmadi Trimananda 等人。OVRseen：审计 Oculus VR 中的网络流量与隐私政策。载于第 *31* 届 *USENIX*安全研讨会（*USENIX Security 22*），第 3789–3806 页，美国马萨诸塞州波士顿，2022年 8 月。USENIX协会。[18] Devon Adams 等人。伦理问题浮现：虚拟现实中的隐私与安全认知。载于第十四届可用隐私与安全研讨会（*SOUPS 2018*），第 427–442 页，美国马里兰州巴尔的摩，2018年 8 月。USENIX协会。[19] Mark Roman Miller 等人。观看 360度虚拟现实视频时用户追踪数据的个人可识别性。《科学报告》，10，2020年。[20] Sebeom Park、Shokhrukh Bokijonov 和 Yosoon Choi。过去五年 Microsoft HoloLens应用的综述。《应用科学》，11(16)，2021年。