



导 论

在动画的世界中，设计虚拟角色的动画师是真正的幕后演员，更是角色灵魂的塑造者。动画师基于经验、灵感与娴熟的专业技法，赋予了虚拟角色生命与个性，使它们在屏幕上栩栩如生，引发观众的情感共鸣。这种将无生命的数字模型转化为有情感、有思想的角色过程，既是艺术的创造，也是技术规律的显现。如今，动画技术的应用已经远远超越了娱乐行业，广泛渗透到教育、医疗、建筑、军事、广告等多个领域。制作的技术手段也在不断丰富和多样化。从传统的手绘二维动画到计算机制作的三维动画，从关键帧动画到运动捕捉技术，从动力学模拟到人工智能驱动，动画师拥有了越来越多的工具和方法来实现他们的创意。特别是近年来，AIGC 的新近成果使三维动画制作具有更加智能化和自动化的发展前景。通过对角色表演数据的机器学习，人工智能算法可以依据给定的需求，生成角色动作和表情。这不仅有望降低三维动画制作的门槛，减少重复劳动和中间环节，也为艺术家提供了更多创作的可能性。

1.1 多元的动画技术方法

历史上，动画技法手段的产生和发展，首先得益于光学成像、胶片感光、幕布投影等与电影相关的技术发明。这些技术对运动视觉的记录和再现能力，为动画的产生和发展奠定了基础。正是由于电影设备按照一定的频率，将连续运动分割成离散的静态画面，动画

的技法才有了发挥的空间，形成了统一的规范。动画以美术的手段，巧妙地创造运动的幻觉，这是艺术家美术造型的创意性和运动视觉规律性的统一。

1.1.1 电影与运动规律研究的开端

动画艺术的科学基础可以追溯到 19 世纪末。英国摄影师埃德沃德·迈布里奇（Eadweard Muybridge）为了解答马在奔跑时是否会四蹄同时离开地面的问题，在 1878 年制作了《马奔跑的瞬间》系列摄影作品，如图 1-1 所示。迈布里奇通过 24 台相机依次曝光拍摄马奔跑时的连续动作，首次以科学的方式揭示了动物运动的细节。这一发现不仅推动了运动学的研究，也为动画设计提供了重要的参考。迈布里奇的实验将运动通过技术手段分解为一系列静态画面，并验证了这些静态画面的连续播放可以重现动态效果。这一实验直接影响了早期动画的制作方法，并为后来的关键帧动画技术奠定了基础。此外，迈布里奇的研究不仅限于马匹，他还拍摄了大量人类和动物的运动，如行走、跑步、跳跃、投掷等。这些照片揭示了运动中的关键姿态和时间节点，为动画师提供了重要的参考资料。

拍摄真实运动，对角色表演进行记录、分析和规律总结，可以为动画艺术家提供重要的参考。然而，动画设计并非简单地复制再现，而是通过对真实运动的观察和提炼，创造出既符合物理规律又具有艺术表现力的动作表演。迪士尼动画师总结的“动画十二规律”，如挤压与拉伸、预备动作、跟随动作等，正是这一理念的集中体现。这些规律不仅帮助动画师更好地表现角色的动态，还赋予了动画独特的生命力。熟悉动画规律的动画师可以在

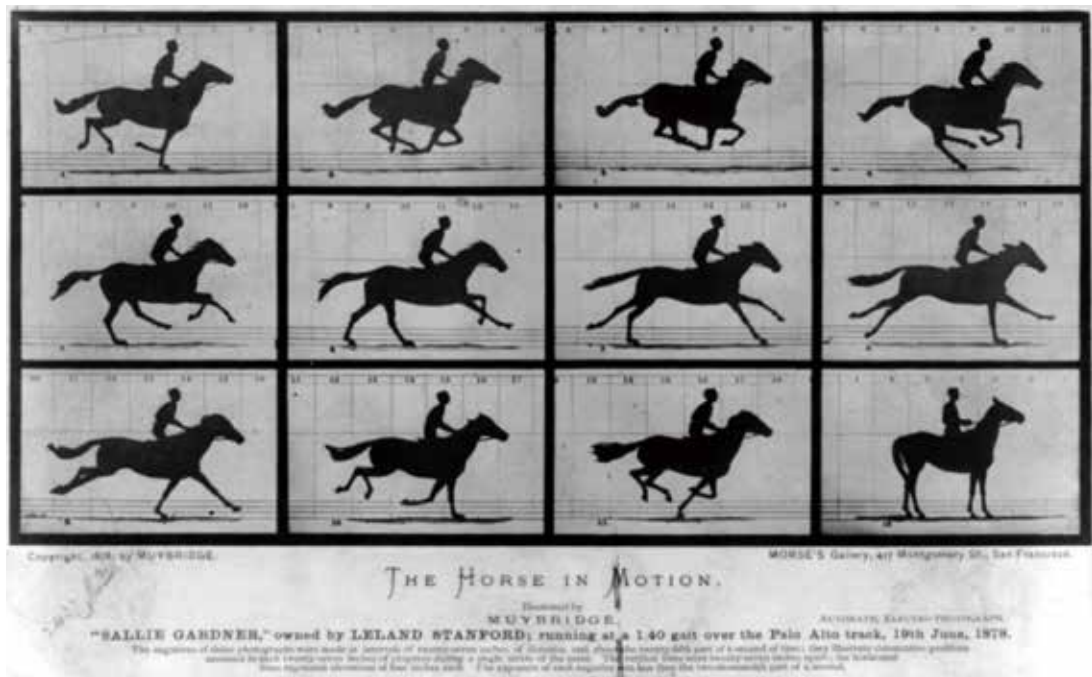


图 1-1
埃德沃德·迈布里奇的《马奔跑的瞬间》

不参考实物或资料的情况下，制作出符合常识的运动视觉效果。在动画的工业化生产合作中普及运动规律，可以让动画影片表演的质量和风格整体保持一致。

需要指出的是，部分动画规律描述的运动对象的视觉特征，并非来自对真实物理学特性的夸张或简化。尤其是一些以塑造弹性变形为手段的运动规律，往往存在卡通化表演的设计和想象成分。以“挤压、拉伸”为例，在经典的弹跳球练习中，小球在上升和下落过程中的拉伸，其实是在模拟拍摄高速运动物体时的运动模糊拖尾效果。因此，至少在这个经典范例中，小球规律性的拉伸表示的是运动速度而非受力变形。

1.1.2 动画的 Rotoscoping 技术

为了更真实地表现角色动作，波兰裔美国动画师马克斯·弗莱舍（Max Fleischer）在1915年开发了一种被称为 Rotoscope 的装置。这种技术通过将真人实拍电影投射到毛玻璃上，供动画师在纸上逐帧描摹真人动作来制作动画。Rotoscoping 技术用于动画制作的早期尝试是弗莱舍制作的《逃出墨水池》（*Out of the Inkwell*）。其中的小丑角色的动作设计就来自对真人演员动作的描摹。迪士尼在1937年的《白雪公主与七个小矮人》中首次大规模应用了这一技术。动画师以真人演员玛吉·钱皮恩（Marge Champion）为参考，逐帧描摹其动作，使白雪公主的舞蹈动作更加流畅和自然。真人演员参考影片和最终动画电影效果如图1-2所示。在更多的镜头中，动画师对玛吉表演的参考并非逐帧描摹，而是体现在对动作时间节奏和表演细节的把控上。这种参考真人演员表演录影的动画制作方式后来被广泛采用，并一直延续到三维动画时代。

观众不仅可以从写实风格角色（如白雪公主和王子）的表演中，看到非常接近真人的动作表现，同时也能在像小矮人这样的卡通角色身上，感受到夸张、滑稽、柔软弹性的表演风格。实际上小矮人角色们的动作，也同样参考了哑剧演员艾迪·柯林斯（Eddie Collins）的表演影片。他为七个性格各异的小矮人角色贡献了丰富多变、充满个性的表演参考。在这个过程中，他甚至戴上了小矮人造型的头套，以模拟影片中角色的身体比例和



图 1-2
《白雪公主与七个小矮人》的参考影片和成片效果

喜剧效果。其中大部分表演被直接描摹，用于制作角色行走和舞蹈时的动作。图 1-3 所示为艾迪·柯林斯为小矮人角色提供表演参考的拍摄现场。

《白雪公主与七个小矮人》于 1938 年在上海上映，直接启发了 1940 年中国动画史上具有里程碑意义的第一部动画电影《铁扇公主》的诞生。这部由万氏兄弟制作的黑白动画电影，选择了《西游记》中“三借芭蕉扇”的桥段，并且借鉴使用了 Rotoscoping 技术。包括铁扇公主在内的写实造型人物，完全按照真人的动作规律进行设计。而在如孙悟空这样卡通角色的表演中，既能看到描摹真人表演的动作设计，也能看到与国外早期动画《菲利克斯猫》(1923 年)和《汽船威利号》(1928 年)等类似的软管式四肢和表演风格。图 1-4 所示为《铁扇公主》中的角色形象和动作。

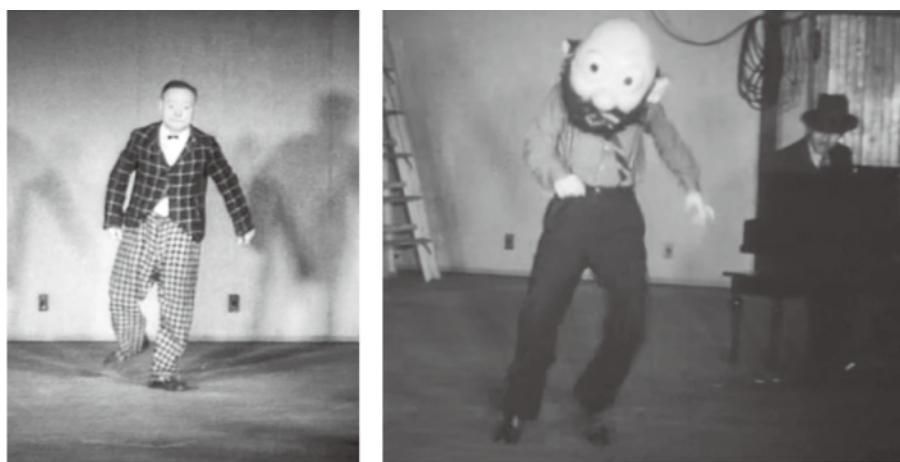


图 1-3
艾迪·柯林斯为
《白雪公主与七
个小矮人》提供
表演参考



图 1-4
动画电影《铁扇
公主》中的角色
形象和动作

迪士尼在后续影片中，继续使用 Rotoscoping 技术，来保障和提升动画的表现力。在 1950 年的《灰姑娘》中，女主角的舞蹈和日常动作就描摹自演员海伦·斯坦利 (Helene Stanley) 的表演。在 1959 年的《睡美人》中，奥罗拉公主和菲利普王子的动作分别参考了演员海伦·斯坦利和埃德·凯默 (Ed Kemmer) 的表演，影片中的舞蹈场景尤其展现了 Rotoscoping 技术的优势。1989 年的《小美人鱼》中，爱丽儿的游泳和舞蹈动作来自演员雪莉·斯托纳 (Sherri Stoner) 的表演。Rotoscoping 这种在二维动画时代捕捉真人演员表演的技术，不仅提高了动画的真实感，还为后来的运动捕捉技术提供了灵感。

在电视动画繁荣的时代，出于成本控制和工业化加工流程的考虑，动画帧数标准有所降低。动画师需要更加熟练地使用关键帧和中间画来设计角色表演。真人表演只适合作为关键姿势和速度节奏的参考。尤其是在日式“有限动画”进一步压缩帧数的发展趋势下，动画制作对关键帧间隔和中间画绘制方式有了更加机械和严格的限制。在商业二维动画领域，逐帧描摹的 Rotoscoping 技术已几乎不再可行，仅在一些特殊风格的小众作品中仍有应用。

1.1.3 三维运动捕捉技术在电影中的应用

1. 始于失败的技术转折点

三维动画技术进入电影制作，激发了三维 CG 角色表演对描摹真人演员动作的需求。在运动捕捉技术被引入电影制作之前，这项工作也是由动画师手动完成的。技术的转折点发生在 1990 年。由阿诺德·施瓦辛格主演的科幻电影《全面回忆》(Total Recall)，进行了电影史上第一次运动捕捉技术的尝试。影片中有一段男主人公进入安检设备，以 X 光透视骨骼的形态在屏幕上进行的表演。运动捕捉被用于创建 X 光透视骨骼的动态效果，如图 1-5 所示。然而，这一开创性的技术试验最终被证明是失败的。尽管负责视觉特效的 Metrolight 工作室使用了与现在的光学运动捕捉系统近似的设备方案，但最终未能真正从演员身上捕捉到所需的全部动作数据。负责运动捕捉的技术人员当时只能从一段不断重复的动作中获取一小段动画片段。最终，动画师不得不手动用三维骨架对位拍摄下来的施瓦辛格的表演过程，完成了一套三维的 Rotoscoping。



图 1-5
《全面回忆》(Total Recall) 中模拟 X 光透视的镜头

运动捕捉的这一次失败尝试，为后来的技术发展奠定了基础。时至今日，描摹影片动作仍是三维动画初学者最基本的练习方式之一。

2. 技术突破和第一个动捕角色

运动捕捉技术的真正突破发生在 1999 年的《星球大战前传 1：幽灵的威胁》(Star Wars: Episode I-The Phantom Menace)。电影中的外星人角色——加·加·宾克斯 (Jar Jar

Binks) 是电影史上第一个完全由运动捕捉技术制作的主要 CG 角色。演员艾哈迈德·贝斯特 (Ahmed Best) 穿着运动捕捉服进行表演, 其动作数据被转化为虚拟 CG 角色的动画表演 (见图 1-6)。这一技术的成功应用, 推动了运动捕捉技术在 CG 电影制作中的普及。



图 1-6
《星球大战前传 1: 幽灵的威胁》中的加·加·宾克斯和演员艾哈迈德·贝斯特

3. 当代运动捕捉技术的集大成者

2009 年的电影《阿凡达》(Avatar) 标志着运动捕捉技术的成熟。导演詹姆斯·卡梅隆 (James Cameron) 通过高精度的运动捕捉系统和面部表情捕捉技术, 将演员的表演无缝转化为纳美族外星人角色的动画。与早期技术相比, 当代运动捕捉技术不仅能够捕捉全身动作, 还能同步录下演员的台词, 并精确记录面部表情和细微的肌肉变化。《阿凡达》中对动捕技术方案的整合应用, 使得 CG 角色的表演更加自然、细腻和真实。詹姆斯·卡梅隆本人更倾向于称这套系统为“表演捕捉”(performance capture)。2022 年的续作《阿凡达: 水之道》则将技术的进步集中体现在水下复杂环境下的运动捕捉上。如今,《阿凡达》系列电影已成为业内公认的 3D 立体拍摄和运动捕捉的技术标杆。

1.1.4 数字游戏捕捉现实运动的技术应用

1. 二维游戏时代的 Rotoscoping

在游戏中第一个使用 Rotoscoping 技法描摹真人动作的典型案例, 是 1989 年的《波斯王子》(Prince of Persia)。这款游戏由乔丹·麦其纳 (Jordan Mechner) 开发。他在制作主人公动作时, 以自己 15 岁的弟弟戴维为模特, 拍摄了他的动作进行参考。乔丹·麦其纳以自己所在大学的停车场为场地, 让戴维做出了奔跑、跳跃、攀爬、跌倒等一系列动作表演, 并通过 Rotoscoping 的方式将这些动作转描到像素风格的游戏主人公身上, 如图 1-7



图 1-7
游戏《波斯王子》中的角色动作和参考视频

所示。这种技术应用使得《波斯王子》中的角色动作非常流畅和自然，并将电影般的叙事和动作体验引入了游戏领域。

2. 三维游戏采集中国武术动作的早期尝试

日本世嘉公司 1993 年开发的 3D 格斗游戏《VR 战士》是将真实武术动作纳入游戏表演，并且精确到具体拳种流派的前驱。1991 年，世嘉公司游戏制作人铃木裕赴中国河北沧州寻访八极拳传人吴连枝，采集学习八极拳招式，拍摄影像素材，作为游戏主人公“结城晶”（Akira Yuki）格斗招式动作的参考。2014 年中央电视台国际频道的《流行无限》栏目，依据吴连枝的回忆，对这段历史做了详细的报道。在该游戏的通关画面处还出现了向武术家吴连枝致敬的字样。《VR 战士》系列游戏更新至今已经推出了 6 个版本，并陆续加入了大量其他来自中国的武术流派。同时逐步从手动摹片转向运动捕捉技术方案。《VR 战士》初代游戏中的武术角色形象如图 1-8 所示。

此外，日本南梦宫公司（Namco）在 1995 年推出了以武器格斗为卖点的三维游戏《灵魂能力》（*Soul Blade*）。游戏角色的部分武器动作，采集自中国武英级武术运动员李天媛。在国产游戏行业尚不发达的时代，中国以这种方式为游戏角色动画制作做出了贡献。如今，武术格斗类游戏使用运动捕捉已经成为非常普遍的行业标准。



图 1-8
游戏《VR 战士》中的武术角色形象

3. 运动捕捉用于游戏与非遗的结合

2023 年，中国游戏《永劫无间》在版本活动“武道无穷”策划阶段，邀请了形意、太极、咏春、八极、少林等武术流派的传承人进行动作指导，使用运动捕捉技术记录各门派武术招式动作加入游戏模组。如图 1-9 所示，2024 年，中国游戏《归龙潮》邀请了普宁英歌国家级非遗代表性传承人——陈来发担当动作指导，采用动捕技术记录英歌舞的动作数据，用于游戏中的角色表演。这些案例表明，在数字媒体艺术和技术的框架下，原本用于影视、游戏等数字娱乐产品的动画生成和捕捉技术，可以拓展到更广阔的应用领域。例如，运动捕捉基于技术原理上的科学性，可用于非物质文化遗产的数字化记录和媒介产品创新，从而在世界范围内促进中国文化的数字化传播。



图 1-9
游戏《归龙潮》对英歌舞的运动捕捉

1.2 AIGC 用于角色动画的技术原理和阶段性成果

AIGC（人工智能生成内容）正在彻底改变与计算机图形有关的设计和传播业态。在三维动画的角色表演设计方面，AIGC 技术的应用成果尚不能成熟地与专业工作流程对接，对相关岗位和业态的影响远不及绘图和视频。但 AIGC 对三维设计领域的影响仍不容小觑。除智能生成模型贴图外，在角色动画方面，AIGC 可以通过生成对抗网络来创建角色动作和判别动作的真实性，并且通过强化学习已有的动作数据来实现常用动作数据的批量生产和动画人群模拟。目前，AIGC 的动画功能不仅体现在具有根据文字提示词生成动画的能力，还扩展到视频运动捕捉和角色动力学解算等领域。

1. 三维角色动画的骨骼数据结构

在三维动画中，骨骼系统是角色动作的核心驱动机制。骨骼数据记录了角色关节的运动信息，是动画制作的基础，也是 AIGC 学习和生成动画表演的前提。

对于绝大多数三维动画角色，复杂的角色表演只需要有限数量关节即可表示和记录。一个典型的人体骨架模型可能包括：头部（1 个关节）、脊柱（5~7 个关节）、手臂（每侧 5 个关节）、腿部（每侧 5 个关节）等。如果计算手指和部分表情的动画信息，则需要的关节数量还会增加。例如，线上动画数据平台 Mixamo 使用的角色骨架标准，就包含了含手指在内的共 65 个关节。

FBX 和 BVH（Biovision Hierarchy）是两种常用的动作数据格式，角色动作通过各关节位置或旋转信息上的关键帧存储在数据文件里。此外，还存在与特定三维插件对接的动作数据格式，如匹配 3Ds Max 的 Biped 绑定插件的 BIP 格式。尽管平台格式之间存在差异，但角色动画数据常用的骨架标准整体上大同小异，通常可以借助软件工具按名称匹配关系相互转化。目前大多数三维软件内置动画模块或插件功能，都支持导入常见骨架动作数据并赋予用户自建的三维角色。

运动捕捉技术在运动研究和影视 CG 行业，至今已经有了广泛应用和较长的发展历史。在此过程中，大量的人物动作信息被捕捉和记录，形成了庞大的动作数据库。数据算法和动作素材的积累为人工智能学习和生成动画奠定了重要的基础。通过对已有动作数据的学习，AIGC 正在形成根据用户的图文输入来生成高质量三维角色动画的能力。

2. AIGC 对动画骨架数据的识别和利用

1) AIGC 二维姿势识别与 OpenPose

在基于 Stable Diffusion 的角色图片 AI 生成过程中，OpenPose 经常被用来识别和控制生成结果中角色的姿势和表情。它是一种用于实时多人姿态估计的开源库，由卡内基 - 梅隆大学（CMU）的研究团队开发。OpenPose 基于深度学习的计算机视觉算法，能够从图像或视频中识别人体姿态并生成骨架数据。这一技术在运动捕捉和动画生成中具有重要应用。OpenPose 通过卷积神经网络（CNN）检测人体的关键点（如关节），并生成骨架连接图。它能够同时处理多人场景，并具有较高的实时性。OpenPose 支持检测人体的 18 个关键点，还支持手指关键点（21 个点）和面部关键点（70 个点）的检测。这些数据以二维或三维坐标的形式存储，在当前的 AIGC 图片生成平台可以作为 ControlNet 影响输出角色图的姿势、表情。结合批量姿态识别和视频生成功能，OpenPose 也可以指导 AIGC 生成各种不同风格的角色动画，或者对实拍视频进行风格化转绘。如图 1-10 所示为 OpenPose 的动作识别效果。

2) AIGC 三维角色动画典型产品应用

目前 AIGC 用于三维动画与游戏的产品形态大多处于测试发展阶段。在专业性强、流程复杂的角色动作设计领域，AIGC 的介入还处在起步阶段，通常需要依附传统三维动画软件已有的功能模块，来为一些典型的动画生成需求提供智能化解决方案。这些需求一般包括：动作的生成或拼接、智能化视频运动捕捉以及动力学动画辅助等。AIGC 用于角色

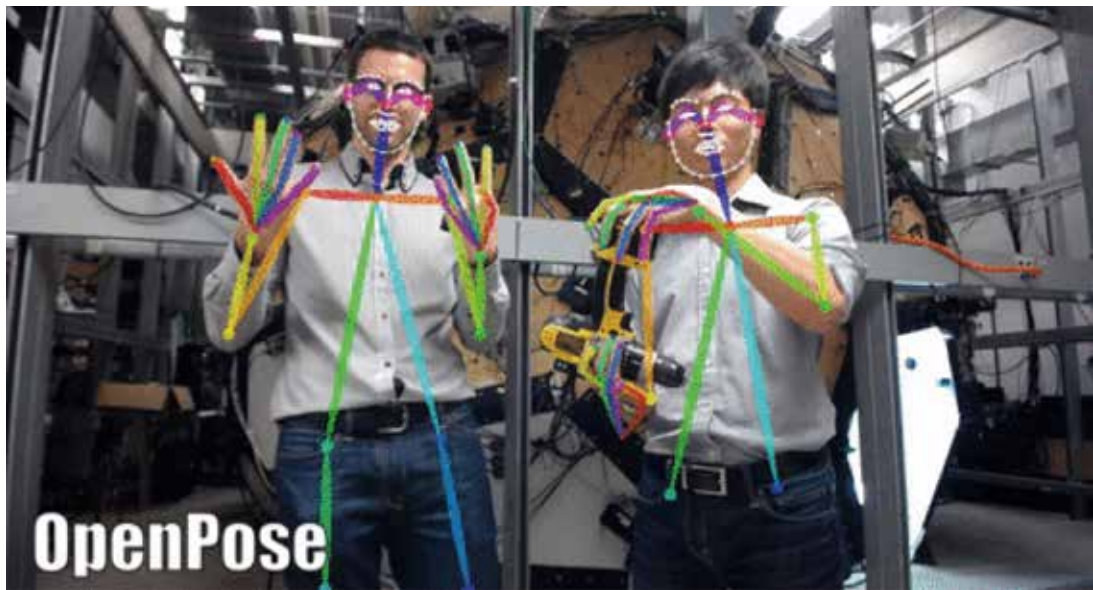


图 1-10
OpenPose 的动作识别效果

动画的产品大多针对上述一至两个需求开发，以线上平台或者三维动画软件的后台插件形式发挥作用。以下是一些相对成熟的产品案例。

(1) DeepMotion: 功能设计最标准的 AIGC 三维动画线上平台。DeepMotion 包含 SayMotion 和 Animate3D 两个模块，分别对应文生动画和视频运动捕捉功能。通过深度学习算法，DeepMotion 既可以从视频中提取动作数据并转化为三维骨架动画，也可以基于对大量动作数据的学习，依据用户输入的文字提示词自动生成角色动画。

(2) Cascadeur: 角色动作动力学模拟动画软件。结合物理模拟和 AI 技术，Cascadeur 可以在已有的粗糙关键帧动画基础上，通过动力学解算输出生动且符合物理规律的角色动作。Cascadeur 最适合制作或修饰奔跑、腾跃、翻滚、攀爬和武术、杂技等复杂动作。这些动作往往难以想象，也不容易找到视频参考。同时，Cascadeur 也可以扩展用于视频运动捕捉。

(3) Rokoko: 廉价惯性运动设备供应商和高性价比运动捕捉方案的提供者。除使用 Rokoko 旗下的惯性运动设备外，它的 AI 运动捕捉系统 Rokoko Vision 可以从单镜头或双镜头拍摄同一角色表演的视频中提取动作数据，并生成适用于三维角色的骨架动画。其技术基于对 OpenPose 等算法的改进，能够实现高精度的运动捕捉。

3. AIGC 用于三维角色动画的技术前景

除了上述提到的 AIGC 用于三维角色动画的产品应用，目前已经出现了很多基于单镜头视频即可获取角色三维骨架运动数据的软件和平台。截至 2025 年年初，AIGC 三维动画技术研发的热点，已开始聚焦由文字提示词直接生成三维角色表演的“文生动画”功能。目前已有不少科研团队分享了阶段性成果，其中不乏中国科研人员的贡献。

例如，加拿大阿尔伯塔大学的国际合作项目 Momask，以及由清华大学和香港中文大