

研究报告

(2024 年第 6 期 总第 38 期)

2024 年 4 月 12 日

空间计算行业图谱¹

科创金融研究中心

朱雅姝, 安砾

【摘要】 空间计算是在利用空间的特有属性来指导计算过程，在三维的基础之上，以人为本，连通及融合虚拟世界与现实世界的一个全新的计算范式。本文首先从技术定义出发，阐明空间计算的概念和发展历程，介绍空间计算全球的政策情况和应用场景，重点从技术流程和产业链两个角度对空间计算行业进行分析，并进一步对全球市场现状和研发进度做了深入的调研定位。

空间计算和数字孪生都是构建元宇宙的基础技术，以创造出更加逼真、开放和互动的虚拟世界。下面简要介绍其区别与联系，关于数字孪生的行业分析详见《数字孪生行业图谱》²。空间计算是一种计算范式，它利用空间感知和环境感知技术，将数字信息与物理空间相

¹ 感谢科创金融研究中心的实习生张与豪同学对本报告的助研工作。张与豪同学是清华大学医学院 2023 级博士。

² 《数字孪生行业图谱》是清华大学五道口金融学院科创金融研究中心出品的行业研究报告。2024 年系列。

结合，创造出一种与现实世界更加融合的交互体验。而数字孪生则是一种虚拟模型，它通过收集、整合现实世界物体或系统的数据，实时反映其状态、行为和性能，并且能够模拟其未来发展和行为。空间计算提供了将数字信息与物理空间相结合的能力，而数字孪生则提供了模拟和管理物理系统的能力。

空间计算的应用场景可涵盖零售业、远程教育、广告、游戏、医疗、军事、演示、培训、旅游等，为用户提供更加沉浸式、交互性强，并且与现实世界紧密结合的计算体验。空间计算也在仓库自动化、自动驾驶汽车和供应链自动化中发挥作用。

从技术角度，空间计算技术链上游为空间数据采集。空间数据可以分为场景数据、网格数据和深度数据，这些数据的采集基于结构光传感器、飞行时间传感器等。中游包括空间数据处理、空间数据显示，空间数据处理涉及到空间计算芯片和机器学习、数据处理算法，以实现空间定位、运动跟踪、手势交互等功能。空间数据显示在硬件上主要分为光学器件和显示屏，在算法上包括场景渲染、环境映射、虚实整合等。下游为空间数据交互，硬件上为终端，软件上包括操作系统、开发工具和内容应用部分。

从产业角度，产业链核心技术集中在上中游，硬件方面包括传感器、芯片和光学器件的制造，算法方面包括动态环境建模、实时 3D 图形生成、空间定位等技术。中国的优势在于光学器件和显示屏制造、软件开发与内容创作。

从行业角度，空间计算国际头部企业较多，国际企业技术平台主要有 Microsoft、Meta、Magic Leap、Google、Apple、Nreal 等，国

内头部企业较少，如 PICO、维享时空、宸境科技、虚拟动点等。但国内在空间计算产业链一些环节中发挥重要作用，如传感器方面：韦尔股份、水木智芯；光学器件方面：蓝特光学、水晶光电、韦尔股份等；显示屏方面：利亚德、奥拓电子、中微公司、精测电子等；芯片方面：万有引力、之行无界、瑞芯微等；整机代工方面：歌尔股份、闻泰科技、兆威机电、长盈精密等；开发工具方面：华为、爱奇艺等；内容方面：腾讯、网易、风语筑等。随着元宇宙的兴起，以及 **Meta** 在消费级空间计算上的商业成功，中国的空间计算市场迎来了第二次风口，华为、小米和 **OPPO** 等纷纷推出空间计算产品。

从科研角度，空间计算领域中国研究者发力点多集中在产业链中的某一环节，而非全流程都涉及，主要集中在光学硬件、视觉算法和内容端。

Research Report

April 12, 2024

Atlas of the Spatial Computing Industry³

Research Center for Sci-Tech and Finance

Yashu Zhu, Li An

Abstract:

Spatial computing is a new computing paradigm that utilizes the unique properties of space to guide the calculation process, based on three-dimensional principles, with a people-oriented approach, connecting and integrating the virtual world and the real world. In the report, we first give a brief introduction about spatial computing, including the technology definition, the development process, the global policy situation and application. Then we analyze the spatial computing industry from the perspectives of technical processes and industrial chains, and further conducts in-depth research and positioning on the global market status and research progress.

Space computing and digital twins are fundamental technologies for

³ Thanks to intern Yuhao Zhang of Research Center for Sci-Tech and Finance at PBCSF Tsinghua University for his research assistance in this report. Yuhao Zhang is PhD. student at School of Medicine, Tsinghua University.

building the metaverse to create a more realistic, open, and interactive virtual world. Here is their differences and connections. For industry analysis of digital twins, please refer to the "Atlas of the Digital Twin Industry"⁴. Spatial computing is a computing paradigm that utilizes spatial and environmental perception technologies to combine digital information with physical space, creating an interactive experience that is more integrated with the real world. However, digital twin is a virtual model that collects and integrates data from real-world objects or systems to reflect their state, behavior and performance in real-time, which can simulate their future development and behavior. Spatial computing provides the ability to combine digital information with physical space, while digital twins provide the ability to simulate and manage physical systems.

The application scenarios of spatial computing include retail, remote education, advertising, games, healthcare, military, demonstration, training, tourism, etc., providing users with a more immersive, interactive, and closely integrated computing experience with the real world. Spatial computing also plays a role in warehouse automation, autonomous vehicle and supply chain automation.

From technical perspective, the upstream of the spatial computing technology chain is the collection of spatial data. Spatial data can be divided into scene data, grid data, and depth data, which are collected based on structured light sensors, Time of flight sensors, etc. The midstream includes

⁴ "Atlas of the Digital Twin Industry" is a research report produced by the Research Center for Sci-Tech and Finance, PBCSF, Tsinghua University, 2024 series.

spatial data processing, spatial data display. Spatial data processing involves spatial computing chips, machine learning, and data processing algorithms to achieve functions such as spatial positioning, motion tracking and gesture interaction. Spatial data display is mainly divided into optical devices and display screens in hardware, and algorithms include scene rendering, environment mapping, virtual and real integration, etc. Downstream is interaction using spatial data, hardware is the terminal, and software includes operating systems, development tools and content application parts. From industrial perspective, the core technologies are concentrated in the upper and middle of the spatial computing industrial chain. In terms of hardware, including the manufacturing of sensors, chips, and optical components. In terms of algorithms, including technologies such as dynamic environment modeling, real-time 3D graphics generation, and spatial positioning. China's advantages lie in the manufacturing of optical components and display screens, software development, and content creation.

From sector perspective, there are many leading international companies in spatial computing, with international enterprise technology platforms including Microsoft, Meta, Magic Leap, Google, Apple, Nreal, etc. There are relatively few leading domestic companies, such as PICO, pgverse, deepmirror, Virtual Point, etc. But China plays an important role in some aspects of the spatial computing industry chain, such as sensors: Will Semiconductor, TuMEMS; In terms of optical devices, such as Lante Optics, CrystalOptech, and Will Semiconductor; In terms of display screens: Leyard, Aoto, AMEC, Jingce Electronics, etc; In terms of chips: GravityXR, Zhixing

Wujie, Rockchip, etc; In terms of whole machine OEM: Goertek, Wingtech Technology, Zhaowei Machinery & Electronic, Evenwin Precision Technology, etc; In terms of development tools: Huawei, iQiyi, etc; In terms of content: Tencent, NetEase, Fengyuzhu, etc. With the rise of the metaverse and the commercial success of Meta in consumer grade space computing, China's spacial computing market has ushered in a second wave of growth, with Huawei, Xiaomi, and OPPO launching spacial computing products one after another.

From scientific research perspective, Chinese researchers in the field of spacial computing tend to focus their efforts on a certain link in the industry chain, rather than covering the entire process, mainly on optical hardware, visual algorithms and content.

目 录

一、空间计算概述.....	1
(一) 技术定义.....	1
(二) 发展历程.....	3
(三) 全球政策情况.....	7
(四) 中国政策情况.....	12
(五) 应用场景.....	14
二、空间计算技术流程.....	17
(一) 技术流程概述.....	18
(二) 空间数据采集.....	19
(三) 空间数据处理.....	29
(四) 空间数据显示.....	31
(五) 空间数据交互.....	35
三、空间计算产业链.....	36
(一) 产业链上下游.....	36
(二) 产业链中国优劣势.....	41
(三) 产业链核心技术竞争点.....	44
四、空间计算行业分析.....	52
(一) 行业现状与中国优势.....	52
(二) 国际企业技术平台情况.....	55
(三) 国际企业融资情况.....	57
五、空间计算科研概况.....	63
六、专业术语解析.....	71
参考文献.....	74

图表目录

图 1-1 空间计算示意图[1]	2
图 1-2 空间计算、虚拟现实、增强现实、元宇宙和物理现实的关系	3
图 2-1 空间计算技术流程	18
图 2-2 空间数据采集[5]	19
图 2-3 空间数据类型	21
图 2-4 网格数据示例[6]	23
图 2-5 结构光传感器原理图[7]	23
图 2-6 飞行时间传感器原理图[8]	25
图 2-4 环境空间数据采集示意图[9]	26
图 2-7 惯性测量单元原理图[10]	28
图 2-8 光波导原理图[11]	33
图 2-9 Micro OLED 结构图[12]	34
图 2-10 AMOLED 结构图[13]	35
表 3-1 空间计算产业链	37
表 3-2 空间计算专利被引排名	47
表 3-3 空间计算芯片公司核心技术	47
表 3-4 空间计算光学器件公司核心技术	48
表 3-5 空间计算显示屏公司核心技术	51
表 4-1 国际公司产品优劣势分析	56
表 4-2 以空间计算为概念的企业融资情况	58
表 4-3 以混合现实为概念的企业融资情况	61
表 5-1 产业链环节高校团队研究内容	65

一、空间计算概述

2023年6月6日，在 WWDC 2023 开发者大会上，苹果 CEO 蒂姆·库克说：“今天标志着计算技术新时代的开端。如同 Mac 将我们带入个人计算时代，iPhone 将我们带入移动计算时代，Apple Vision Pro 将带我们进入空间计算时代。”发布会现场展示了佩戴 Apple Vision Pro 在真实的空间中操控电子屏幕，仿佛科幻电影中的场景。就像当年苹果智能手机的问世，直接用手指就可以操纵的多点触控屏幕，这很可能标志着空间计算将改变人机交互方式。

（一）技术定义

空间计算是一种以空间为基础的计算方法，将物理空间与计算能力相结合，以人为本，通过感知、分析、交互来连通及融合虚拟世界与现实世界的一个全新的计算范式。

空间计算被定义为在人与机器的交互过程中，机器能够采集真实物体与所在空间的信息，使人和空间进行交互（由 Simon Greenwold 于 2003 年给出）。与传统的个人计算、移动计算相比，空间计算可以将现实构成的物理世界与数字构成的虚拟世界连接在一起，以实现更广泛的应用。

空间计算的核心是将虚拟和现实世界进行融合，使用户能在现实环境中进行虚拟操作和感知。在硬件上需要高精度的传感器、摄像头、定位技术、计算能力等，在算法上需要计算机视觉、云计算

等，将实际物理空间与实时数据、虚拟对象结合，从而创造出融合现实和虚拟的体验。



图 1-1 空间计算示意图^[4]

空间计算还需要直观自然的交互方式，如手势识别、语音识别等技术，使用户自由方便地操控虚拟对象。空间计算可以实现实时的环境感知、三维重建、物体识别和交互等功能，使用户在现实世界中与虚拟对象进行互动、获取实时信息并进行协作和决策。

空间计算可以应用于各个领域，如游戏、教育、医疗、军事等，为用户提供更加沉浸式、交互性强，并且与现实世界紧密结合的计算体验。空间计算也在仓库自动化、自动驾驶汽车和供应链自动化中的自主计算应用中发挥作用。

此外，我们有必要厘清空间计算、虚拟现实、增强现实、元宇宙和物理现实的关系。空间计算基于虚拟现实、增强现实、混合现实、物联网、数字孪生、环境计算、人工智能等技术，由于可连接现实世界与虚拟世界，空间计算是实现元宇宙的关键组成部分，也被业界人士称之为打开“元宇宙的钥匙”。

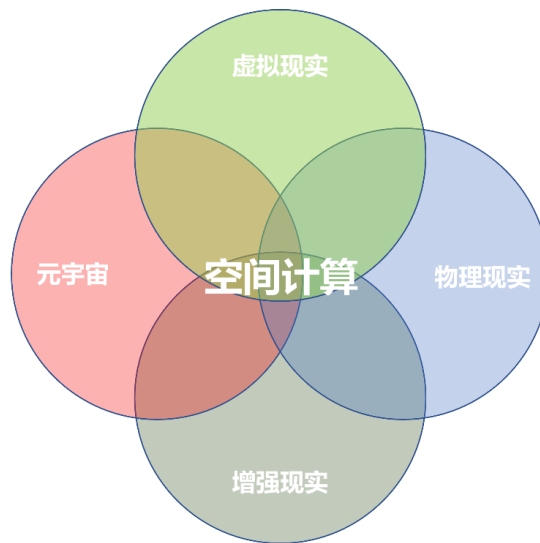


图 1-2 空间计算、虚拟现实、增强现实、元宇宙和物理现实的关系

耐克 Metaverse 工程总监 Andrew Schwartz 最近在推特上发表了为什么空间计算可以带来变革。他写道：“如果互联网的组织原则是信息想要共享，元宇宙的组织原则是信息想要体验，那么空间计算将创造这些体验所需的工具结合在一起。”

我们需要认真对待空间计算，也许不是今天，而是在未来十年，因为它将改变人们的交互方式，随着空间计算开始进入我们的生活，就像手机进入我们的生命，改变我们彼此的互动方式一样。它有可能从根本上改变人们对计算的看法，从同事之间的协作，到支持创造力和优化业务流程。世界正在不断地转变为一个物理和虚拟的混合世界。^[2]

（二）发展历程

1. 技术萌芽期（1800–1950）

技术概念的提出与幻想。

1838 年，科学家查尔斯惠斯通爵士概述了“立体视觉”或“双眼视觉”的概念——大脑将两幅图像（每只眼睛各一幅）组合成一幅 3D 图像。基于此开发了第一台立体镜，拍摄一对图像并将它们转换为具有深度视觉的 3D 图像。立体显示器用于当今的空间计算系统，为数字图像带来深度感，从而增强沉浸感。

1900 年代初期，当时美国科幻作家斯坦利·温鲍姆 (Stanley Weinbaum) 出版了皮格马利翁的眼镜，其中主角戴着一副护目镜探索虚构的世界。这是对我们今天所知道的空间计算的第一次幻想。

2. 技术成长期 (1950-2010)

技术在短期内实现功能上跃进。

1956 年，电影摄影师 Morton Heilig 创造了第一台 VR 机器 Sensorama。这台机器将 3D、彩色视频与音频、气味和振动椅相结合，让观众沉浸在电影中。

基于 Heilig 的想法，Philco 的工程师于 1961 年创造了 Headsight。这是为军事用途而设计的第一款具有运动跟踪技术的 VR。在 1960 年代，计算机科学家伊万·萨瑟兰 (Ivan Sutherland) 发表了一篇论文，概述了他的“终极显示”概念，这是一个逼真的虚拟世界，用户无法将其与现实区分开来，这被认为是现代 VR 的蓝图。在 1968 年，哈佛大学教授 Ivan Sutherland 创造了第一款 AR，这款设备显示了计

计算机生成的图形，增强了用户对世界的感知——这是当今空间计算设备的早期先驱。

进入 20 世纪 70 年代，麻省理工学院创建了阿斯彭电影地图，这是一个计算机生成的阿斯彭街道之旅，它是使用汽车在城市中行驶时拍摄的照片创建的。这种体验可以说是第一个展示 VR 将用户完全传送到另一个地方。

在 1980 年代，出现了增强 VR 体验的新技术。第一家销售 VR 眼镜的公司 VPL Research Inc 成立于 1985 年——它是 VPL 的创始人之一 Jaron Lanier，他在 1987 年创造了“虚拟现实”一词。1998 年，Sportsvision 直播了第一场使用 VR 的现场直播比赛。它改变了游戏规则，在真实世界视图上叠加图形的想法迅速传播到其他体育广播。

3. 期望膨胀期（2010–2014）

技术进步引发期望升高，开始出现公司众筹。

2010 年，18 岁的 Palmer Luckey 创造了 Oculus Rift VR 的原型。凭借其 90 度视野和计算机处理能力的使用，这重新点燃了人们对 VR 的兴趣。后来，这款头戴设备在 Kickstarter 上发起众筹，筹得 240 万美元，Luckey 的公司 Oculus VR 于 2014 年被 Facebook 以约 20 亿美元的价格收购。

4. 低谷期（2014–2016）

消费者对于消费级产品不冷不热。

在 2014 年，索尼和三星宣布他们正在打造自己的 VR。谷歌也发布了其首款 Cardboard 设备，并推出了 Google Glass AR 眼镜，它将数字信息叠加到现实世界中，并允许用户访问 Gmail 等应用程序。然而，消费者对谷歌 AR 眼镜的反应不冷不热。

5. 复苏期（2016-2021 上半年）

相关企业大量涌现，消费级硬件开始大量出现。

在 2016 年，微软发布了 HoloLens，通过创造更具交互性的体验，将 AR 的理念提升到一个新的水平。到 2016 年底，数百家公司正在开发 VR 和 AR 体验。

2019 年，Oculus Quest 发售，VR 游戏 Beat Saber 销量超过 100 万份，行业进入复苏期。Oculus Quest2 等消费级硬件出现，《Half-life:Alyx》等爆款内容不断增多，硬件内容生态不断完善，渗透率加速提高。

6. 爆发期（2021 下半年-至今）

元宇宙、Web3.0 等新概念推动技术进步，进入空间计算时代。

2021 年下半年，元宇宙、Web3.0 等概念掀起新的产业浪潮，带动行业进入成长期，Meta、苹果、字节跳动、华为等国内外头部厂商迅速加快业务布局。

2023 年，在 WWDC 2023 开发者大会上，苹果发布 Apple Vision Pro，标志着空间计算时代正式到来。

（三）全球政策情况

1. 美国研究规划

美国政府推动技术研发，国防应用驱动力强，注重标准制定和行业合作。

（1）政府举措

虽然没有专门针对空间计算的具体联邦政策，但美国政府已经启动了支持研发的举措。例如，美国国家科学基金会（NSF）资助探索空间计算在医疗、教育和劳动力培训等领域应用的项目。

（2）州和地方政策

一些州和地方政府采取措施促进空间计算相关产业和创新，包括提供赠款、税收优惠和创建创新中心或以空间计算为重点的研究中心，例如加利福尼亚州、纽约州和华盛顿州。侧重于相关行业的经济发展、创新和劳动力培训。

（3）国防应用

美国国防部一直是空间计算技术的重要驱动力，其一直在积极研究和实施用于训练目的的空间计算技术，例如用于军事训练的虚拟现实模拟。国防高级研究计划局（DARPA）也投资于 XR 研究，重点关注军事行动中的增强现实等领域，侧重于训练模拟、态势感知和人机界面等领域。

（4）标准和指南

美国国家标准与技术研究所（NIST）参与制定 XR 技术的标准和指南，以确保安全性、互操作性和可用性。

（5）技术研发

美国国家科学基金会（NSF）资助了与空间计算相关的研究项目，包括增强现实（AR）、虚拟现实（VR）和混合现实（MR）等领域。这些项目旨在促进各学科对空间计算的理解、开发和应用。美国各地的许多大学和研究院都建立了自己的项目和中心，专门从事空间计算研究。这些实体经常与行业合作伙伴合作并从公共和私人来源获得资金，以促进对空间计算的理解和应用。

（6）行业合作

美国政府鼓励学术界、行业和政府机构之间的合作，以推动空间计算研究。公私伙伴关系和倡议往往是为了支持这一领域的研究、开发和商业化努力而形成的。

2. 欧洲研究规划

欧盟制定总体计划，各欧洲国家多措并举，注重合作。

（1）政府举措

欧盟已认识到空间计算的潜力，并已采取措施支持该领域的研发。根据欧盟的地平线 2020 计划，资金已分配给 XR 和沉浸式技术相关的项目。该计划旨在通过向符合条件的组织和研究人员提供财政支持，促进包括 XR 在内的各个部门的研究和创新。欧盟委员会还发起了促进 XR 研究和创新的举措。例如，数字欧洲计划是欧盟长期

预算的一部分，其中包括 XR 相关项目的拨款。目标是增强欧洲的数字能力和竞争力，XR 是重点领域之一。

(2) 各欧洲国家举措

各个欧洲国家都有自己的政策和举措来支持空间计算研究。例如，德国成立了巴伐利亚 XR HUB，这是一个促进 XR 创新与合作的中心。此外德国建立了“数字中心倡议”，以支持 XR 在特定地区的创新和研究。同样，英国通过工业战略挑战基金等项目对 XR 研究进行了投资。法国还发起了“法国科技”倡议，将 XR 作为研发的重点领域之一。欧洲各地的各种研究机构和大学都有专门的 XR 研究中心和项目。这些中心经常与行业合作伙伴合作，并从公共和私人来源获得资金。

3. 日本研究规划

日本政府举措众多，注重技术研发。

(1) 政府举措

日本政府为了促进空间计算研究和创新，推出了多项计划和举措。如跨部委战略创新促进计划（SIP），该计划将 XR 作为其重点领域之一。SIP 旨在促进学术界、工业界和政府之间的合作，以加速技术进步和应对社会挑战。SIP 下的 XR 项目获得研究和开发资金和支持。

(2) 技术研发

日本科学技术厅（JST）为 XR 研究项目提供赠款和资助机会。这些拨款支持 XR 技术的基础研究和应用研究。日本的各个大学和研究机构都建立了专门的研究中心和实验室。这些中心经常与行业合作伙伴合作，并从公共和私人来源获得资金，以推进研究。

4. 韩国研究规划

韩国政府重视程度高，促进技术研发，注重监管和行业合作。

（1）政府举措

韩国政府将空间计算作为关键技术纳入国家战略计划。科学和信息通信技术部（MSIT）一直通过各种举措和计划积极参与促进 XR 的研究和开发。值得注意的举措是“XR 融合技术开发项目”，旨在促进 XR 技术创新和商业化。该项目为从事 XR 相关研发活动的研究机构、大学和公司提供资金和支持。

（2）技术研发

此外，韩国政府还建立了以空间计算为重点的研究中心和研究所，以促进学术界、工业界和政府之间的合作。这些中心是 XR 研究、知识共享和技术转让的中心。韩国一直在举办以 XR 为重点的活动和会议，如韩国 XR 节，以展示该领域的进步并促进行业利益相关者之间的合作。韩国公司尤其是游戏和娱乐行业的公司，一直处于 XR 开发的前沿。他们一直在积极利用空间计算技术创造身临其境的体验。韩国一直处于 5G 网络实施的前沿，这对提供无缝 XR 体验至关重要。政府提供了支持和投资，以推广 5G 基础设施，从而实现 XR 应用。

(3) 监管框架

韩国政府成立了韩国通信委员会（KCC），负责监督广播和通信服务。KCC 对内容分发和广播进行了监管，这间接影响了空间计算应用程序和平台。

(4) 行业合作

韩国政府鼓励行业、学术界和研究机构之间的合作，以促进空间计算创新。XR Consortia 等倡议将各种利益相关者聚集在一起，交流知识并探索机会。

5. 澳大利亚研究规划

澳大利亚政府政策相对较少，注重行业应用和企业孵化。

(1) 政府支持

澳大利亚政府认识到空间计算的潜力，并通过赠款和资助机会提供支持。例如，澳大利亚研究委员会（ARC）为 XR 相关的研究项目提供资助，促进该领域的创新和进步。

(2) 行业应用

空间计算技术已在不同行业应用，包括游戏、建筑、教育、培训、医疗保健和娱乐。这些行业的公司正在利用 XR 来增强其产品，提高生产力，并提供身临其境的体验。

(3) 创业公司

澳大利亚有一个不断发展的创业生态系统，包括专注于空间计算的创业公司。这些公司正在开发创新的 XR 解决方案、应用程序和硬件，为该技术在国内的发展做出贡献。

（四）中国政策情况

1. 2016 年开始国家规划布局

2016 年 3 月《国民经济和社会发展第十三个五年(2016-2020 年)规划纲要》首次提出虚拟现实，明确未来将大力扶持虚拟现实技术，使其成为一个重要的经济增长点。

2016 年 4 月《虚拟现实产业发展白皮书 5.0》指出虚拟现实正处于产业爆发的前夕，即将进入持续高速发展的窗口期。

2. 近年五部门联合发布推动产业发展

2022 年 10 月 28 日，工业和信息化部、教育部、文化和旅游部、国家广播电视总局、国家体育总局，五部门联合印发《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划（2022-2026 年）》。提出至 2026 年我国虚拟现实产业总体规模超过 3500 亿元，虚拟现实终端销量超过 2500 万台，培育 100 家具有较强创新能力和行业影响力的骨干企业，打造 10 个具有区域影响力、引领虚拟现实生态发展的集聚区，建成 10 个产业公共服务平台；提出要建设广播电视和网络试听虚拟现实制作实验区，在文化旅游、融合媒体、商贸创意、智慧城市等领域融合发展。^[3]

3. 今年各省市地方纷纷出台政策支持产业落地

2023年3月8日，文化和旅游部办公厅发布《关于开展智慧旅游沉浸式体验新空间推荐遴选暨培育试点工作的通知》，指出智慧旅游沉浸式体验新空间是指依托旅游景区、度假区、休闲街区、工业遗产、博物馆等场所或相关空间，运用增强现实、虚拟现实、人工智能等数字科技并融合文化创意等元素，通过文旅融合、虚实结合等方式，让游客深度介入与互动体验而形成的一种旅游新产品、消费新场景。

2023年3月6日，北京市通州区人民政府办公室发布《北京城市副中心文化旅游区发展建设三年行动计划（2023-2025年）》的通知，指出强化数字科技赋能转化。深入挖掘数字科技与文旅产业融合创新点，加快VR、AR、5G等数字技术的应用，加速“数字+”解锁应用新场景。

2023年3月20日北京市朝阳区互联网3.0创新发展三年行动计划（2023年-2025年），指出聚焦虚拟现实、模型渲染、动作捕捉等关键环节，建设10个互联网3.0公共服务平台。

2023年3月6日湖北省武汉市汉阳区人民政府发布《关于加快元宇宙创新发展扶持政策（试行）的通知》指出重点扶持从事虚拟现实、增强现实、数字孪生、人工智能、网络安全、区块链、GPU、物联网等元宇宙底层支撑技术；研发设计生产虚拟主机、VR(虚拟现实)、AR(增强现实)、MR(混合现实)、脑机交互等元宇宙终端设备；聚焦教育医疗、创意设计、文化旅游等元宇宙场景内容生产和搭建的企业。

2023年3月23日，山东省人民政府发布《关于山东省2022年国民经济和社会发展计划执行情况与2023年计划草案的报告》，指出按照点上突破、抢占前沿的思路，前瞻布局未来产业，重点培育空天信息、磁悬浮等示范集群。抢抓元宇宙等未来产业发展风口，建设全国领先的虚拟现实产业基地。

2023年2月21日上午，“拥抱元宇宙，探索新视界”临港新片区XR产业大会在临港新片区滴水湖会议中心举行。会上，15个产业重点项目签约，总投资额177亿元，覆盖AR光学零件及产品制造、AI芯片、工业软件等多个领域。

（五）应用场景

1. 零售业

（1）帮助员工训练，提高工作效率

一些企业已经开始将空间计算应用到他们的培训系统中，使得员工沉浸在虚拟环境中。例如，美国零售巨头沃尔玛利用空间计算来培训员工，模拟不同顾客服务场景和管理挑战，以提高员工的服务质量和管理能力。沃尔玛与 Stivr 公司合作，沃尔玛对其员工进行了真实世界场景的模拟，让员工做好应对假期高峰或处理零售业普遍存在的意外问题等情况的准备。

（2）改善和简化客户的在线购物体验

除了零售员工培训，空间计算还用于改善和简化客户的在线购物体验，例如虚拟试衣、虚拟商场等，以及增强真实购物的体验感

和便捷度，如给购物商品增加虚拟因素，便于客户对商品价格、用途的了解。

2. 教育与培训

(1) 提高学习成绩和趣味

教育是采用空间计算的行业之一。根据 Koch 的网站，空间计算在教育中的应用使训练成绩从测试前到测试后提高了 20%。通过在课堂上使用空间计算，学习变得更加有趣和引人入胜，并帮助学生在课堂上有所期待。

例如美国的一些大学和医学院使用 Magic Leap，改变医学教育的方式。学生可以以三维形式观察人体解剖结构，提供了前所未有的互动学习体验。例如 Case Western Reserve University 与 Cleveland Clinic 合作，通过增强现实技术提供解剖学和生理学课程。谷歌通过空间计算技术使学生虚拟参观卢浮宫博物馆来上历史课，他们甚至可以与恐龙一起漫游。

(2) 军事训练

空间计算在军事和飞行员训练中非常有用。士兵和飞行员通过空间计算来模拟军事训练，可以帮助士兵为战场上的意外情况做好准备。

(3) 新冠疫情远程学习

新冠肺炎疫情期间，空间计算在远程教育中得到了极大应用，因为它可以帮助学生身临其境体验课堂，而无需面对面的课堂学习。

3. 房地产

空间计算在房地产行业的应用较多，如 Zillow 公司使用空间计算技术使买家虚拟体验房产，尤其在疫情期间，这一技术为房地产市场提供了安全的房产展示方式，用户可以不受地理限制地访问和体验远程房产，为房地产销售和租赁提供了便利。

4. 制造业与设计

空间计算为制造业和设计行业提供了更方便的建模工具。比如，美国宇航局（NASA）利用空间计算进行航天器的设计和模拟测试，工程师和设计师可以在虚拟环境中亲自体验和评估航天器的设计，有效提高设计效率和安全性。此外，福特汽车公司使用虚拟现实技术来改进汽车设计过程，通过虚拟模拟评估设计方案，减少物理原型的需求。

5. 广告

方便品牌植入，视觉冲击力强

广告是空间计算预计将呈指数级增长的另一个领域^[10]，使开发者能够在虚拟体验中添加品牌植入。这种类型的原生广告最早出现在游戏中。随着空间计算的技术进步，虚拟现实体验很快就能融入与个人消费者相关的本土广告。作为品牌与内容开发商的合作伙伴，可以以自己的产品为中心，创造视觉冲击力强的体验。例如，广告技术初创公司 Immersv 为游戏和虚拟现实广告筹集了约 1050 万美元。

6. 游戏

市场价值高，需求推动研发全新的游戏体验

空间计算的软件市场 43% 的价值来自游戏行业，VR 游戏收入目前价值 11 亿美元，预计到 2024 年将增长至 24 亿美元（普华永道，2020）。游戏中的 VR 为用户提供了控制和修改游戏环境的能力。

随着空间计算游戏的需求越来越大，新的游戏内容不断进入市场。例如，Epic Games 通过其旗舰产品《堡垒之夜》展示了空间计算在游戏和娱乐行业的应用。通过将虚拟现实技术和传统游戏设计相结合，为玩家提供了沉浸式的游戏体验。通过 Oculus Rift 等 VR，玩家可以在高级虚拟环境中体验 3D 生物。此外，Disney 的主题公园也利用增强现实技术为游客创造了独特的互动体验和表演。

空间计算游戏需求的增加也导致游戏行业出现了更多的招聘信息。从 2017 年到 2018 年，招聘人数增长了 17%。这些职位空缺包括游戏制作人、设计师、艺术家和程序员。

7. 旅游

更逼真的服务体验，新冠促进虚拟现实旅游

旅游公司正在采用空间计算技术为客户提供更好的服务和体验。比如，提供身临其境预览旅游目的地、预订酒店前虚拟体验酒店环境，这些都使得预订量有所上升。此外，新冠肺炎疫情为虚拟现实旅游的兴起打开了机遇之门。虚拟现实预计也将在疫情后的旅游业中发挥至关重要的作用。

二、空间计算技术流程

（一）技术流程概述

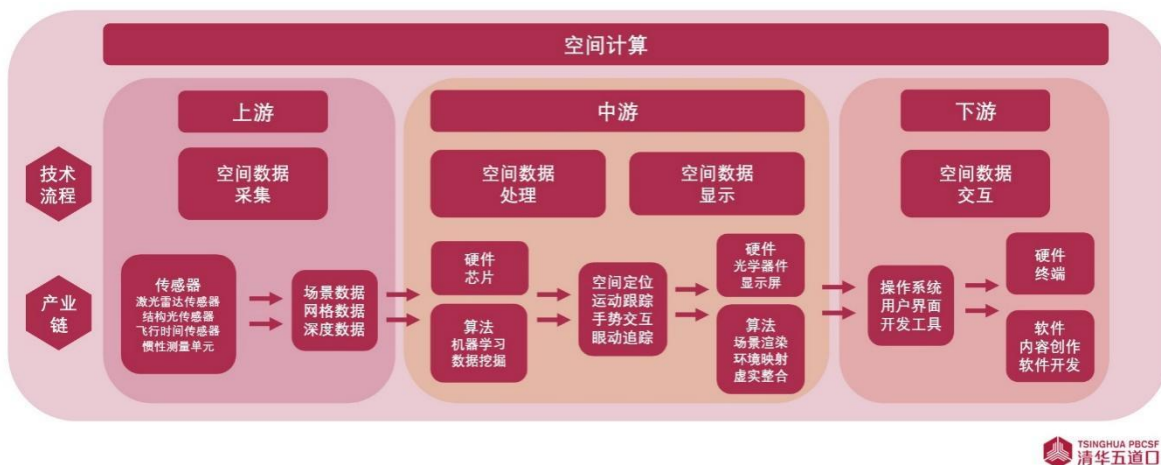


图 2-1 空间计算技术流程

空间计算按技术流程可以分为三大步骤：

（1）空间数据采集

通过传感器等技术手段，获取空间数据，并对其进行清洗、转换和预处理，以保证数据质量和可用性。

（2）空间数据处理

利用机器学习、数据挖掘等技术对空间数据进行分析，提取有价值的信息，为交互提供支持。

（3）空间数据显示与交互

通过可视化技术将复杂的空间数据呈现为直观的图像，以使用户更好地理解 and 运用。

空间计算涉及硬件、软件、内容、平台等多个产业链。其中，硬件主要指头显设备、传感器、计算机等设备的制造和供应；软件涉及各大厂商提供的相关工具和服务，以及应用软件的开发和制作；

从内容上看，是指游戏、演示、培训、教育、医疗等各种具有空间计算特性的应用场景。

下文将对以上技术流程做详细解析，首先介绍空间数据的采集。

（二）空间数据采集

空间数据是用来表示空间实体的位置、形状、大小及其分布特征诸多方面信息的数据，用来描述来自现实世界的目标^[4]，如图 2-2 所示。应用程序使用空间数据来了解用户周围的空间以及用户在该空间中的位置，来实现融合虚拟和现实世界环境。

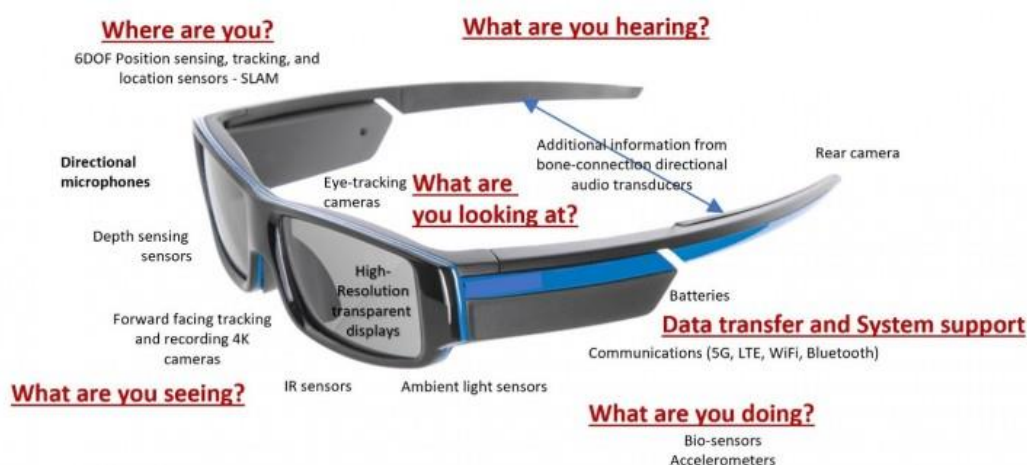


图 2-2 空间数据采集^[5]

本节首先对空间数据进行分类，而后对各类数据，分别从数据要求、数据采集所需硬件、数据采集原理、数据采集技术进行介绍。

1. 空间数据类型

空间数据可以分为两种：环境空间数据和用户空间数据，如图 2-3 所示。

(1) 环境空间数据：获取用户周围的空间数据

环境空间数据是指在空间计算环境中涉及到的场景、物体、结构和其他非用户元素的数据，空间计算设备需要了解人所看到的内容、所听到的内容、环境如何变化等。这可以包括场景的几何信息、物体的位置、环境属性等。例子：场景的三维模型、物体的网格数据、环境的照明信息、温度、湿度等环境参数。用途：用于建模和理解物理空间，支持虚拟现实、增强现实、建筑设计、模拟等应用。这些数据有助于空间计算系统理解和模拟真实世界。

环境空间数据包括：场景数据、网格数据和深度数据。场景数据包括关于环境的广泛信息，包括空间关系和动态元素，而网格数据关注物体表面的几何结构，深度数据则提供关于场景中距离的信息。这三种类型的数据通常协同工作，以实现复杂的空间计算应用程序，将物理世界和虚拟世界连接起来。

(2) 用户空间数据：获取用户在空间中的运动数据

用户空间数据是指在环境中，空间计算设备需要知道人在哪里，知道人的相对运动和方向。通常使用惯性测量单元 (IMU) 获得这些信息，其中包括加速计、陀螺仪和磁力计。

用户空间数据包括：用户的位置信息、姿态、手势、交互行为等个体数据，是由用户在环境中生成、记录或传输的数据。用于提供个性化体验、改善用户交互、分析用户行为模式、调整虚拟环境或应用的响应等。



图 2-3 空间数据类型

在实际应用中，用户空间数据和环境空间数据通常相互融合，以实现综合、智能的空间计算体验。例如，在虚拟现实，用户的头部姿态和手势动作可以与环境中的虚拟对象进行互动，从而形成综合的用户体验。

2. 场景数据采集

(1) 数据要求

场景数据是指以数字形式提供的关于整体环境或物理空间的信息。它包括空间内物体的位置、形状、颜色、方向和特征，以及物体之间的空间关系、环境特征等。场景数据提供了数字化的环境表示，让空间计算设备能够理解环境，进一步实现与虚拟和现实世界交互。

场景数据通常包括以下元素，位置：场景中对象的空间坐标。方向：对象的方向。比例：空间中对象的大小或比例。空间关系：对象在场景中如何相互关联。这涉及到了解不同对象之间的相似度、距离和方向。环境特征：有关物理环境的信息，例如表面、墙壁、

地板和其他结构的存在。光照条件：光照细节，包括场景中光源的强度、方向和颜色。颜色和纹理：有关环境中曲面和对象的颜色和纹理的信息。动态元素：对于动态场景，有关移动对象或环境随时间变化的数据。用户交互：关于用户与场景数字表示的交互信息。

（2）数据采集所需硬件

场景数据的获取方式有很多种，如摄像头、超声波传感器、毫米波雷达等。

（3）数据采集原理

以光学传感器采集数据为例，其可用于捕获关于场景的三维信息。基于粒子群优化（PSO）算法的自动优化过程可用于寻找观察三维场景的多个光学传感器的最优设置。

3. 网格数据采集

（1）数据要求

网格数据：获取用户周围的空间数据，即周围环境是什么样的。网格数据表示物体表面的几何形状，通常以三维网格的形式呈现。这些网格由顶点、边和面组成，描述了物体的形状和结构。网格数据包括有关物理对象的形状和结构的信息。网格数据可以实现用户现实空间的几何表示，让虚拟物体准确地和现实物体进行耦合并进行稳定的位置导航。

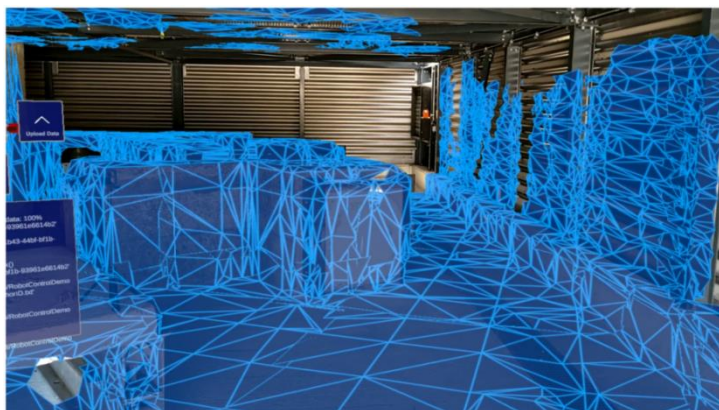


图 2-4 网格数据示例^[6]

(2) 数据采集所需硬件

网格数据的采集主要依靠结构光传感器，来获取环境表面结构。

(3) 数据采集原理

结构光传感器将定义的光图案（红外或可见光）投射到周围环境中。对图案光的畸变进行数学分析，以三角测量到周围各个点的距离，分析相机像素数据以计算投影图案与返回的图案之间的差异。

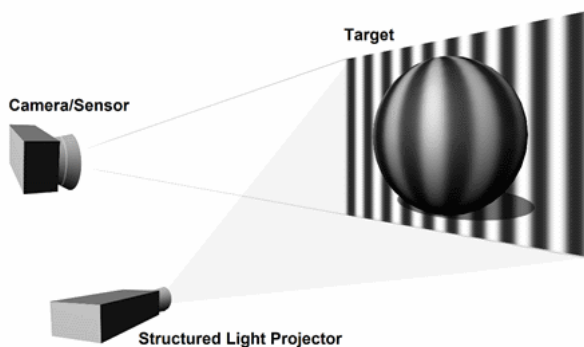


图 2-5 结构光传感器原理图^[7]

(4) 数据采集技术

根据结构光投影变形信息提取三维曲面形状，可以精确地计算出场景中物体的三维表面轮廓，使用两个结构光传感器并将它们的输出组合起来时，可以实现更准确的结果。

4. 深度数据采集

(1) 数据要求

深度数据：深度数据提供了对象与参考点（通常是相机或传感器）的距离信息。深度数据可以表示为深度图，其中每个像素对应于场景中对应点的距离，还包含有关对象之间距离的信息，并允许对房间中的虚拟对象进行逼真的渲染。深度数据一般通过飞行时间传感器、激光雷达或立体相机来获得，一般用于对象识别、手势识别，对于理解场景的三维结构、创建三维场景的模型、实现虚拟景深效果以及进行物体识别和跟踪等任务非常有用。

(2) 数据采集所需硬件

常见的深度传感器如飞行时间传感器 **ToF (Time of flight)**，是一种用“光”测量距离的传感器。

(3) 数据采集原理

深度传感器是基于飞行时间测量方法，一般有两种方法：使用定时脉冲或使用调幅波的相移。使用定时脉冲是指先用激光照射目标，然后用扫描仪测量反射光，用光速推算出物体的距离。距离是通过以下公式测量的： $d = (c \cdot \Delta t) / 2$ 其中 Δt 为时差， c 是光速。再通过激光返回时间和波长差异来对目标进行数字三维表示。使用调幅

波的相移是通过调制振幅，创建具有已知频率的正弦形式的光源，从而使检测器能够确定反射光相移。

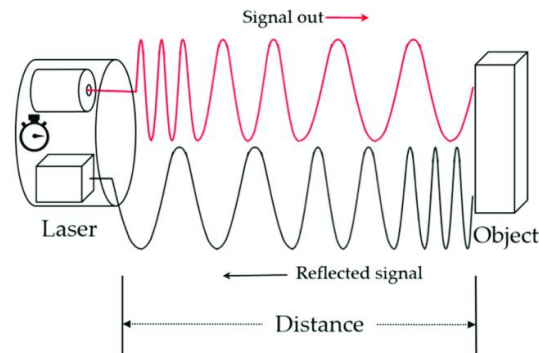


图 2-6 飞行时间传感器原理图^[8]

(4) 数据采集所需技术

根据测量距离的方式，ToF 传感器可分为两类包括 dTOF（直接飞行时间传感器）和 iTOF（间接飞行时间传感器）。直接 ToF 传感器通常发射脉冲调制来测量距离。间接 ToF 传感器测量脉冲之间的相对相位差，传感器发射脉冲从物体反射并在检测器处接收，通过返回信号与发射信号的相位差来测量距离。激光雷达传感器 LiDAR 属于 dTOF，是 TOF Camera 中的一种。

间接飞行时间传感器有以下特点：一是 iTOF 发出的经过正弦波调制，明暗强度呈规律变换的光信号，而 dTOF（LiDAR）发出的是激光束；二是 iTOF 通过正弦波光信号“感知”距离，而 dTOF（LiDAR）是激光直接测算；三是 iTOF 信号容易干扰，距离越远精度与速率越低，而 dTOF（LiDAR）激光光束具有抗干扰能力，更适合远距离测距。

5. 用户空间数据采集

(1) 数据要求

用户空间数据指在环境中由用户生成、记录或传输的各种数据，即“我在空间中的哪里”。这些数据可能包括用户的位置信息、姿态、手势、视线方向、行为模式、使用习惯等。位置信息指用户在空间中的实时或历史位置数据，通常以经纬度、高度或其他坐标系表示。姿态和运动数据指用户的身体姿态、头部姿态以及其他运动信息。这方面的数据可能来自于传感器、摄像头或其他设备。手势和交互数据是指用户的手势、点击、滑动等交互动作的数据。



图 2-4 环境空间数据采集示意图^[9]

(2) 数据采集所需硬件

对于惯性动捕方案，所需硬件为惯性测量单元（IMU）整合了陀螺仪、加速规以及磁力计的传感器模块，用于测量和监测物体的线性加速度和角速度。

对于光学动捕方案，所需硬件为相机和标记点（或传感器）的组合，来捕捉特定场景中的标记点或传感器的运动，获取高精度的位置和动作信息。

（3）数据采集原理

● 惯性动捕方案

加速度计：用于测量物体的线性加速度，即物体在空间中的加速度变化。通过对加速度的积分，可以得到速度和位置信息。

陀螺仪：用于测量物体的角速度，即物体绕其轴线的旋转速率。通过对角速度的积分，可以得到物体的角度或方向，从而更好地捕获动作。陀螺仪是用高速回转体的动量矩敏感壳体相对惯性空间绕正交于自转轴的一个或二个轴的角运动检测装置。陀螺仪为空间计算设备显示器里的景象随着人头部的运动而实时发生变化提供定位信息。例如，当你穿戴着空间计算设备向上看时，眼睛里的显示器，需要向你实时地显示虚拟世界中的天空，当你回头时，显示器则需要向你展示身后的景象，模拟真正的回头。

磁力计：用于测量物体周围的磁场。这对于确定物体在地球坐标系中的朝向（方向）非常有用，因为地球本身有一个地磁场，可以测量出当前设备与东南西北四个方向上的夹角。一般使用霍尔元件测量磁场。

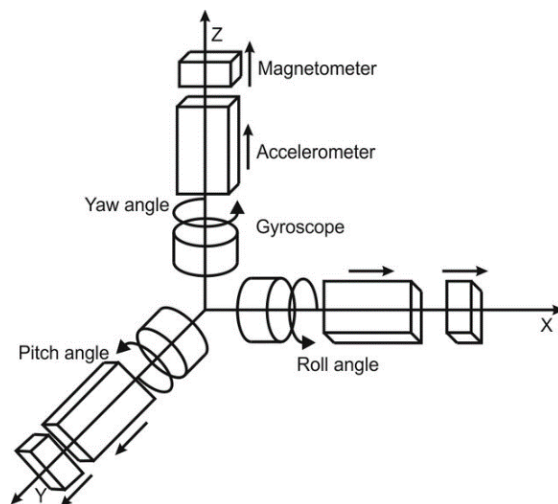


图 2-7 惯性测量单元原理图^[10]

● 光学动捕方案

在使用多个摄像机的情况下，确保这些摄像机的数据是同步的，使得不同摄像机捕获的图像能够在时间上对齐，从而获得准确的三维位置。进一步通过计算机视觉算法对捕获到的图像进行处理以提取标记点的位置，再使用数学模型计算出物体或人体的三维位置和运动。

（4）数据采集技术

空间计算设备必须快速准确地捕捉用户动作，采集用户空间数据，否则用户会出现眩晕感。这使得数据采集技术必须保证低延迟。

对于惯性动捕方案，是通过通过对 IMU 和其他运动传感器的输出数据进行处理和融合，保证高度稳定且延迟极低，有助于纠错并快速产生准确的结果，使系统能够快速跟踪头部运动和位置，提供更准确、稳定的关于物体运动和方向的信息。IMU 在长时间使用中可能会存在误差累积的问题。为了提高准确性，通常会与其他传感器

（如 GPS、视觉传感器等）结合使用，以获得更为精确和鲁棒的空间数据。

对于光学动捕方案，是通过通常多视角的方式布置摄像机，以确保从不同角度捕捉目标，降低延迟。高质量的摄像机、适当的摄像机分辨率、标记点的设计和放置对于识别和跟踪对于捕捉细节非常重要。标记点可以是被动的标记点，如反光球，也可以是主动的标记点，如 LED 标记。

（三）空间数据处理

空间数据处理主要分为算法和硬件两个部分，算法是用机器学习、数据分析等方法对三种空间数据进行处理，实现空间定位、运动跟踪、场景理解、物体识别等；硬件主要指空间计算专用芯片。

1. 算法

（1）数据预处理：处理原始数据以进行清理和组织。此步骤涉及校准、对齐和过滤，以确保信息准确可靠。

（2）创建三维模型：使用捕获的数据创建场景的三维模型，涉及重建对象、曲面及其空间关系的几何图形。

（3）场景理解：分析数据以了解场景。基于计算机视觉，对空间数据进行物体识别并理解空间布局。

（5）运动跟踪：依靠跟踪技术实时监控用户的移动和位置。这种跟踪可以通过各种方法来实现，例如使用相机、传感器或标记进行由

内而外或由外而外的跟踪，涉及到计算机视觉、深度传感、运动捕捉和其他传感技术。

(6) 点云数据处理：点云数据是指在一个三维坐标系统中的一组向量的集合。点云数据可以来自 ToF 相机或激光雷达。ToF 相机将调制红外光源与电荷耦合器件 (CCD) 图像传感器结合在一起以计算物体与相机之间的距离。数千或数百万个这些测量结果组合成一个“点云”数据库，代表周围区域的三维图像。基于 VCSEL 的激光雷达是一项最新开发的技术，可以产生更高保真度的点云。

2. 硬件

空间数据处理硬件最核心的部件是芯片。区别于电脑芯片和手机芯片，空间计算芯片对算力和低功耗有着更高要求，需要具有图形处理性能、高功率利用率、低功耗等，以改善空间计算设备的图像延迟状况。由于空间数据和图像同样为矩阵，因此空间计算芯片本质仍为 GPU 芯片。核心技术有：最新数据抓取、异步着色引擎、协同多 GPU 等，以获得更低的延迟，让用户获得更流畅的画面。

高通的空间计算系列芯片为现阶段空间计算芯片的佼佼者，基本处于垄断地位。其芯片能够实现低于 10 毫秒的时延，支持并行感知技术，包括头部、手势和手柄追踪、3D 重建以及低时延视频透视，且专门针对散热限制在功耗方面进行独特设计优化，目前已被 Meta 的 QuestPro 头显所采用。由于空间计算需求差异大，细分领域众多，

大型空间计算设备厂商越来越倾向使用定制芯片（ASIC），而非与竞争对手使用同款芯片，以满足自身产品和应用程序的特定需求。

（四）空间数据显示

空间数据显示包括软件和硬件两个部分，软件包括场景渲染、环境映射、虚实整合等，硬件则包括光学器件和显示屏两个部分。

1. 软件

（1）场景渲染

在跟踪到用户的位置和移动后，空间计算系统就会实时渲染虚拟内容。这包括创建三维模型、纹理和动画，然后通过显示设备向用户显示。空间数据需要处理并转换为虚拟环境或修改的真实世界表示。这涉及到强大的处理器和图形处理单元（GPU），它们可以处理复杂的计算，例如渲染 3D 图形、检测现实世界中的对象以及无缝集成虚拟元素。

（2）环境映射

空间计算设备需要了解和映射真实世界的环境。这是通过同步定位和映射（SLAM）等技术实现的，该技术将传感器数据与计算机视觉算法相结合，以创建物理空间的数字表示。

（3）虚实整合

空间计算体验通常涉及虚拟内容与现实世界的整合，包括在空间中将虚拟对象覆盖到用户的视图上，或者在空间中创建完全虚拟的环境，需要虚拟元素和真实元素之间的精确对齐和同步。

2. 硬件

显示和输出设备在提供无缝和身临其境的空间计算体验方面发挥着至关重要的作用，将处理的内容显示给用户。设备所采用的光学器件与显示屏，二者是影响其视场角、透光度、亮度、刷新率、画面显示效果等显示功能的关键因素。

(1) 光学器件

光学器件作为连接显示屏和人眼的重要桥梁，是最为关键的组件之一，直接影响到最终的显示效果与使用体验。主要是通过光学透镜的折射原理，改变光传导的方向，从而达到近眼聚焦以及扩大视场的效果。其生产主要包括：光学设计、透镜加工、透镜贴膜、组装、检验和封装六个流程。光学器件性能参数包括像素密度、响应速度、亮度、功耗、对比度和成本等。

在原理方面：利用光学透镜将由靠近人眼的微显示器屏幕上所显示的图像聚焦、放大、投远，投射到人眼中，佩戴眼镜时所看到的图像完全由显示屏提供、实际场景的自然反射光线无法通过眼镜直接进入人眼，佩戴者通过光学和微显示屏获得了完全虚拟、沉浸的视觉内容体验。

在技术方案方面：空间计算光学方案的发展经历了传统透镜、菲涅尔透镜以及 Pancake 阶段。目前，菲涅尔透镜是市场上的主流方案，但 Pancake 方案由于光路折叠的特性，更加轻薄，并且可以解决眩晕问题，因此渗透率提高较快。空间计算光学方案已全面从菲涅

尔转向 Pancake 方案，后者量产工艺已趋于成熟，可让设备更轻薄进而具备更好的佩戴体验、更好的成像质量。在显示材质上，空间计算未来的最大看点在于 Micro-OLED 屏幕的普及。

从空间计算产业光学技术的发展路径来看，整体发展顺序为：棱镜-自由曲面-Birdbath-光波导（包含阵列光波导、衍射光波导、体全息光波导）。光波导作为最新的科研成果正在进行技术转化应用于空间计算光学方案，光波导是引导光波在其中传播的介质装置，又称介质光波导。

当前空间计算还没有相对统一的光学方案，Birdbath 方案市场渗透率最高，可将整机重量控制在 80g 左右，但其光学模组体积大、镜片厚，光线透过率相对较低；光波导方案则可以让设备更轻，让影像有更更高透过率和显示亮度，有望成为空间计算的主流光学方案，包括雷鸟创新的头部玩家已在进行前瞻性的战略布局。

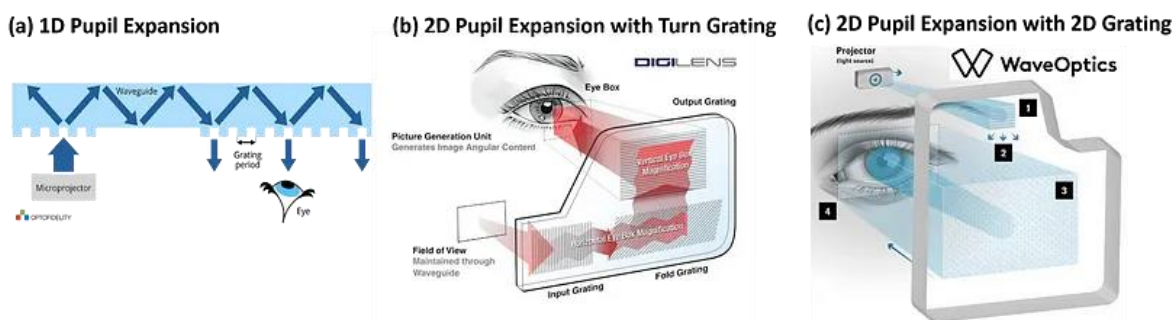


图 2-8 光波导原理图^[11]

(2) 显示屏

空间计算中显示屏主要包括两种 Micro-OLED 与 AMOLED。

Micro-OLED 技术相对成熟，成本更低。顾名思义，就是特别小的 LED。微发光二极管显示器，（Micro Light Emitting Diode Display，缩写为 Micro LED）。其显示原理是将 LED 结构设计进行薄膜化、微小化、阵列化，其尺寸仅在 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 等级左右；后将 μLED 批量式转移至电路基板上（含下电极与晶体管），其基板可为硬性、软性之透明、不透明基板上；再利用物理沉积制程完成保护层与上电极，即可进行上基板的封装，完成一结构简单的 Micro LED。Micro OLED 采用的是单晶硅基板，并且将驱动电路直接集成在基板上，减少了屏幕整体厚度。

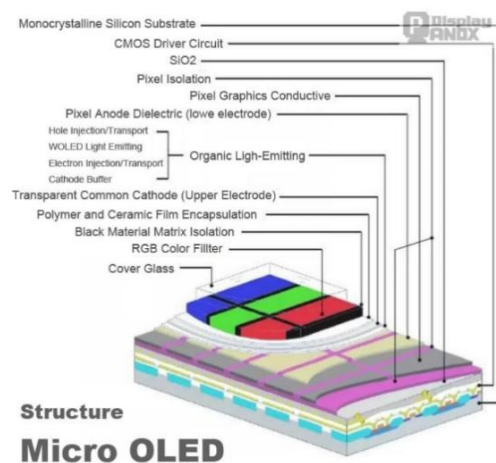


图 2-9 Micro OLED 结构图^[12]

AMOLED（Active-matrix organic light emitting diode），有源矩阵有机发光二极管，这种显示屏最大程度的减少了控制线路的数量，具有低能耗，高分辨率，快速响应，对比度更高，视角较广等特点。主要适用于响应速度极快的显示器以避免使用者的不适。

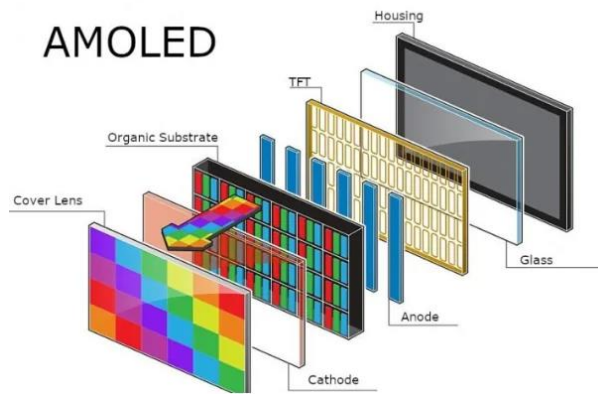


图 2-10 AMOLED 结构图^[13]

（五）空间数据交互

基于以上的技术流程，空间数据的采集、数据处理和数据显示，使得空间数据达到用户端，此时已经可以组装成一台终端，这时便需要交互系统的开发，包括：操作系统、用户界面、开发工具。空间计算操作系统为用户提供了各种与虚拟内容交互的方式，如手势识别、语音命令或物理控制器。用户界面给用户提供直观和身临其境，允许用户操作并与虚拟环境交互。

开发工具 SDK（Software development kit 软件开发工具包）是空间计算软件生态中的重要组成部分，能够帮助开发者快速进行空间计算的功能开发，同时不同 SDK 的功能和跨平台支持成为相关 SDK 研发方的重点布局方向。易用性、支持功能、支持平台是影响开发人员选择 SDK 的主要因素。

在交互系统搭建好后，便是内容创作与软件开发。内容创作方面，有赖于 AI 大模型的发展，比如 Stable Diffusion 3 和 OpenAI 的 Sora，它们作为最先进的图像生成模型，可以为空间计算内容端提

供更丰富的视觉内容生成，其在图像质量、生成速度和创新应用方面的改进，优化了空间计算设备对空间计算场景的理解以生成更匹配更逼真的虚拟画面，提升用户交互体验和空间计算应用的实用性。

软件开发方面，以空间计算游戏为例，目前 Viveport、Oculus Store、Steam 空间计算等平台提供大量优质空间计算游戏作品，满足玩家空间计算游戏交互体验的需求。软件开发需要关注用户整体体验，应确保虚拟和真实世界元素的无缝集成、逼真的图形、低延迟和直观的交互。用户体验还应考虑舒适性、安全性和可访问性等因素。此外，交互软件还需具备多用户体验和远程协作。该技术过程涉及网络功能，允许多个用户在共享的虚拟环境中进行交互。这涉及到数据同步、网络基础设施和实时通信协议。

三、空间计算产业链

（一）产业链上下游

空间计算产业链包含上游空间数据采集，中游空间数据处理和显示，下游空间数据交互，如表 3-1 所示。

国内企业空间计算产业链布局主要集中在中下游。包括中游的空间数据显示：光学器件和显示屏制造；下游：软件开发与内容创作。

而在中游空间数据处理上，尤其是空间计算的芯片端，目前国内企业仍然较少。近年来，国内有少数空间计算企业诞生，如万有引力。在芯片环节，高通在芯片端基本处于垄断地位，市场中主流

的空间计算一体机均采用了高通芯片。在光学环节，欧菲光、水晶光电、三利谱是其中的代表性上市企业。

表 3-1 空间计算产业链

产业链环节			供应商
上游	空间数据 采集	传感器	韦尔股份、水木智芯、耐威科技、中颖、深迪半导体、矽睿科技、博世、亚德诺、意法半导体、应美盛、松下、村田、微软、索尼、爱普生、Colibrys、Silicon、Designs、PrimeSense 等
中游	空间数据 处理	芯片	瑞芯微、凌美芯、兆芯、莱迪思半导体、海思、中兴微电子、高通、英特尔、英伟达、AMD、三星、晶晨、全志科技等
		算法	Valve、Doublepoint、英梅吉、Eyefluence
	空间数据 显示	光学器件	蓝特光学，联创电子，水晶光电，欧菲光，蓝思科技，舜宇光学，联合光电，福晶科技，永新光学、耐德佳、灵犀微光、利达光电、苹果、美光、3M、德州仪器等
		显示屏	奥拓电子、中微公司、精测电子、新益昌、智云股份、北京君正、矩子科技、京东方、维信诺、JBD、华星光电、天马微电子、三星、LG、夏普等
下游	空间数据 交互	终端	歌尔股份，创维数字，智立方、华为、vivo、小米、联想、爱奇艺、PICO、海信、大朋、TCL、创维、Nreal、HTC、STAR VR、苹果、三星、谷歌、微软、Meta、Magic Leap、Varjp、LG、富士通、Snap 等
		操作系统	苹果、Meta、谷歌、微软、OSVR、中科创达，macOS, Android, Palm os 5, Ubuntu, Microsoft、影创科技：Tesseract
		用户界面	Unity、微软、Cherrypicks 创奇思、Nibiru（南京睿悦）

		开发工具	华为、爱奇艺、腾讯、大恒科技、华力创通、大朋、Qualcomm, Pico, VIVE Sync、谷歌、微软、FIBRUM、Cubic Motion、The foundry、Worldviz、Framestore 等	
		内容	游戏	腾讯、网易、暴风科技、焰火工坊、极维客、魔视互动、超凡视幻、完美世界、谷歌、索尼、Epic Games、EA、世嘉、Valve、Jaunt、Harmonix、Resolution 等
			视频	爱奇艺、优酷、VeeR VR、兰亭数字、三目猴科、冰立方、光线传媒、Meta、Wevr、YoutubeJaunt、SliverTV、Crackle 等
			社交	字节跳动、Mets、LiveNation、谷歌、The Wave VR、Against Gravity、Vtime 等
			平台	优酷、爱奇艺、京东、百度、青亭远见、阿里巴巴、腾讯、BBC、Youtube 等
			应用	制造
		教育		新东方、信思科技、微视酷、央数文化、HTC VIVE ARTS、Nearpod、Lifelique、Labster、Immersive Education、Unimersiv、Zspace、IBM 等
		文化		红色地标、当红齐天、兰亭数字、新起点、玄视科技、National Geographic、DiscoveryVR
		健康		幸福互动、触幻科技、Fearless、海信、Revinax、Echopixel、DeepStream VR、Psious、Curiscope、VividVision 等
		商贸		京东、无忧我房、思能创智科技、互动视界、锐扬科技、贝壳找房、美克家居、Facebook、Valve、Sketchfab 等

资料来源：作者整理

上游空间数据采集产业链主要为传感器的设计与制造，包括：

(1) 传感器设计。

位置追踪传感器：设计用于追踪头部和身体位置的传感器，如陀螺仪、加速度计、磁力计等。手部追踪传感器：设计用于捕捉手

部动作的传感器，如手势识别、触摸传感器等。环境感知传感器：包括温度传感器、湿度传感器等，以提高虚拟环境的真实感。

（2）传感器制造。

半导体制造：生产传感器所需的半导体芯片。传感器组装：将制造好的传感器芯片组装成成品。传感器集成与硬件制造：头戴式显示器：将位置追踪、手部追踪等传感器集成到头戴设备中。

中游空间数据处理产业链主要为芯片，包括芯片设计、芯片制造、芯片测试与封装、硬平台集成、软件开发与优化、系统集成与测试、应用与服务。

中游空间数据显示产业链包括光学器件和显示屏。

光学器件方面，目前除少数采用棱镜方案外，多数采用自由曲面或 **Birdbath** 方案。在消费级空间计算设备市场，**Birdbath** 是主流方案，同时少数采取尚未完全成熟的光波导方案。采用各类光学方案的产品如下：棱镜方案：**Google Glass**，曲面反射镜方案：**Meta2**，**Birdbath** 方案：联想 **Mirage** 头显、**ODG R9**，光波导方案：**HoloLens 1**、**Magic Leap One**、**Lumus**、**Vuzix**、**Waveoptics**、**Digilens**。

光学组合器技术路线众多，不同技术路线之间差异较大，技术迁移存在较大困难。由于光学显示部分的技术壁垒较高，同时在空间计算整机中的成本占比过大，不少空间计算厂商采取自主研发光学器件的方法，也有光学器件企业涉及下游空间计算整机业务。

空间计算显示屏产业链主要环节：显示屏设计、显示屏制造、面板制造、显示模块组装、整机组装、显示屏调试、硬件平台集成、连接技术、软件开发与优化、显示技术优化、用户界面设计。

当前空间计算显示屏产业链最新技术为 **AMOLED**。韩国企业在 **AMOLED** 市场占据绝对优势。来自三星、LG 和索尼的 **AMOLED**，理论上 20ms 的延时时间可以保证用户拥有至少 30 分钟的体验不产生眩晕。根据 CINNO Research 的报告，2021 年全球 **AMOLED** 面板出货量约为 6.68 亿片，其中三星显示公司的面板占比达到了 72.3%，出货量约为 4.8 亿片。从 **AMOLED** 面板市场规模来看，据统计，2020 年全球 **AMOLED** 面板市场规模为 343.24 亿美元，预计 2025 年将达到 547.05 亿美元。

下游软件开发环节，包括操作系统开发、应用程序开发、开发工具等。中国的软件企业，如字节跳动、腾讯、百度、阿里巴巴等在空间计算软件开发方面具有丰富的经验和技術实力。提供空间计算应用程序开发工具和平台的企业有 **Unity Technologies**、**Epic Games**、**Vuforia** 等。

下游内容和软件部分产业链包括以下几种：负责开发空间计算应用程序和空间计算内容的公司，如游戏开发商、影视制作公司、教育和培训机构等；提供空间计算应用程序的云服务和解决方案的企业，如云计算提供商和企业软件厂商；负责将空间计算应用程序和内容分发给最终用户的平台和渠道，如应用商店、游戏平台、在

线媒体等；用户使用的空间计算应用程序，包括游戏、影视、教育、医疗、旅游等领域的应用。

下游应用生态部分，在为 B 端企业提供云端服务、空间计算本地部署方面的产业相对成熟。C 端应用主要以传统视频网站迁移至空间计算应用，满足空间计算观影等需求，在空间计算游戏、空间计算社交、空间计算办公等更细分市场目前仍缺乏相关应用。由于空间计算在 B 端应用更为广泛，空间计算下游应用生态也呈现出 B 端多余 C 端的状态。B 端生态中，亮风台专注于服务 B 端客户提供硬件设备和生态的综合性解决方案；阿依瓦依托于前期在异构计算、人工智能等底层技术的优势为工业客户提供空间计算软件系统部署服务。

（二）产业链中国优劣势

中国在空间计算产业链的优势：光学器件和显示屏制造、软件开发与内容创作

（1）硬件制造

光学器件方面，中国厂商竞争实力较为强劲，如蓝特光学主营业务为光学元器件，自 2016 年开始研发、试产用于空间计算领域的玻璃晶圆产品。水晶光电主营产品包括滤光片、光学低通滤波器及组合片、智能眼镜光学模组等，对 AR、VR、MR 等新型显示技术均有相关技术储备，旗下晶景光电已研发出相关零配件，将向设计厂商供货。联创电子主营业务为半导体激光及航天微电子元器件、背

光源、投影镜头等产品，联合光学泰斗金国藩院士成立院士工作站攻关关键技术。韦尔股份公司为全球领先的光学 CIS 供应商，同时为空间计算提供 LCOS 等核心元器件。腾景科技主营业务为各类精密光学元件、光纤器件，其中滤光片等可应用于空间计算。

显示屏方面，利亚德在 Micro LED 屏幕领域国内领先；2017 年收购的美国 NaturalPoint 公司拥有全球领先的 3D 光学动作捕捉技术，在空间计算领域处于领导地位。此外还有奥拓电子、中微公司、精测电子、新益昌、智云股份、北京君正、矩子科技等公司。

功能件结构件方面，达瑞电子主营消费电子、智能可穿戴设备领域的功能件、结构件，产品已向 Facebook 的 OculusVR 供货。

整机代工方面，歌尔股份作为国内领先的消费电子零组件、整机供应商，长期布局相关业务，目前在高端空间计算设备整机代工领域中市占率接近 80%，客户包括 Facebook、Sony 等。此外还有闻泰科技，欣旺达，领益智造，鹏鼎控股，兆威机电，国光电器，长盈精密等公司。

（2）软件开发与内容创作

在这一领域，中国具有较强的后发优势。中国拥有庞大的软件开发人才资源，有着成熟的软件开发生态系统。中国的软件开发企业在空间计算软件开发方面积累了丰富的经验，能够提供高质量的空间计算应用程序和解决方案。中国有着丰富的文化和艺术资源，这为空间计算内容创作提供了广阔的空间。中国的内容创作企业能

够结合自身文化特色，开发出独具特色的内容，满足用户的需求。此外，中国拥有世界上最庞大的互联网用户基础，具备强大的分发和营销能力，可以通过各种渠道和平台，将自己的产品和服务推广给广大用户群体，实现规模化的商业化运营。

代表性公司有风语筑，目前已掌握了数字沙盘、立体投影技术、虚拟现实、动感影院特效技术、多媒体互动技术、全息成像技术、裸眼 3D 技术等诸多高科技数字化展示技术的应用。新开普公司为各大高校建设了虚拟场景，打造沉浸式教学方式、提供一站式解决方案。部署虚拟现实校园云平台、定制虚拟现实教学内容、开发虚拟现实应用等。

综上所述，空间计算中国企业在硬件制造、软件开发、内容创作和分发等环节具备一定的优势，这为产业发展提供了有力的支撑。

中国在空间计算产业链的劣势明显：核心芯片、传感器落后。

(1) 空间计算芯片

当前国产芯片与国外先进芯片仍存在较大差距，短期内无法实现有效替代，但国产造芯之路从未停止。万有引力公司是中国空间计算芯片的代表性企业，其仿生视觉芯片自研技术具有技术优势。

(2) 传感器

由于高端传感器制造落后，尤其是空间计算所需的传感器掩饰低，精度高等特点。中国企业多通过收购，代表公司如韦尔股份收购拥有 VR 眼动追踪和面部识别传感器的豪威科技。

总体而言，中国空间计算产业链在硬件制造、软件开发、内容创作和服务等方面都有相应的企业参与和发展，但与国际上的领先企业相比，仍然存在一定的差距。

（三）产业链核心技术竞争点

空间计算产业链核心技术竞争点主要集中在上、中游。

上游的技术瓶颈和成本主要集中在硬件部分，其中芯片、光学显示、交互是技术壁垒较高、成本占比较大的三大类目。根据表 3-2，空间技术专利被引排名，我们可以看到，核心技术专利主要涉及了芯片、光学和显示，这些集中于产业链上中游。

产业链上游核心技术为多种传感器，如结构光传感器、飞行时间传感器、激光雷达、惯性测量单元等，以实现空间定位、手势识别等功能，这些传感器的高精密制造是上游产业链的技术壁垒。空间计算的交互能力取决于立体显示和传感器技术的发展。现有设备不能满足要求，存在延时大、分辨率低、动作范围小、使用不便等缺点。空间计算设备的跟踪精度和跟踪范围也有提高的空间，需要开发新的三维可视化技术。

产业链中游核心技术主要为芯片，包括 SoC（System on Chip）系统级芯片、GPU（Graphics Processing Unit）、NPU（Neural Processing Unit）嵌入式神经网络处理器、电源管理芯片、接口转换芯片、无线连接芯片等。表 3-3 显示了空间计算芯片公司的核心技术。由于芯片研发、制造门槛较高，针对空间计算设备进行定制化开发

的芯片仍处空白状态，且目前国内在芯片部分的参与玩家较少。表显示了空间技术芯片公司的核心技术情况。

产业链中游的另一个核心技术是光学器件。表 3-4 显示了空间计算光学器件公司核心技术。当前光学器件部分对空间计算产业的发展限制已经成为行业共识，相关微显示器厂商和光学组合器厂商已经有足够多的数量，在 Micro-LED 和 Micro-OLED、光波导等前沿方向进行探索。

此外，显示屏是产业链中游的一项核心技术，空间计算显示屏公司的核心技术如表 3-5 所示。分辨率、刷新率和视野角度是衡量显示效果的重要指标，较高的分辨率和刷新率可以提供更清晰、更流畅的图像，而较大的视野角度可以提供更广阔的视野范围。其中核心的技术参数主要为显示质量，分辨率、视野、刷新率等参数决定了空间计算设备显示出来的图像质量。

在软件算法方面，核心主要包括动态环境建模技术、实时三维图形生成技术、系统集成技术、空间定位技术。

（1）动态环境建模技术

虚拟环境的建立是空间计算系统的核心内容，其目的是获取真实环境的三维数据，并根据应用需求建立相应的虚拟环境模型。环境建模通常包括视觉、听觉、触觉、力量和味觉等多种感官通道的建模。然而受目前技术水平的限制，三维视觉建模和三维听觉建模的应用更加广泛。

（2）实时三维图形生成技术

三维图形生成技术的关键是“实时”生成。为了确保实时性，至少要确保图形的更新频率不低于每秒 15 帧，最好超过每秒 30 帧。技术主要涉及三维图形的“加速绘制”和“真实感绘制”，包括可见性选择技术、多分辨率绘制技术、混合绘制技术、移动终端图形绘制技术和 GPU 并行计算技术等。

（3）系统集成技术

由于空间计算系统包含大量的信息和感知模型，系统集成技术起着至关重要的作用。集成技术包括信息同步技术、模型校准技术、数据转换技术、数据管理模型、识别和综合技术等。

（4）空间定位技术

空间定位技术主要有三个指标，定位精度、定位频率、跟踪范围。定位精度方面，精度不够用户会感觉飘。定位频率方面，每隔一段时间定位一次玩家的位置，两次间隔之间则通过之前玩家移动的速度和方向预估，校准频率低，动作延迟高。跟踪范围方面，跟踪范围低的设备出范围就丢失跟踪，而跟踪范围高的可以在整个房间自由移动。

空间定位技术在实现上主要分为两类：“outside-in”和“inside-out”。前者需要多个外部定位点装置，这些装置发射红外光并通过三角形定位方法确定佩戴者的位置和运动方向。后者利用设备本身，而不是依赖外部传感器和其他配件来实现虚拟场景中的空间定位和

更多的人机交互。前者更准确，但不方便放置指向装置，而后者更全面。目前，inside-out 是主流的定位方案。

表 3-2 空间计算专利被引排名

排名	专利	专利号	被引用次数	当前权利人
1	An electrosurgical generator	EP1581128A1	723	GYRUS MEDICAL LIMITED
2	Transaction terminal and adaptor therefor	US8723804B2	651	Hand Held Products, Inc.
3	Article locating and tracking apparatus and method	US20050035862A 1	560	Timothy D. Wildman Williams F. Collins Thomas M. Fleck Carl W. Riley Richard J. Schuman
4	Methods and systems for monitoring a game to determine a player-exploitable game condition	US7517282B1	494	Microsoft Corporation
5	Virtual display	US7990382B2	456	Masimo Corporation
6	Using multiple simultaneous threads of communication	US7328242B1	459	McCarthy Software, Inc.
7	System and method for consumer-selected advertising and branding in interactive media	US6954728B1	438	Avatizing, LLC
8	Systems and methods for digital entertainment	US20030057884A 1	437	DOWLING KEVIN J.
9	Interactive fitness equipment	US6902513B1	369	Daniel R. McClure
10	Virtuai entertainment	US8012023B2	344	Microsoft Corporation

资料来源：United States Patent and Trademark Office

表 3-3 空间计算芯片公司核心技术

公司	核心技术
英特尔	2015 年 12 月 30 日，intel 推出全球首款搭载 Nibiru VR ROM 与 intel“芯”的 VR 一体机，该一体机也是全球首个支持 android 和 windows10 双系统切换的 VR 设备。
万有引力	以 GravityXR 仿生视觉芯片为核心产品，以核心芯片作为载体，硬件技术与算法为支撑，首先，缓解主 SoC 通用平台的渲染负荷。其次，万有引力第一代产品将采用视频穿透式（VST 即 Video See-Through），注重解决 VR 硬件终端的老大难晕眩问题。万有引力成立于 2021 年 9 月，自成立至今，万有引力在半年内连获天使轮、Pre-A 轮融资，融资金额共计数亿元。天使轮由高榕资本领投，红杉资本、IDG 资本和金沙江

	创投参投，Pre-A 轮由高榕资本、红杉资本、联想创投、三七互娱等投资机构共同投资。
瑞芯微	瑞芯微产品涵盖智能应用处理器芯片、电源管理芯片、接口转换芯片、无线连接芯片及与自研芯片相关的组合器件等。公司已经成为国内领先的 AIoT 芯片供应商，产品广泛应用于商用办公设备、安防、教育产品、汽车电子、工业智能设备以及消费电子等产业中；瑞芯微与 AR 设备厂商诠视科技联合宣布达成战略合作，基于各自优势和资源，双方将共同打造基于瑞芯微 RK3588 平台的高性能 XR 平台解决方案。2001 年成立于福建福州，是独资的集成电路设计公司，专注于数字音视频、移动多媒体芯片的研究和开发。
全志科技	主营业务为智能应用处理器 SoC、高性能模拟器件和无线互联芯片，其 H8/A80 产品已应用于 VR 解决方案。多款基于 VR9 方案的头显产品:包括 GOOVIS 智能眼镜、Pico 头显、Emdoor VR 等。VR9 平台是全志专门针对 VR 推出的一款芯片，包括 VR 专用加速模块及屏显系统、VR 专用系统方案开发平台、VR 专用影音和交互系统。H8/A80 芯片应用于 Uranus one 和灵境小黑 VR 一体机。成立于 2007 年，总部位于广东珠海。是一家智能应用处理器 SoC 和智能模拟芯片设计厂商。全志最新的一款 VR 平台芯片是 VR9，该芯片发布于 2017 年。
海思芯片	海思芯片是华为旗下的芯片研发子公司，上海海思正式发布 XR 芯片平台，推出首款可支持 8K 解码能力，集成 GPU、NPU 的 XR 芯片，首款基于该平台的 AR 眼镜为 2019 年发布的 Rokid Vision 产品。

资料来源：作者整理

表 3-4 空间计算光学器件公司核心技术

公司	核心技术
歌尔股份	[自有技术] 菲涅尔透镜技术，光波导技术。独家供货 Oculus，供货索尼、微软的 VR/AR 产品。成立于 1997 年，总部位于山东潍坊，主营业务为电声器件、光电产品、电子配件和 LED 封装及相关产品的研发、生产和销售。
芯视佳	[自有技术] 是一家专注于硅基 OLED IC 设计及硅基 OLED 微显示屏研发制造的创新型科技企业,致力于为全球客户提供高分辨率、高对比度、超轻薄、低功耗、高可靠的硅基 OLED 微显示器件

水晶光电	<p>[自有技术] 精密光电薄膜元件，行业领先的镀膜技术，滤光片，全球仅次于 VIAVI 具备窄带滤光片量产能力的公司</p> <p>[并购或投资] 16 年投资全球阵列光波导技术的标杆企业 Lumus，并与全球著名玻璃供应商肖特成立合资公司晶特生产成像晶圆材料，实现 AR 产业从材料到技术的全面布局</p>
联创电子	<p>[自有技术] 全景摄像机，借助折反光学系统形成的技术优势，公司进一步将产品线由全景镜头扩展到全景影像模组。联创电子在光学镜头业务方面，是全球最大的运动相机镜头供应商，2015 年占全球运动相机镜头出货量 60% 以上，是全球第一大运动相机厂商 GoPro 主要镜头供应商。成立于 2007 年，有望切入 VR 眼镜及头盔供应链中。</p>
Microsoft	<p>[自有技术] 2016 专利申请 用于眼球追踪的专利，利用波导来跟踪眼球运动</p>
	<p>[自有技术] 2017 专利申请 提出可以在增强现实环境中抓取虚拟对象的 AR 系统，如堆叠虚拟立方体或其他物理操控工具控制虚拟对象</p>
	<p>[自有技术] 2018 专利申请 旨在解决波导显示设备可以支持的视野非常小的问题</p>
	<p>[自有技术] 微软 Hololens 的镜头是两个双胶合透镜方案，像质可以大幅提升，但是视场角会变小，体积和重量也增加很多，当然成本也增加了。新镜头的视野比常规镜头稍小，但色差和清晰度要高很多，大大的提高图像的质量。尽管视野区域变小，但是它不会像 Oculus 那样让视野受限。</p>
	<p>[自有技术] 2020 专利申请 采用 microLED 光源的微型光学方案，旨在缩小 AR 眼镜的体积</p>
阿里巴巴	<p>[并购或投资] 2019 收购 收购 AR 初创公司 infinity AR</p>
Google	<p>[并购或投资] 2017 投资 投资 MicroLed 制造公司 Glo AB</p>
	<p>[并购或投资] 2020 收购 收购 AR 眼镜公司 North</p>
	<p>[自有技术] 2020 专利申请 在头戴式设备中通过光导获取更大视野</p>
	<p>[自有技术] 2020 专利申请 在 AR 眼镜中采用光场相机，外形设计贴近普通眼镜</p>
snap	<p>[并购或投资] 2021 收购 3D AR 商用平台 Vertebrae</p>
	<p>[并购或投资] 2021 收购 AR 光波导公司 WaveOptics</p>
利亚德	<p>[自有技术] 公司拥有全球领先的光学动作捕捉技术和交互技术</p>

中光学	[自有技术] 依托公司光学薄膜核心技术优势，AR 波导产品、手机用全景棱镜、屏下指纹棱镜产品开发成功并实现小批量生产,精密光学元件和投影整机及其核心组件
苏大维格	[自有技术] 公司已掌握“头戴式三维显示光场镜片”的设计与制造技术，自主研发了“纳米波导光场镜片”的高效纳米制备设备，并针对波导光场镜片的特点，建立了“纳米波导光场镜片”设计加工能力，有效扩大了 AR 视场角（FOV）。
永新光学	[自有技术] 具备 AR、VR 类产品配套光学部件的研发制造能力，并向该类客户供应过少量光学元器件
福晶科技	[自有技术] 与微软合作研发的 DOE 等相关元件已应用于 HoloLens，公司在激光光学处理领域积累深厚，公司配套 AR 龙头客户研发相关光学元器件，在抛光、镀膜等工艺段有深厚积累，已经实现部分光学处理器件量产
欧菲光	[并购或投资] 投资美国 ODG 卡位 AR 赛道，ODG 是知名 AR 技术公司，主要从事高度集成和高清晰度的 AR 智能眼镜的研发
易尚展示	[自有技术] 3D 成像技术实力雄厚，与京东在零售领域展开创新合作，开发 3D 云货架无界零售系统，应用于京东之家、7Fresh 等线下零售场景。与蚂蚁金服、优酷联合完成“这就是街舞”AR 项目、“星宝”AR 萌宠等。与华为 Vmall 商城建立合作关系，开展 3D 模型及 3D 营销展示等业务
恒信东方	[自有技术] 国内领先的 CG 技术，在 VR 内容制作领域竞争力显著 [并购或投资] 自 2016 年开始参股美国 VR 公司 VRC、新西兰紫水鸟等国际知名公司，并完成收购东方梦幻、安徽赛达，公司在 VR 内容的设计结构手法、演绎方式、技术手段等领域积累了丰富的经验，在 VR 内容的前期探索性以及应用的能力
珑璟光电	[自有技术]阵列光波导、衍射光波导、自由曲面棱镜 珑璟光电 2021 年突破二维扩瞳阵列光波导产品研发，突破了一维扩瞳阵列光波导技术体积和视场角无法兼容的问题。在光波导的知识产权方面形成了立体的壁垒；装备了超精密玻璃冷加工、光学镀膜、纳米压印等生产和检测设备，是目前国内唯一的一条装备精良、工艺先进，具备稳定交付能力的 AR 光波导模组生产线，生产流程高度自动化，公司预计满产产能达到 100 万片/年，良率超 70%。

灵犀微光	[自有技术] 阵列光波导。灵犀是消费级 AR 核心显示解决方案和产品提供商，主要产品光波导模组超薄系列 AW70、适用于头盔上投影式 AW81 等；阵列光波导模组突破 85% 良率，年产 10 万片量产产能。公司具备集核心显示技术、硬件产品定制开发、行业应用解决方案在内的一体化综合服务能力；与美亚柏科达成战略合作，就应急安防及社会服务治理领域开展一系列合作。
耐德佳	[自有技术] 自由曲面、棱镜。耐德佳创立于 2015 年，研发团队在增强现实智能眼镜光学模组设计研发方面有超十年研究经历和数十项专利及国际一流研究论文，目前耐德佳已经完成公司产品性能指标已达到或超过美国、日本等高科技公司相关产品。联想 AR 产品 ThinkReality A3 智能眼镜即采用耐德佳自由曲面 AR 光学解决方案。
Oculus	[采用他人技术] Oculus 采用歌尔声学供应的菲涅尔球面镜头，单片式透镜是各方面更佳结果，也是目前的更优结果。单透镜方案可以实现较大的视场角，同时可以实现重量和体积最小，这是目前选择单透镜的最重要的原因之一。单片式透镜光学像质中影响比较大的为色差和畸变，目前主要通过算法进行校正。
Meta	[采用他人技术] Facebook 在 2014 年 7 月宣布以 20 亿美元的价格收购 Oculus。Oculus 采用歌尔声学供应的菲涅尔球面镜头，综合重量、体积以及成本等方面考虑，单片式透镜是各方面更佳结果，也是目前的更优结果。单透镜方案可以实现较大的视场角，同时可以实现重量和体积最小，这是目前选择单透镜的最重要的原因之一。单片式透镜光学像质中影响比较大的为色差和畸变，目前主要通过算法进行校正。
理湃光晶	[自有技术] 阵列光波导。公司自主研发的光学模组重量轻、体积小、显示效果卓越，被广泛应用于警用、安防、工业、教育、医疗等多个领域。其中 Rokid Glass 2 AR 眼镜即使用理湃光晶阵列光波导模组。
至格科技	[自有技术] 衍射光波导。至格由清华大学精密仪器系光栅与测量实验室孵化而成，拥有较强研发能力，迭代一组参数需要 1-2 周，业内其他公司常需三、四个月以上。至格自主掌握“光栅设计、光栅母版加工、纳米压印生产”三大核心技术，拥有功能完备的光栅母版加工中心和衍射光波导生产线，成功研发并量产 XR 衍射光波导产品。
舜宇光学	[自有技术] 为 HTC Vive 提供前置摄像头。1993 年由叶成立于浙江余姚市。现时业务在国内经营生产、销售等光学零件、光电产品和光学仪器。舜宇光学 2015 年全年出货计 301292 KPS，占比 9.4%。并以微弱优势超过玉晶，位列全球出货占比第二。

资料来源：作者整理

表 3-5 空间计算显示屏公司核心技术

公司	核心技术
深天马	AMOLED 显示屏。1994 年 4 月由深圳天马微电子有限公司改组设立的股份公司。生产液晶显示器，其 AMOLED 显示面板有望切入 VR 头盔供应链中。
中颖电子	国内 AMOLED 驱动显示芯片唯一供应商，成立于 1994 年，专注于单片机集成电路设计。
京东方	AMOLED 屏。创立于 1993 年 4 月，半导体显示技术、产品与服务提供商，核心业务包括显示器件、智慧系统和健康服务。2016 上半年 5.5 代线 AMOLED 屏即将量产。2014，2015 两年京东方的智能手机、平板电脑面板市占率已达全球第一。
芯视佳	OLED、Micro-OLED。专注于硅基 OLED IC 设计及硅基 OLED 微显示屏研发制造，其产品广泛应用于 VR/AR、电子取景器、微型投影仪、头盔显示、枪瞄等领域；同时芯视佳科技为客户提供各种尺寸的 LCD 显示屏、OLED 显示屏、微显示屏、盖板等显示相关产品
思坦科技	Micro-LED 生产厂商 目前该公司已初步建成 Micro-LED 中试线，开展 Micro-LED 器件阵列制作、巨量转移技术、彩色化、驱动电路等关键领域技术研发，并且具备 2-6 英寸第三代半导体产业技术的中试能力；
视涯技术	OLED 生产厂商 视涯从事新一代半导体 OLED _o S 显示器研发、设计、生产和销售，致力于打造 OLED _o S 显示应用生态链，为客户提供端到端的微显示相关解决方案。公司一期工厂面积超 43,000 平方米，是全球首家在 12 寸晶圆上生产 OLED _o S 显示器的产业基地。
JBD 显耀	Micro-LED 微显示面板 JBD 显耀产品多元化程度高，公司主营业务为单色/三色显示板，AM-uLED 微显示开发套件，AM-uLED 显示屏，AM-uLED 光引擎、光模组等产品的设计、加工制造、封装测试等。公司拥有自主的 IC 设计、MOCVD 材料生产、Micro-LED 混合集成等技术，能够推动混合现实领域、汽车、半导体设备等领域的技术发展

资料来源：作者整理

四、空间计算行业分析

（一）行业现状与中国优势

1. 出货量

VR 仍然是空间计算的主导细分市场，在 2022 年的总出货量中占比超过 95%。2022 年，扩展现实在中国的出货量超过 110 万台。中国市场有相当大的未开发潜力，但增长缓慢，因为现有的空间计算设备在消费者领域没有为大众消费提供足够的价值。

C端近年来出货量增加较明显，主要面向教育和培训领域。B端增长潜力有限，因为目前的技术还无法提供新的诱人的企业实用场景。因此各品牌开始更多地关注消费者群体，尤其是游戏。然而，中国品牌提供的空间计算游戏很少，而且大多是简单的。品牌必须开发高质量的游戏来增加消费者吸引力。

Pico 是中国空间计算市场的头号品牌，2022 年出货量份额为 43%，其次是 DPVR，占 36%。爱奇艺、HTC 和 NOL 的份额均为个位数，也跻身前五。随着 Metaverse 的兴起，以及 Meta（前身为 Facebook）在消费者级空间计算 Oculus 上的商业成功，中国的空间计算市场迎来了第二次风口，华为、小米和 OPPO 等移动巨头纷纷推出空间计算产品。

2. 市场分析

（1）近两年市场谨慎

NPD Group 的数据显示，2022 年全球 VR 头显市场销量同比下滑了 2%。CCS Insight 的统计数据则显示，2022 年全球 AR/VR 设备的总销量下降了 12%，只有 960 万部。

（2）市场成熟度较低

空间计算的本质是人机交互，其在 C 端的信息提示功能、B 端信息整合、高效显示的功能都依赖于强大的数据库能力，数据打通是 AR/MR 价值升维的关键。消费端面临各大互联网生态的壁垒，工业端面临数字化转型的数据困境，无法高效整合数据资源。

(3) 当前及未来趋势向好，预计万亿赛道

IDC (International Data Corporation) 预测，到 2024 年，全球 XR 市场规模将增长到 2090 亿美元。其中，消费市场和企业市场占比大致相等，分别为约 1000 亿美元。

近年来，空间计算的使用在企业中越来越普遍。欧盟委员会预测，到 2025 年，欧洲扩展现实市场将增长 35 亿欧元至 650 亿欧元，并且 94.8% 的公司预测未来三年将出现中等至指数级增长。长期以来，制造公司尤其主要在产品设计和工程等研发过程中使用空间计算。在此类企业中使用扩展现实有助于在生产开始前可视化产品并在一定程度上对它们进行虚拟测试。在新冠疫情期间，大量的公司使用沉浸式技术来应对接触限制。

在苹果发布 Apple Vision Pro 之前，空间计算面临的挑战：场景受限、且不是高频刚需，其中 AR 主要面向 B 端市场，包括工业、医疗、安防，VR 主要面向 C 端市场，游戏为最大使用场景。

但是随着 vision pro 的发布，将极大程度地改变当前困境，标志着空间计算时代的来临。

从投资者的角度出发，空间计算当前市场空间大，技术壁垒高，盈利能力强，应主要关注之前已经有相关技术积累的企业，以及引领行业发展的整机龙头。

3.生态链

空间计算行业一直以来的痛点是生态未能建立，而苹果最新的 Apple Vision Pro 的推出，得益于苹果生态链中早已在视频、教育、娱乐、媒体和社交领域布局多年，自下向上完整覆盖设备产业链。

4. 中国优势

(1) 行业参与者的倍增

中国有数百家硬件和软件公司。全球四个 HTC Vive X 加速器中有两个位于中国，分别位于北京和深圳。在中国制造业的推动下，出现在无数的 Cardboard 和其他变体。

(2) 国家和机构的支持

中国启动了“互联网+”倡议，旨在改造传统企业和行业，并通过数字化和新技术推动其发展，对虚拟现实和增强现实技术在这方面发挥重要作用寄予厚望。新华社于 2016 年 5 月开通了 VR/AR 频道。工业和信息化部计划制定虚拟现实/增强现实标准，并开设虚拟现实研发实验室。

这种制造能力、低成本、资金可用性和大众市场的结合，中国很可能成为全球空间计算市场的主要驱动力。总体来说，随着技术不断进步，行业整体向好，这种趋势可以归因于其主要卖点空间计算的交互性和沉浸感。

(二) 国际企业技术平台情况

国际企业技术平台主要有 Microsoft、Magic Leap、Google、Apple、Facebook、Nreal 等，如表 4-1 所示。各产品均有优劣势，目前尚无明确最优的国际企业技术平台。

表 4-1 国际公司产品优劣势分析

公司	产品	优劣势
Microsoft	HoloLens	<p>【优势】光波导技术成像和结构光 SLAM 的实现，成为了整个行业的风向标。</p> <p>【劣势】因为制造工艺的原因，视场角（FOV）太小，在使用的时候带来的负面作用明显。重量设计不合理，佩戴头重脚轻。</p>
	HoloLens 2	<p>【优势】视场角的大幅度扩大，实时跟踪的手势操作</p> <p>【劣势】新采用的衍射光波导技术并不成熟，亮度不均匀且越接近边缘越模糊</p>
Magic Leap	Magic Leap One	<p>【优势】是目前最好的显示方式，6 层镜片（两个三元光）实现了两个不同距离的成像，基于磁力的手柄能准确的提供绝对的空间位置。</p> <p>【劣势】无法带眼镜使用</p>
Google	Project Tango, 空间计算 Core	<p>【优势】开发者能够在安卓手机上创建空间计算应用程序</p>
Apple	Vision Pro	<p>【优势】Apple vision Pro 区别于传统头显，不是简单的把手机端的画面投射到头显设备中，而是重新设计了 UI 界面和空间交互下的 APP，引入 z 轴，超越二维交互，所有 app 都支持 3D 交互，不是对传统平面工作形式的替代，而是在三维领域创造新的刚性需求，提高生产效率。</p>
Facebook	Oculus Rift , Oculus Quest	<p>【优势】Facebook 开发了 Oculus Rift 和 Oculus Quest 这样的空间计算设备，与空间计算相关的平台是该公司显示出浓厚兴趣的领域</p>

Nreal	Nreal Light, Nreal Air	<p>【优势】重量较其他产品更轻，性价比高</p> <p>【劣势】发热量较大、无自适应近视调节功能</p>
-------	------------------------	---

资料来源：作者整理

（三）国际企业融资情况

空间计算企业的融资情况如表 4-2 所示，由于空间计算和混合现实密不可分，相关公司也属于空间计算范畴，因此此处也列出了以混合现实为概念的企业融资情况，如表 4-3 所示。可以看到，空间计算企业的融资途径主要有以下几种，且资金用途不同。

风投 VC：许多空间计算初创公司寻求风险投资公司的资金。投资通常用于研发、扩大团队以及将产品或服务推向市场。

战略合作伙伴关系：空间计算公司可能与大型科技公司、行业参与者或投资者形成战略合作伙伴。这些伙伴关系可以提供资金、资源和市场准入。

政府资助：根据空间计算应用的性质，公司也可以探索政府拨款和资助机会，特别是如果他们的技术在国防或公共基础设施中有应用。

IPO：一些成功的空间计算公司可能会选择通过 IPO 上市，从公开市场筹集资金，推动进一步增长。

收购：在动态技术格局中，空间计算公司可能会被希望增强其能力或进入新市场的大公司收购。

众筹：一些空间计算项目可能会利用众筹平台筹集初始资金，并与早期采用者社区接触。

表 4-2 以空间计算为概念的企业融资情况

	公司名称	融资信息
国外企业	Hadean	空间计算初创公司 Hadean 完成 3000 万美元 A 轮融资 Hadean 完成了由 Molten Ventures 领投， 2050 Capital、Alumni Ventures、Aster Capital、Entrepreneur First、InQTel 参投的 3000 万美元 A 轮融资，该笔资金将用于开发元宇宙基础设施，以支持沉浸式娱乐和企业数字孪生
	Augmedics	AR 手术导航团队 Augmedics 日前宣布，已完成由 CPMG 领投，以及 H.I.G. Capital, Revival Healthcare Capital 和 Almeda Ventures 等参投的 8250 万美元 D 轮融资。他们计划利用这笔资金来继续美国市场的扩张步伐，以及下一代平台的交付
	Ryplzz	2023 年 6 月 28 日 Ryplzz 推出空间计算技术，Pre-Seed 轮融资 300 万美元
	Meta	Meta 在 16 轮融资中总共筹集了 2460 万美元的资金。他们最近的一次融资是在 2022 年 8 月 4 日从 IPO 后的一轮债务融资中筹集的。Meta 在股票代码下注册纳斯达克，他们的股票在 2012 年 5 月 18 日的首次公开募股中以 38.00 美元开盘。Meta 由 25 名投资者出资。PayPal 和 All Blue Capital 是最近的投资者。Meta 已经进行了 54 项投资。他们最近的一次投资是在 2023 年 6 月 22 日，廷德尔国家研究所筹集了 500 万欧元。Meta 进行了 6 项多元化投资。他们最近的一次多元化投资是在 2023 年 4 月 6 日，当时 Wisecut 筹集了 5 万美元。Meta 有 1 次退出，那就是 Gojek。Meta 已经收购了 101 个组织。他们最近的一次收购是在 2023 年 1 月 12 日收购的 Gary Sharp Innovations。

	Magic Leap	Magic Leap 在 11 轮融资中总共筹集了 35 亿美元的资金。他们最近的一笔资金是在 2021 年 10 月 11 日从一轮未知的风险投资系列中筹集的。Magic Leap 由 28 名投资者提供资金。NTT DoCoMo 和 AT&T 是最近的投资者。Magic Leap 已经进行了 3 项投资。他们最近的一次投资是在 2019 年 2 月 28 日。Magic Leap 进行了 2 项多元化投资。他们最近的一次多元化投资是在 2019 年 2 月 28 日，当时 BadVR 筹集了 10 万美元。Magic Leap 已经收购了 7 个组织。他们最近的一次收购是 2019 年 5 月 16 日的 Mimesys。
	Mytaverse	Mytaverse 在两轮融资中总共筹集了 1030 万美元的资金。他们的最新资金是在 2022 年 4 月 18 日从种子轮筹集的。Mytaverse 由 7 名投资者提供资金。Alberto Peisach 和 Blumberg Capital 是最近的投资者。
	RealWear	RealWear 在 6 轮融资中总共筹集了 1.268 亿美元的资金。他们的最新资金于 2022 年 6 月 1 日从 C 轮融资中筹集。RealWear 由 10 名投资者出资。Foundry Group 和 Columbia Ventures 是最近的投资者。根据 PrivCo 的数据，截至 2022 年 6 月 9 日，RealWear 的税后估值在 1 亿至 5 亿美元之间。注册免费试用，查看准确的估值并搜索估值相似的公司。RealWear 已于 2019 年 12 月 12 日投资 RealWear。这项投资-预种子轮-RealWear-价值 5000 万元人民币。RealWear 已于 2022 年 6 月 9 日收购 Genba。
	Scope AR	ScopeAR 在 8 轮融资中总共筹集了 1180 万美元的资金。他们的最新资金是在 2022 年 12 月 13 日从一轮未知的风险投资系列中筹集的。ScopeAR 由 14 名投资者出资。TechNexus Venture Collaborative 和 MESH 是最近的投资者。ScopeAR 已于 2019 年 12 月 11 日收购 WakingApp Realities。

	Augrade	Augrade 在两轮融资中总共筹集了 12.5 万美元的资金。他们的最新资金是在 2023 年 7 月 1 日从一轮赠款中筹集的。
	Visby	维斯比已经提高了 1 轮。这是 2016 年 8 月 8 日举行的种子赛。Visby 由 4 名投资者出资。Greg Castle 和 Mana Ventures 是最近的投资者。
	SpatialFirst	SpatialFirst 已经筹集了 1 轮资金。这是 2019 年 9 月 1 日发起的一轮非股权援助。SpatialFirst 由 SkyDeck Berkeley 资助。
	Chateauz	Chateauz 在一轮融资中总共筹集了 20.5 万美元。这是 2023 年 7 月 1 日举行的种子前一轮。
	Palmplug	Palmplug 在一轮融资中总共筹集了 10 万美元。这是 2021 年 9 月 1 日举行的种子前一轮投票。
	Equinox Vision	Equinox Vision 在一轮融资中总共筹集了 5 万欧元。这是 2019 年 9 月 3 日举行的种子前一轮投票。Equinox Vision 由 Fil Rouge Capital (FRC) 出资。
	SenseGlove	SenseGlove 在 4 轮融资中总共筹集了 360 万欧元。他们的最新资金是在 2023 年 4 月 19 日从 a 轮融资中筹集的。SenseGlove 由 5 名投资者出资。Lumaux 和 FORWARD. one 是最近的投资者。
	Origami XR	Origami XR 已经筹集了 4 轮。他们的最新资金是在 2022 年 3 月 22 日从一轮赠款中筹集的。Origami XR 由 6 名投资者出资。谷歌云加速器加拿大和创意破坏实验室 (CDL) 是最近的投资者。
	Volcano	Volcano 于 2021 年 11 月 1 日进行了一轮种子轮融资。Volcano 由 Sony Joy 出资。
	Malamute	Malamute 在三轮融资中总共筹集了 45 万美元。他们的最新资金是在 2023 年 1 月 28 日从一轮可转换债券中筹集的。Malamute 由 Techstars. 资助。

国内企业	之行无界	2023年6月20日 空间计算芯片公司之行无界获前海方舟系基金数千万元种子轮投资,资金将用于加速产品研发和市场拓展
	维享时空	上海维享时空科技有限公司(以下简称“维享时空”)宣布完成数千万元 PreA 轮融资。本轮融资由汉理资本、蓝驰创投领投, 优山资本跟投, 资金将主要用于元宇宙底层技术研发, 包括空间计算、AIGC、3D 云服务等“场景+算法+算力”的集成研发, 以及加速商业落地进程。
	宸境科技	空间智能公司宸境科技日前已完成数千万美元 A 轮融资, 由上海人工智能产业股权投资基金和 IDG 资本共同领投, 中国 TOP3 上市游戏企业三七互娱及老股东 OPPO、富达集团(Fidelity)旗下自有资产投资机构斯道资本(Eight Roads)、BV Capital、欣旺达集团及复星锐正资本跟投。
	虚拟动点	北京虚拟动点科技有限公司注册资本为 6000 万元, 已于 2020 年完成了 A 轮融资, 截至目前共对外投资了 6 家企业, 参与招投标项目 8 次, 知识产权方面有商标信息 46 条、专利信息 30 条、著作权信息 11 条, 在其所处行业中属于超大型企业。

资料来源: Crunch Base

表 4-3 以混合现实为概念的企业融资情况

	公司名称	融资信息
国外企业	Immersed	Immerced 在 8 轮融资中总共筹集了 1210 万美元的资金。他们的最新资金是在 2021 年 4 月 3 日从一轮股权众筹中筹集的。Immerced 由 14 名投资者提供资金。Ozzy Akay 和 Pario Ventures 是最近的投资者。

Nreal	2021年3月4日，混合现实科技公司「Nreal」宣布完成B2轮融资，投资方为中金资本 2020年9月4日“Nreal”今日宣布已完成4000万美元的B1轮融资 appMagics 获得A轮融资
ShapesXR	已获得 Supernode 牵头的 860 万美元种子轮融资
MediView XR	MediView XR 一直致力于结合混合现实和医疗手术，从而为外科医生和医疗保健专业人员提供革命性的三维“X射线视觉”。团队目前主要是围绕微软 HoloLens 2 打造产品，并已经开出多个相关系统。团队宣布获得由梅奥诊所、克利夫兰诊所、GE HealthCare、JobsOhio Capital Growth Fund、Inside View Investments, LLC 和 KKVS Syndicate 等提供的 1500 万美元的战略融资。迄今为止，这家公司的融资额已经达到大约 2950 万美元
Immersion	在一轮融资中总共筹集了 100 万美元。这是 2023 年 1 月 10 日举行的企业圆桌会议。
Imersys	Imersys 已经筹集了 1 轮资金。这是 2016 年 11 月 1 日举行的种子轮。
AURA XR	AURA XR 在一轮融资中总共筹集了 90 万美元。这是 2017 年 2 月 2 日举行的种子前一轮。
Placeme	Placeme 在两轮融资中总共筹集了 200 万菲律宾比索的资金。他们的最新资金是在 2021 年 5 月 18 日从种子轮融资。Placeme 由 4 名投资者出资。b.value AG 和 Bright Pixel 是最近的投资者。
Tomestic	Tomestic 已经筹集了 1 轮资金。这是 2021 年 4 月 8 日举行的种子前一轮。

	Musemio	Musemio 在三轮融资中总共筹集了 10 万英镑。他们的最新资金是在 2020 年 8 月 1 日从种子前一轮筹集的。 Musemio 由 2 名投资者出资。Google for Startups 和 Bethnal Green Ventures 是最近的投资者。
	Born	BORN 已经筹集了 1 轮资金。这是一轮私募股权融资，于 2019 年 3 月 5 日募集。BORN 由 2 名投资者出资。Zodius Capital 和 True North 是最近的投资者
	Veyond Metaverse	Veyond Metaverse 在一轮融资中总共筹集了 300 万美元。这是 2022 年 2 月 4 日举行的种子赛。 Veyond Metaverse 由 SDB Investment 提供资金。
	SyncReality	SyncReality 已经筹集了 1 轮。这是 2021 年 1 月 1 日发起的风险投资系列未知轮。SyncReality 由 Serpentine Ventures 提供资金。
	DeepScience	DeepScience 在 3 轮融资中总共筹集了 1140 万美元。他们的最新资金是在 2021 年 11 月 2 日从 B 轮融资中筹集的。DeepScience 由 8 名投资者出资。Stony Creek Capital 和 Mount Morning Capital 是最近的投资者。

资料来源：Crunch Base

五、空间计算科研概况

空间计算当前最新的科研方向主要集中在以下方面：

1. 空间数据分析和可视化：包括处理大规模空间数据集的方法、空间分析和沉浸式可视化方法。
2. 空间人工智能和机器学习：探索人工智能和机器学习技术在空间计算中的应用。包括开发空间推理、时空预测和空间环境中自主导航的算法。

3. 增强现实 (AR) 和虚拟现实 (VR): 基于 AR 和 VR 研究的进展, 开发新的交互范例、沉浸式体验以及教育、医疗、建筑和娱乐应用。

4. 空间交互设计: 开发基于空间计算的交互设计, 包括基于手势的界面、非接触式交互、触觉反馈系统和空间计算设备的多模式界面。

5. 城市规划和智慧城市的空间计算: 将空间计算技术应用于城市规划、交通系统、环境监测和建筑能源管理, 以创建更加可持续和宜居的城市。

6. 健康和医学空间计算: 使用空间计算技术进行医学成像、手术模拟、患者监测和康复。包括开发空间计算辅助手术系统、基于空间计算的疗法以及用于公共卫生监测的空间数据分析。

7. 空间应用的边缘计算: 研究如何跨边缘设备和云服务器有效地分配空间计算任务。包括针对资源受限环境优化算法并确保空间应用程序的实时性能。

8. 空间计算的伦理和社会影响: 探索空间计算技术的伦理、法律和社会影响。这包括研究与隐私、监视、可访问性、数字公平以及空间计算对社会互动和行为的影响相关的问题。

在最新技术方面, 美国处在空间计算的科研前沿, 著名实验室有 MIT Media Lab 和 Stanford Virtual Human Interaction Lab。这些研究涵盖了从提高空间计算设备的显示质量和交互体验到开发新的感知算法和用户接口的广泛领域。例如通过新型材料和优化光学器件

显示屏等，降低空间计算设备的重量和成本，或利用空间计算提升远程协作的效率。

此外，以 **Stable Diffusion 3** 和 **Sora** 为代表的图像生成大模型最新技术，为空间计算提供提供更丰富的视觉内容生成，其在图像质量、生成速度和创新应用方面的改进，使得空间数据得到更好的利用，空间计算设备对场景的理解更加深入，以生成更逼真的虚拟三维内容，支持空间计算的应用。

中国研究者发力点一般集中在其中某一个技术环节，而非全流程都涉及，如表 5-1 所示，主要集中在光学硬件、视觉算法和内容端。其中光学硬件方面以北京理工大学、清华大学精密仪器系等为代表；视觉算法方面以清华大学计算机系、清华大学电子系、北京大学、中科院自动化所、中科院计算所等为代表；内容方面以同济大学、中国人民大学、清华大学等为代表。

表 5-1 产业链环节中国高校团队研究内容

产业链环节	高校团队	研究内容
光学硬件	清华大学精密仪器系 李立峰	<p>国际光栅理论方面的著名专家，主要研究方向是衍射光栅的电磁场理论，衍射光栅的电磁场理论和数值计算方法，包括模态法、坐标变换法、Rayleigh 法、积分法、和微分法，特别注重二维光栅的快速数值计算方法。其工作在上世纪最后十年的光栅理论的进步中起了决定性的作用，具体包括：</p> <p>①对积分、经典模式、Fourier 模式、和坐标变换等光栅计算方法进行了扩展和改进。</p> <p>② 在光栅数值计算中倡导并推广了 S 矩阵和 R 矩阵算法，解决了曾困扰一些光栅解法近 20 年的数值不稳定性问题。</p>

		③ 创立了周期函数乘积的 Fourier 因式分解理论，这一理论的应用使许多光栅计算方法的收敛速度提高了若干个数量级。
北京理工大学 光学成像与计算实验室		长期在光学设计、自由曲面光学、VR/AR 与近眼显示技术、计算光学与计算成像等方向开展深入研究。近年来发表论文 110 余篇，SCI 收录 60 余篇，授权国家发明专利 40 项(11 项转化)，国际专利 5 项(全部转化)。“自由曲面拼接式头盔显示技术”荣获 2011 年“中国光学重要成果奖”；“头戴式显示技术研究及应用”荣获 2017 年中国光学工程学会“创新技术奖一等奖”；“虚拟现实与增强现实头戴显示技术研究及产业化”项目荣获 2019 年中国产学研合作创新成果奖一等奖“；虚拟现实与增强现实头戴显示关键技术及应用”获得 2019 年北京市技术发明一等奖。基于近 30 年理论和应用技术研究成果，研制了轻薄型头戴显示器并成功应用到国内外众多单位，产生了重大的社会价值和经济效益。
北京理工大学 王涌天教授		长期在技术光学和虚拟现实领域从事教学和科研工作，主要研究方向包括成像和照明光学系统设计和 CAD，新型光学元件。深入研究了衍射光学元件在成像系统中的应用及设计方法，提出并验证了旋转掩模刻蚀/镀膜一次成型加工新工艺。
北京理工大学 程德文教授		<p>科研方面：在自由曲面光学方面有着深厚的造诣。对自由曲面光学系统设计、虚拟现实（VR）和增强现实（AR）头戴显示技术的研究，国内首家采用曲面模内注塑技术实现 Pancake 偏振光学元件的光学模组供应商，曲面模内注塑技术可提升 Pancake 方案的光学还原度，使得光学方案的显示清晰度增加 20%。</p> <p>成果转化方面：耐德佳创始人，成功推动自由曲面光学技术的产业化落地与商用，并将自由曲面光学技术做到全球领先，与蔡司、爱普生等国际顶尖巨头水平处于同列，有效推动了 AR 行业的发展。全新自研的自由曲面钻石 AR 光学解决方案，并被高通、联想等新推出的 AR 眼镜采用；去年 11 月，在自由曲面钻石基础上进行大幅升级，进一步推出了自由曲面钻石 Pro AR 光学解决方案。</p>
北京理工大学 信息与电子学		北京理工大学光电学院在光学系统设计和 CAD 领域处于国内领先地位，成功地研制了资源卫星中继光学系统、飞行仿真头位跟踪球幕视景系统、高速动态物质状态测量光学系统等大型、军用、复杂光

	部(增强现实及三维显示方向)	学系统。目前正在系统地开展对自由曲面光学设计、加工、检测技术的研究。拥有 CODEV 和 LightTools 光学工程软件、系列光学干涉仪。其在头盔式立体显示技术、裸眼立体显示技术、真三维显示技术以及应用方面开展了卓有成效的研究。
	北京理工大学光电学院	在光学系统设计和 CAD 领域处于国内领先地位,成功地研制了资源卫星中继光学系统、飞行仿真头位跟踪球幕视景系统、高速动态物质状态测量光学系统等大型、军用、复杂光学系统。目前正在系统地开展对自由曲面光学设计、加工、检测技术的研究。
视觉算法	清华大学计算机系 张松海	张松海副教授研究方向为计算机图形学与虚拟现实、图像/视频处理。在 ACM TOG、IEEE TVCG、IEEE TIP、IEEE TMM 等期刊和 ACM Siggraph、IEEE VR、IEEE CVPR 等会议上发表论文 40 余篇。作为负责人主持国家自然科学基金重点项目、科技部重点研发计划课题等多项;获国家科技进步二等奖一项(排名第 3)
	清华大学计算机系网研院 崔勇	基于边缘计算的沉浸式 VR 及低时延网络及应用(如 VR/AR、视频直播和游戏等)网络技术研究所所长,教育部青年长江学者奖励、国家优秀青年科学基金、教育部新世纪人才和中创软件人才奖获得者,中国通信标准化协会理事,现任 IEEE TCC、IEEE Network 及 IEEE Internet Computing 期刊编委。获得国家技术发明奖二等奖 1 次、国家科学技术进步奖二等奖 1 次、省部级科技进步一等奖 4 次以及国家信息产业重大发明 2 次。
	清华大学软件学院 徐枫	针对目前 VR 行业急需解决的内容生成和内容交互问题,提出了利用光场解决内容交互的问题。
	清华大学计算机系 史元春	在人机交互、普适计算、多媒体等领域的研究成果多次获得学术奖项,包括两项国家科技进步奖,以及 CHI、MobileHCI 等国际会议的多项最佳论文奖、最佳论文提名奖。近年来,史元春教授在人机交互领域的贡献包括用户行为建模、手机智能交互技术、大屏幕显示与交互装置、VR/AR 头盔交互等。她发表了 100 多篇人机交互领域 CS 排名为顶级会议和学术期刊的论文,近 5 年的论文包括 30 余篇 CHI、UIST、UbiComp、TOCHI 和 IJHCS 论文。
	清华大学电子工程系 王贵锦	研究成果“编码摄像关键技术和应用”获 2019 年国家科技进步二等奖,获 2 项 2018 年纽伦堡国际发明展金奖,获 2018 年电子学会科

	<p>技发明一等奖，获 2014 年人工智能学会“吴文俊”科技进步一等奖，2014 年山东省科技进步二等奖，主导制定现行国家标准 2 项。</p> <p>研究兴趣包括数字图像/视频处理与分析、3D 混合现实、多媒体人机交互</p>
清华大学 电子工程系三维混合现实研究中心	<p>为人工智能混合现实技术理论研究提供专业团队和开放合作平台，促进校企合作，积极推进产学研融合发展。该中心将在混合现实标准建立和形成系统规范方面着力，促进高校、科研院所和企业的融合发展，推动关键技术研发与应用，加快产学研成果转化落地。</p>
北京大学图形与交互技术实验室	<p>北京大学计算机系图形与交互技术实验室于 1984 年建立。是一支有着雄厚师资力量、先进教学试验设备和优良传统的队伍。实验室主要从事研究方向包括图形图像与可视化、人机交互与用户界面、虚拟现实与多媒体等。实验室常年从事国家 863、973、自然科学基金等项目科研，并承担研究生和本科生的图形图像及人机交互等方面的教学任务。</p>
北京大学智能多媒体与虚拟现实重点实验室	<p>实验室以人工智能（AI）理论为基础，致力于研究人工智能方法与多媒体处理、虚拟现实内容生成相结合而形成的关键技术，针对多媒体信息处理技术的复杂性、虚拟现实内容生成技术的迫切性，探索包含深度学习在内的基于人工智能的多媒体处理技术以及虚拟现实内容生成方法。</p>
北京大学智能科学系视觉信息处理研究室	<p>视觉信息处理研究室在充分发挥学科交叉的综合优势基础上，特别注意从视觉信息处理中提出新的数学问题，进一步发展用于信息处理的数学方法，主要研究方法包括图像压缩与编码、图像处理和模式识别、计算机视觉等。</p>
中科院自动化所吴毅红教授	<p>将传统几何方法与深度学习融合，在提升鲁棒性的同时兼顾精度和速度</p>
浙江大学章国锋教授和鲍虎军教授	<p>主要研究视觉 SLAM 方向，是现代 AR 技术的基石</p>
山东大学秦学英教授	<p>主要从事增强现实中的计算机视觉、图像视频分析和处理等智能算法的研究。近年来主要研究工作包括，三维模板跟踪、物体的检</p>

	测、识别与跟踪、深度图矫正和修复、虚实融合与场景重绘、肢体动态语义分析及虚实交互等。
北京邮电大学 乔秀全教授	在 AR 领域重点研究 5G+WebAR 提出了“5G 时代：端+边缘+云计算的 WebAR 分布式协同计算”的技术解决方案，并已经尝试应用
中科院计算所 虚拟现实技术 实验室	实验室主要在虚拟现实、多模式人机接口和人工智能等方向开展基础与前瞻技术研究，目前研究重点集中于“虚拟人合成”和“虚拟环境交互”，涉及计算机图形学、计算机视觉、计算机仿真以及人机交互等学科领域。研究成果已广泛应用于虚拟漫游、游戏娱乐、运动训练、人机功效等领域。
北京师范大学 虚拟现实与可 视化技术研究 所	北京师范大学虚拟现实与可视化技术研究所，研究所主要研究方向为虚拟现实理论和可视化技术。团队科研人员在文化遗产数字化保护、三维医学与模型检索、颅面形态信息学与颅面复原、虚拟现实理论及工程学方法四个方面的应用研究中，取得了一系列与国际、国内研究同步，又有广阔市场前景的科研成果，并致力于将这些成果推广应用，创造了一定的社会效益和经济效益。目前实验设备已经配备了先进的虚拟现实展示、计算、存储、交互设备和测试仪器。研究方向包括：虚拟现实理论及工程学方法，文化遗产数字化保护，三维医学与心脑血管可视化，颅面形态信息学与颅面复原
浙江大学计算 机辅助设计与 图形学国家重 点实验室	浙江大学计算机辅助设计与图形学国家重点实验室。计算机辅助设计与图形学是多学科交叉的高技术研究领域。本实验室主要从事计算机辅助设计、计算机图形学的基础理论、算法及相关应用研究。 主要研究方向（1）虚拟环境的表示和感知。重点研究大规模虚拟环境的高效构建和实时绘制技术，符合人类生理、心理的虚拟环境感知信息的合成和可信性评价，大规模场景的分布组织、累进传输和远程服务等。（2）自然人机交互技术与界面。重点研究基于新型传感器的用户动作的高精度实时跟踪、分析和交互语义理解技术，便于用户使用、面向大型活动的多人共享式并发交互技术和装置；基于交互动作捕捉的虚拟化身驱动技术；可嵌入物理环境的实物用户界面和基于摄像机的交互界面技术等。（3）增强现实技术。重点研究现实环境与对象信息的采集与一致性重建，虚拟对象的物理性态的动态演化模型和实时计算，虚拟对象材质的时空变化模型及其实时计算，虚实混合环境的一致性表现和相互作用，任意曲面的多通道投影显示技术与装置等。

	山东大学人机交互与虚拟现实研究中心	山东大学软件学院人机交互与虚拟现实研究中心研究人机交互与图形学理论及方法、媒体计算、虚拟现实与虚拟样机技术、网格计算、制造业信息化等领域。
	北航虚拟现实技术与系统国家重点实验室	<p>(1) 虚拟现实建模理论与方法。主要研究：虚拟实体的图形、图像和视频建模；身体和行为建模；不同交互模型的建模方法；大规模虚拟场景的实时表示和渲染；复杂物体的真实表示和绘制；模型的复杂性和可信度。</p> <p>(2) 增强现实与自然人机交互。主要研究：VR/AR 中的实时跟踪与定位；虚拟环境与真实环境的无缝融合；</p> <p>(3) 互联网虚拟现实方法与技术，主要研究：Web VR、云计算虚拟现实与分布式虚拟现实</p> <p>(4) 虚拟现实开发支撑平台与系统。主要研究开发：支持虚拟现实理论与技术研究的软硬件平台与实验装置；虚拟现实应用系统开发支撑平台与工具；虚拟现实技术与系统标准；典型应用示范系统。</p>
	华东师范大学视觉空间认知和虚拟现实实验室	华东师范大学视觉空间认知和虚拟现实实验室主要通过虚拟现实技术研究人类的社会交互及相关行为。本实验室自成立以来已在 Nature Human Behavior, Human Factors 等国际心理学与神经科学杂志发表多篇的学术论文。
内容端	同济大学艺术与传媒学院虚拟现实实验室	虚拟现实暨数字娱乐实验室于 2015 年开始筹建，主要的实验设施包括了各类主流的虚拟现实与增强现实设备设施，包括头戴式设备如 Oculus Rift CV1 虚拟现实头盔、HTC Vive Pro 虚拟现实系统、Microsoft Hololens 增强现实眼镜、三星 Gear VR 移动式虚拟现实头盔、Meta 2 AR 全息眼镜等；虚拟现实系统包括 Zspace 桌面虚拟现实系统、虚拟驾驶仿真系统；捕捉系统包括诺亦腾 TM-SI-18P 惯性式动作捕捉系统、Nokov 光学实时运动捕捉系统；以及 Insta360 Pro 8K 3D 专业级全景相机等，基本建成了国内一流的面向未来媒体的创作与研究平台。实验室目前已与英国 Staffordshire 大学计算与数字技术学院、Unity 大中华区、中国航天科技集团公司第八研究院、上汽集团、英国国立（犹太）大屠杀博物馆开展联合科研项目。

	中国人民大学 元宇宙研究中心	中国人民大学交叉科学研究院于 2022 年 2 月 27 日成立了全国高校首家元宇宙研究中心。旨在通过对元宇宙这一当前全球前沿创新领域的探索，推进学科交叉助力新文科建设，统筹校内外力量形成“有组织的科研”，激发学科建设活力，加快推进学科交叉、交叉学科学术交流和人才培养。借助元宇宙研究中心，中国人民大学将在推动全国元宇宙技术、元宇宙产业、元宇宙风险防范、元宇宙治理、元宇宙监管与法律、元宇宙文化传播等发展，搭建全国元宇宙领域政产学研合作交流平台。为党和政府科学决策提供智力支持与决策咨询，促进政、产、学、研的深度融合和创新发展。
	清华大学新闻与传播学院 元宇宙文化实验室 沈阳教授	该实验室由清华大学新闻与传播学院整合清华大学校内各学院研究力量与中文在线一道打造多方联合的元宇宙研究共同体，清华大学新闻与传播学院党委书记胡钰担任实验室管委会主任，中文在线集团董事长兼总裁童之磊担任管委会联合主任。实验室将以产学研相结合的方式，在未来媒体技术发展、元宇宙文创、元宇宙指数、虚拟数字人指数等元宇宙领域展开研究，力图将实验室打造成国内行业前瞻性、理论开拓性、研发创新性兼具的元宇宙科研机构。
	清华大学万科公共卫生与健康学院 陈润森教授	虚拟现实技术在心理健康与精神疾病的应用

资料来源：作者整理

六、专业术语解析

空间计算

空间计算定义为人与机器的交互中机器保留并操纵对真实对象和空间的引用。空间计算广泛地描述了用于捕捉、处理 3D 数据以及与 3D 数据交互的过程和工具。

虚拟现实 (Virtual Reality)

虚拟现实 (VR) 是一种模拟体验，采用姿势跟踪和 3D 近眼显示器，为用户带来虚拟世界的身临其境的感觉。虚拟现实的应用包括娱乐（特别是视频游戏）、教育（例如医疗或军事训练）和商业（例如虚拟会议）。

增强现实 (Augmented reality)

增强现实 (AR) 是一种结合了现实世界和计算机生成内容的交互式体验。内容可以跨越多种感官模式，包括视觉、听觉、触觉、体感和嗅觉。AR 可以被定义为一个包含三个基本特征的系统：现实和虚拟世界的结合、实时交互以及虚拟和现实对象的精确 3D 配准。

混合现实 (Extended reality)

扩展现实 (Extended Reality, 简称 XR)，是指通过计算机将真实与虚拟相结合，打造一个可人机交互的虚拟环境，这也是 AR、VR、MR 等多种技术的统称。通过将三者的视觉交互技术相融合，为体验者带来虚拟世界与现实世界之间无缝转换的“沉浸感”。

菲涅尔透镜 (Fresnel lens)

菲涅尔透镜 (Fresnel lens)，又名螺纹透镜，多是由聚烯烃材料注压而成的薄片，也有玻璃制作的，镜片表面一面为光面，另一面刻录了由小到大的同心圆，它的纹理是根据光的干涉及扰射以及相对灵敏度和接收角度要求来设计的。通过将透镜分成一组同心环形部分，与传统透镜相比，减少了所需的材料量。

Micro LED

微发光二极管显示器，（Micro Light Emitting Diode Display，缩写为 Micro LED）。其显示原理是将 LED 结构设计进行薄膜化、微小化、阵列化，其尺寸仅在 1~10 μm 等级左右；后将 μLED 批量式转移至电路基板上（含下电极与晶体管），其基板可为硬性、软性之透明、不透明基板上；再利用物理沉积制程完成保护层与上电极，即可进行上基板的封装，完成一结构简单的 Micro LED Display。

同步定位和建图 (SLAM)

同步定位和建图 (Simultaneous localization and mapping，简称 SLAM) 是构建或更新未知环境的地图，同时跟踪代理在其中的位置的计算问题。流行的近似求解方法包括粒子滤波器、扩展卡尔曼滤波器、协方差交集和 GraphSLAM。SLAM 算法基于计算几何和计算机视觉的概念，用于虚拟现实或增强现实。

元宇宙

元宇宙 (Metaverse)，是人类运用数字技术构建的，由现实世界映射或超越现实世界，可与现实世界交互的虚拟世界，具备新型社会体系的数字生活空间。“元宇宙”本身并不是新技术，而是集成了一大批现有技术，包括 5G、云计算、人工智能、虚拟现实、区块链、数字货币、物联网、人机交互等。

参考文献

- [1] News (2023) Homepage. Available at: <https://www.magicleap.com/blog-staging/spatial-computing-for-enterprise-rewrite-the-rules-of-your-industry> (Accessed: 24 December 2023)
- [2] What leaders need to know about spatial computing (2023) Harvard Business Review. Available at: <https://hbr.org/2023/11/what-leaders-need-to-know-about-spatial-computing> (Accessed: 24 December 2023).
- [3] 工业和信息化部、教育部、文化和旅游部、国家广播电视总局、国家体育总局.虚拟现实与行业应用融合发展行动计划（2022—2026年）：工信部联电子〔2022〕148号[EB/OL].[2022年10月28日].
https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/01/content_5723273.htm.
- [4] 中国电信、中国信通院 .5G 空间计算白皮书.
http://www.chinatelecom.com.cn/news/02/202304/t20230412_73812.html
- [5] Research, J.P. (2020) Consumer ar could have saved lives, economy, ACM. Available at: <https://cacm.acm.org/opinion/articles/245636-consumer-ar-could-have-saved-lives-economy/fulltext> (Accessed: 24 December 2023).
- [6] J. Delmerico et al., "Spatial Computing and Intuitive Interaction: Bringing Mixed Reality and Robotics Together," in IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 29, no. 1, pp. 45-57, March 2022, doi: 10.1109/MRA.2021.3138384.
- [7] What is structured light imaging? (no date) MoviMED. Available at: <https://www.movimed.com/knowledgebase/what-is-structured-light-imaging/> (Accessed: 24 December 2023).

- [8] Zheng, L.; Li, B.; Yang, B.; Song, H.; Lu, Z. Lane-Level Road Network Generation Techniques for Lane-Level Maps of Autonomous Vehicles: A Survey. *Sustainability* 2019, 11, 4511.
- [9] Belau, B. (2021) Facebook establishes New Metaverse Project Group as it focuses on the next connectivity shift, B2 Web Studios. Available at: <https://b2webstudios.com/facebook-establishes-new-metaverse-project-group-as-it-focuses-on-the-next-connectivity-shift/> (Accessed: 24 December 2023).
- [10] Tomaszewski, Dariusz, Rapiński, Jacek and Pelc-Mieczkowska, Renata. "Concept of AHRS Algorithm Designed for Platform Independent Imu Attitude Alignment" *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, vol.104, no.1, 2017, pp.33-47.
- [11] Rokid (2019) Understanding waveguide: The key technology for augmented reality near-eye display (part II), Medium. Available at: <https://arvrjourney.com/understanding-waveguide-the-key-technology-for-augmented-reality-near-eye-display-part-ii-fe4bf3490fa> (Accessed: 24 December 2023).
- [12] Specialist LCD/OLED supplier (no date) What is micro OLED? Micro OLED Display Product List - OLED/LCD Supplier. Available at: <https://www.panoxdisplay.com/micro-display/> (Accessed: 24 December 2023).
- [13] Display, H. (2023) What is the difference between PMOLED and Amoled?, What is the Difference Between PMOLED and AMOLED? -. Available at: <https://www.hongguangdisplay.com/blog/what-is-the-difference-between-pmoled-and-amoled/> (Accessed: 24 December 2023).

（作者：科创金融研究中心，专注于金融服务科技成果转化与
创业创新相关领域研究。）

联系人：科创金融研究中心

邮箱：rccmcf@pbcfsf.tsinghua.edu.cn

行业图谱研究项目

一、项目目标和定位

行业图谱是清华大学五道口金融学院科创金融研究中心基于科技成果转化研究的一项子课题，聚焦于科技成果这一核心要素，从技术链视角切入展开的研究项目。科技成果的转化需要对科技成果有清晰、准确、深刻的认识和理解，能够解析科技成果所包含的学术价值、社会价值、经济价值和人文价值等，从而探索科技成果的未来应用场景，以跨越从 0 到 1 的商业性转化，通过不断理解优化实现社会产业化，并最终成为科技推动社会发展的历史进程。

然而，由于科技天然具有强大的认知壁垒，其先进性、创新性的特点，使得科技成果面临非专业人士看不懂、不敢判断的知识窘境。在成果转化的操作路径中，执行者可分类为三方：成果供给方、成果接收方及连接双方的中介服务机构。除了成果供给方之外，成果接收方和中介服务机构都面临着知识窘境。成果供给方是科技成果的发明人、创造者，对科技成果的学术价值拥有深度认知，但缺乏商业经验和分析社会需求的能力，很难独立实现成果的成功转化；成果接收方是进行成果商业化、产业化的企业，对社会需求敏感，善于进行商业价值的探索，但由于不具备深厚的科研基础，不能对科技成果进行技术层面的准确分析和判断，影响执行效率；中介服务机构虽然具备政策分析、法律服务等领域的专业能力，但同样面临看不懂技术的知识窘境，导致出现无效推介、不合理的专利布局、未来的专利纠纷等潜在危机。这一需求的断层也间接性地影响经济学称之为成果转化“死亡之谷”时期的存在。因此，如何准确认识科技成果，正确判断科技成果的技术领先度，理解科技成果所处的行业地位和产业链发展格局，对于提高科技成果转化具有极其重要的价值。

本研究以国家十四五规划为导向，重点关注与国家战略需求发展相关的重大创新领域。集中在人工智能、量子信息、集成电路、生命科学、生物育种、空天科技、深地深海、现代能源等前沿领域。对基础科研方向进行应用场景的细分，将相关可转化

/转化中的科技成果进行技术链条的梳理，通过专业性的技术解构和解析，形成高逻辑性、易理解性的技术图谱；并在此基础上，对科技成果产业化应用现状进行行业研究和分析，以全球视野定位领先梯队中的科创企业和学术团队的技术实力。通过行业图谱的研究，不仅可以清晰定位高新科技企业的技术竞争力，而且能够对我国相关行业现状和未来方向有更准确的认识。既为科技成果转化提供了专业性知识体系支撑，也有助于指导城镇产业化发展布局、推动产业链融通创新、引导创业投资基金对“硬科技”的积极性及鼓励金融支持创新体系的建设。

二、研究方法

方法学上，行业图谱研究将进行学科领域分级细化，再对技术在应用场景方向上进行详细分级和解构：

（一）一级分类：从应用产业所属学科的角度，以国家十四五规划为导向，重点关注影响国家安全和全局的基础核心领域，包括人工智能、量子信息、集成电路、生命科学、生物育种、空天科技、深地深海、现代能源等。

（二）二级分类：对技术对象进行分类。比如生命科学中包括疫苗、新生物材料、细胞治疗、人工智能、基因技术等技术对象，择一进行技术应用方向分析和流程解析。

1、应用方向的技术流程全景

即对某一技术对象在一个应用方向上的技术流程全景图，从研发到生产、上市的全流程。如空间计算产品的研发生产及上市的整体概况图。

2、应用方向的技术产品细分类

对技术对象在此应用方向上所形成的产品种类进行细分，并提炼属性/功能的特点。比如空间计算消费级产品在游戏、零售业、教育、旅游、房地产、制造业、设计行业的应用。

3、应用方向上某一细分产品的技术开发流程

从上一级分类产品中选定一个细分产品，一般是现阶段技术发展最先进的产品，针对其所应用的场景相关技术开发/生产全流程进行解析和描述。比如：空间数据采集、空间数据处理、空间数据显示、空间数据交互等。

4、领先级国际科创企业及学者团队定位

将国际国内最领先的科创企业进行技术平台和产品性能的比较分析，并将其所具备的技术优势定位于上述图谱中。将国内外学者团队的领先性研究成果/转化状态进行分析，并定位于上述图谱中。比如：国际先进的空间计算企业如 Apple、Meta、Magic Leap 的优势技术平台。

三、研究报告形式

行业图谱以结构化脑图为基础形式，辅以文字报告进行解释说明。文字报告的内容框架包括：

概览：概述图谱传递的信息内容、解答的技术问题和目的。

科学背景简述：描述图谱行业背景、技术流程、关键技术平台和竞争点的细节、技术应用的例证及国内外行业发展现状，对图谱做详细内容的补充说明。

专业术语解析：针对重点专业术语进行概念解释。

参考文献。

免责声明

本报告由清华大学五道口金融学院科创金融研究中心（以下统称“研究中心”）编写。本报告仅供研究使用，并非为提供咨询意见而编写。本报告中的信息均来源于本研究中心认为可靠的已公开资料，但研究中心及其关联机构对信息的准确性及完整性不做任何保证。本报告的版权仅为研究中心所有，如需转载，请注明本文为本研究中心的著作。

（作者：朱雅姝为清华大学五道口金融学院科创金融研究中心高级研究专员。安砾为清华大学五道口金融学院副教授，清华大学五道口金融学院科创金融研究中心副主任。）

联系人：朱雅姝

邮箱：zhuysh@pbcfsf.tsinghua.edu.cn
