# 葡萄采摘机器人

**1 项目简介**

1.1 项目背景

美国农业部数据显示，2022年全球鲜食葡萄产量约为2741.7万吨，消费量约为2688.4万吨。我国葡萄消费量近年来持续增长，从2013年的788.31万吨稳定增长至2022年的1098.39万吨，期间复合年增长率为3.75%。当前，我国重要的葡萄栽培区主要有7处，分别是环渤海湾地区、长江以南地区、西北地区、长白山产区、黄河中下游地区、西南地区及黄土高原地区。在长江以南地区的浙江，葡萄作为主要水果品种，栽培面积44万亩，产量74万吨，产值达到35亿元。

为保持葡萄产业的可持续发展，应大力推行葡萄绿色生产技术。其中及时、高效、无损采摘葡萄是整个葡萄生产作业过程中最重要的环节，鲜食葡萄季节性强，采摘时间集中，短时间内耗费大量劳动力。数据统计显示，国内葡萄收获仍采用手工采摘，农业生产过程中采摘工作所需的劳动力约占整体的40%，因此采用机器人代替人力劳动是未来农业生产的必然趋势。随着计算机图像处理、物联网、机械设计、控制科学和机器学习的发展，自动化、智能化的采摘机器人将有助于解决劳动力短缺、提高生产效率、保证采摘质量、降低采摘成本、减少安全风险、推动农业科技创新等优势。

1.2 国内外研究现状

葡萄采摘机器人的研究现状与全球果蔬采摘机械发展情况相似，国外在20世纪80年代中期开始在果蔬采摘领域展开广泛研究，不仅提高了采摘的自动化程度，还改善了采摘效率和质量。经过多年的研究与发展，国外果蔬采摘机械化程度不断提高，试制成功了多种自动化程度较高的果蔬采摘机器人，如苹果、柑橘、葡萄、草莓、茄子、番茄和黄瓜采摘机器人等，使果蔬采摘质量与采摘效率得到明显提升，这些成功案例表明机器人可以在农业领域发挥重要作用。尽管国外果蔬采摘机械已经达到较高水平，但由于技术复杂性和市场需求的多样性，商业化仍存在一定挑战。

近年来，国内经济水平的增长和劳动力成本的上升推动着农业机器人的发展。随着技术的进步，农业机器人可以在耕作、喷药、施肥和采摘等农业生产环节代替人工，降低了劳动强度，提高了作业效率。果蔬采摘机械领域的研究虽然始于20世纪90年代，但近年来取得了显著进展。物联网、人工智能和机器人技术水平的提升，促使国内在果蔬采摘机械领域加快创新步伐，取得了一些令人瞩目的成果，农业机器人有望进一步蓬勃发展。劳动力短缺和农业现代化的需求将成为农业采摘机器人广泛应用的驱动因素。然而，实现真正的商业化仍需要解决技术稳定性差、成本效益低以及与现有农业实践的融合差等问题。随着农业机器人技术的不断突破，葡萄采摘机器人也有望在这一大趋势下取得更进一步的发展和应用。然而，与国外相比，国内葡萄采摘机器人在商业化方面尚处于起步阶段。

**2 葡萄采摘机器人市场调研**

2.1 葡萄采摘机器人技术研发进度及产业化程度

在农业机器人领域，日本、美国和欧洲国家针对大规模种植的水果，如苹果、柑橘、草莓等投入大量研究和投资，已取得技术研发进展。例如，在苹果采摘中，通过视觉技术识别成熟苹果，使用机械臂进行采摘，并实现对不同果实形状和颜色的识别，提高精准度。类似地，柑橘采摘机器人的机械臂能定位到目标果实，进行精确采摘，同时避免损坏。尽管国外在水果采摘机器人方面取得重要进展，仍需应对复杂果实形态、颜色辨识和机器人与环境互动等挑战。这些研发成果有望解决水果采摘中的劳动力成本和效率问题。不过，葡萄采摘机器人技术相对较初级，实际产业化程度尚不高。

在国内，农业科技领域的创新正在积极推进，但相对于其他领域，葡萄采摘机器人的研发相对较少。一些农业机器人公司、农业科研机构和高等院校正在进行相关研究，例如，江苏大学研发的篱架葡萄采摘机器人和棚架葡萄双臂采摘机器人在葡萄园完全自然条件下，棚架葡萄双臂采摘机器人达到成功率≥96%、损伤率≤0.5%、效率超过600串/小时的采收性能，实现了葡萄的机器人高效无损采摘理论与技术的重要突破。杭州自动化技术研究院研发的葡萄采摘机器人已在浦江县靓松、圣炫、大潘等3个农场试用。尽管有一些研究项目和试验性产品，但大规模产业还需要克服许多挑战，这些挑战包括技术难题、成本问题、与现有农业实践的融合等。葡萄采摘的复杂性也使得机器人的设计和操作相对复杂，从而影响了产业化进程。

截至目前，尚未出现明确的国际或国内龙头企业在葡萄采摘机器人领域取得了显著的技术突破和产业化成功。然而，随着农业科技的进一步发展和投资的增加，葡萄采摘机器人领域会迎来更多创新和进步，进一步推动葡萄采摘机器人的产业化进程。

2.2 葡萄采摘机器市场及前景

目前，葡萄采摘机器人的研发相对较少，但在果蔬采摘机械化方面，Agrobot（西班牙）和Octinion（比利时）等公司在草莓采摘机器人方面有一定研发成果。这些机器人采用了视觉和机械操作来实现自动采摘，具有一定的精准性和效率。然而，这些公司的产品大都处于试验阶段，产业化程度相对较低，尚未大规模商业化，还未取得广泛市场份额。

国内，葡萄采摘机器人的市场已经在一些农业发达地区开始出现。根据国家统计局数据，2013至2022年，中国葡萄产量逐年攀升，2022年中国葡种植面积1089.45万亩，葡萄产量增长至1544.65万吨，同比上升3%。总体上，葡萄采摘机器人整体市场规模相对较大，但市场占有率尚未形成明确的领导者。因此，葡萄采摘机器人市场前景广阔，具有良好的发展潜力。主要包含以下几方面的市场前景：

劳动力短缺驱动市场需求：随着劳动力成本的不断上升，葡萄采摘领域面临着严重的劳动力短缺问题。机器人能够有效解决这一问题，提供高效且可靠的自动化采摘解决方案。

效率提升和成本降低：葡萄采摘机器人能够以更快的速度和一致的质量完成采摘任务，从而提高产量和生产效率。虽然初始投资较高，但长期来看，机器人的使用可以降低劳动力成本、提高产量，降低总体成本。

精细化农业管理：葡萄采摘机器人可以配备各种传感器和数据收集装置，实现对葡萄园的精细化管理，可以更好地监测葡萄的生长状态、成熟度和健康状况，有助于农场主做出更准确的决策。

适应气候变化：气候变化可能对农作物的生长季节和产量造成影响，机器人不受季节变化和气候波动的影响，可以在不同环境条件下工作。

技术创新的推动：葡萄采摘机器人的研发和应用需要涵盖机械设计、自动化技术、人工智能等多个领域。这种技术创新不仅有助于农业科技的发展，还为其他领域的机器人应用提供了经验和技术支持。

可持续发展需求：在现代社会，可持续农业和环保意识日益增强。葡萄采摘机器人的使用可以减少化学农药的使用和人工劳动对环境的影响，从而推动农业向更可持续的方向发展。

综上所述，葡萄采摘机器人市场具备广阔的前景和巨大的发展潜力。随着技术的不断创新和完善，机器人的性能将逐步提升，解决方案更加智能和适应不同葡萄品种。随着农业自动化的不断推进，葡萄采摘机器人将成为农业生产中不可或缺的重要组成部分。

2.3 政策扶持

2019年以来，国家发布了《数字乡村发展战略纲要》《数字乡村发展行动计划（2022—2025年）》等一系列政策文件，对全国数字乡村、数字农业工作做出了重要部署。二十大报告明确指出：“加快建设农业强国，扎实推动乡村产业、人才、文化、生态、组织振兴。”这是“加快建设农业强国”要求第一次被写入党的全国代表大会报告，对推进农业现代化具有重大战略意义。并且，随着“中国制造2025”的实施，国家已经全面推行制造强国战略，而农机装备作为一个重要领域，发展高端农业机器人装备是当前及以后相当长一段时间的一项重要任务。

1. **项目亮点及定位**

3.1 基于多模态混合异构信号融合的机器人实时环境感知导航

实时环境感知导航是水果采摘机器人实现精准定位、路径规划及避障等关键任务的基础，为机器人的自主移动和高效采摘提供了必要的支持。尽管目前高性能视觉、激光及惯性系统等导航定位技术已在室外城市环境和室内结构化场景中得到充分验证和应用，但在农业环境下，依然面临着以下技术难点：

* 农业环境视觉感知难度大：果园环境具有高度相似的植被纹理、不断变化的光照条件以及非结构化的动态农作物等特点，使基于视觉里程计的感知手段难以实现精准、鲁棒的导航定位；
* 农业环境地形复杂：果园及农田环境存在地面崎岖、起伏或特殊的山地高度变化区域，复杂的地形环境不仅会产生随机颠簸扰动而影响惯性计的数据精度，更存在因山地坡度较大而增大GPS定位误差的情况；
* 导航决策的鲁棒性较弱：在复杂农业环境中解决定位误差和漂移问题是实现鲁棒导航决策的一大难点。由于环境的多样性和变化性，传感器数据的噪声和不确定性因素会使导航定位产生严重偏差，并随着时间推移而累积。

因此，现阶段水果采摘机器人领域的样机开发和相关研究仍受感知精度和导航性能的制约，作业过程无法脱离“人在环”，虽已实现理想环境下的长距离直线作业，但对于复杂平面作业区域，仍需人员协同跟进，手动遥控切换机器人行进方向。在国内外技术调研中，尚未出现全自主的成熟采摘机器人导航定位方案。针对上述问题，本项目旨在提高真实农业环境下采摘机器人感知导航的自主性和可靠性，通过多传感器融合、混合异构信号感知和时钟同步与异步处理等技术的研发，解决了现阶段果园作业中人工依赖和导航失效等问题，实现了灵活可扩展的采摘机器人实时环境感知和导航系统解决方案。本项目具备以下技术特点：

* **基于模块化开放式架构的多传感器融合技术**。本项目建立了开放式传感器感知融合架构，设计了模块化、可移植、可扩展的通用传感器融合接口，便于根据应用需求，引入先进感知手段或移除冗余传感设备，以提供灵活、高效和低成本的系统化解决方案；
* **多模态混合异构信号集中化感知技术**。本项目研究并完善了多传感器融合导航算法，具备集中化实时采集GPS/GNSS/GIS全球定位导航系统、视觉传感器、IMU惯性测量单元、激光雷达及车轮编码器等多模态感知数据的能力；提出了混合异构信号融合与感知增强策略，充分发挥不同传感技术的优势以弥补单一感知手段在特殊条件下的局限性，有效抑制了导航过程中的定位漂移和累积误差，降低了现有方案在农业环境中出现全球定位失锁、视觉跟踪失败、惯导测量失效等异常状态对导航定位的影响；
* **多类型感知信号的实时时钟同步与异步处理技术**。本项目针对不同传感器的多模式、多状态数据，利用实时时钟同步技术确保所采集信号保持高度的时间对齐性，并基于异步处理技术应对传感器时间戳不对齐、通信延迟及传输中断等情况，以保障为导航分析与决策提供准确可靠的感知信息。

3.2 基于数据驱动的智能识别模型在线优化更新

水果采摘机器人的视觉系统除提供导航信息外，还用于完成果实图像集采与目标识别等工作，以为机械手后续采摘作业提供明确的目标对象和三维信息，其核心难点在于果实目标的精准识别。近年来国内外大量基于深度学习的果实识别与检测方法取得了较大研究进展，网络性能和检测效率不断提高，然而在面向真实自然环境和实际推广中，现有方法依然面临以下技术难点：

* 自然环境下的果实识别鲁棒性不足：野外采摘过程中，果实状态存在光照阴影变化、植被遮挡和动态震荡等多种干扰，多变的环境因素对果实识别的准确度产生负面影响；
* 识别模型通用性差：大多数研究开发的识别模型仅针对一种类型或一类形状的果实，作业对象单一，适用范围受限。
* 样本数据不足问题：训练数据缺乏多样性，果实类型和样本数量有限，获得大规模样本数据成本极大，现有果实识别模型缺乏小样本学习能力和泛化性；

因此，由于模型识别能力的限制，现有的水果采摘机器人在采摘评估实验中，普遍存在采摘成功率较低、果实大量漏摘的情况，需要人工进行二次补摘，作业效率甚至低于人工采摘速度，模型识别效率和准确率严重阻碍了相关研究的落地推广。针对上述问题，本项目旨在提高水果采摘机器人在真实自然环境下的果实识别鲁棒性和作业效率，通过引入多模态视觉信息融合、增量学习、小样本学习和模型优化等技术，建立了一套基于数据驱动的识别模型在线优化更新方案，解决了现有方法面临的鲁棒性不足、通用性较差和样本数据缺乏等难题，实现了自然采摘环境下果实作业对象的精准识别。本项目具备以下技术特点：

* **基于多模态视觉信息融合的数据增量学习技术**。本项目引入RGB、深度及累积多视角重构等多模态视觉感知信息，所构建的识别模型充分提取和融合不同模态的高维特征，有效提高了多样化自然环境中的识别鲁棒性。同时，系统具备主动接收输入数据流和交互式样本选择的能力，通过有效样本的持续累积和模型动态更新，进一步提高模型的识别性能。
* **基于元学习和生成对抗策略的小样本学习技术**。区别于现有针对单一任务学习的技术方案，本项目结合元学习模型，从多类识别任务中训练模型学习适应新任务的模式和策略，使机器人具备应用已有知识和经验解决新类型果实任务的能力。同时，引入生成对抗策略扩展小样本数据覆盖范围，进一步增强了模型的泛化能力。
* **基于网络重构和轻量化的模型迭代优化技术**。由于训练数据动态增量累积，本项目提出了周期性网络重构技术方案，根据任务规模和输入数据特征，自适应调整模型结构大小，优化网络深度和宽度，避免出现过拟合或参数通道冗余等问题。同时，引入模型轻量化技术，进一步精简网络参量，以提高模型推理速度并提升部署质量。

3.3 基于冗余关节驱动的机械臂自主柔顺采摘与灵巧作业

机械臂作为水果采摘机器人的核心执行机构，其性能优劣直接影响到采摘效率、质量和安全性。尽管现有水果采摘机械臂已有大量研究，但大都停留在样机和实验阶段，其主要存在的技术难点如下：

* 机械臂工作空间限制：现有机械臂结构普遍针对单一采摘任务设计，设计方案决定了采摘作业中的有效工作空间。而实际果树的高度和冠层大小不同，不同种类作物之间更存在较大差异，工作空间不足增加了人工二次采摘成本，未充分考虑多种扩展需求制约了采摘机器人的实际使用率和应用范围；
* 机械臂灵活度差：现有采摘机器人多为包含回转或直线运动的三自由度结构或六自由度关节型结构，虽然结构紧凑且易于控制，但有限的自由度限制了机械臂的灵巧工作空间和灵活度，使避障和采摘受阻挡果实等复杂作业困难；
* 机械臂柔顺性差：现有采摘机械手通常采用刚性末端执行器，虽可采用凝胶、硅胶等软体材料作为被动保护措施，但对于采摘葡萄一类的柔软果实，仍然存在切断果柄冲击损伤果实的情况，缺乏柔顺采摘作业的主动保护方案。

因此，现阶段所设计的采摘机械臂大都结构单一、专用性强，设计要素无法覆盖不同果实的多样化作业空间和采摘需求，同时灵活性和柔顺性较差，无法达到人工采摘水平，导致采摘成本高，难以商业化。针对上述问题，本项目采用多冗余关节机器臂，通过研究变构型姿态优化、力反馈控制和柔性末端执行器设计等关键技术，建立了一套自主柔顺采摘与灵巧作业方案，有效提高了采摘机械臂的灵活性、柔顺性和通用性，显著降低了采摘过程中的果实损伤率，促进了低成本一机多用的落地推广。本项目具备以下技术特点：

* **基于多冗余关节机器臂的自适应变构型采摘姿态优化**。为了充分发挥冗余采摘机器人的作业灵活性并降低运动规划难度，本项目提出了一种自适应构型姿态调节算法，面向机械臂采摘效率与当前环境采摘需求，通过自主锁定特定冗余关节调节最优构型配置，提高了机械臂对复杂环境适应能力，实现同一设备适用多样化环境的高效采摘任务。
* **基于自适应变阻抗策略的机械臂柔顺控制**。本项目的多关节冗余机械臂具备关节力矩传感器和末端执行器触觉压力传感器，根据作业过程中的力反馈信息，采用自适应变阻抗控制策略，实时跟踪机械臂与目标之间的力/位置动态关系，调节机械臂力矩输出，以根据采摘任务需求和果实特性，自主优化机械臂柔顺性。
* **多用途柔性末端执行器设计**：现有采摘末端执行器大都仅适用于单一外形果实，需要更换末端执行器以应对体积差异较大的果实，缺乏通用性且成本较高。为此，本项目采用柔性材料设计了通用采摘末端执行器，可根据不同果实特征自适应改变夹持形态，以提供更好的抓握能力和稳定性，并结合触觉压力反馈，有效降低果实损伤率，可推广至多类水果采摘作业。

3.4 产业外延和未来展望

葡萄采摘机器人是农业领域中的一项创新技术，旨在自动化和提高葡萄采摘的效率。随着科技的不断发展，农业也在逐步引入各种智能化设备来增加生产效率，减少劳动力成本，以及优化作物的生长和采收过程。一下是关于葡萄采摘机器人产业的外延和未来展望：

**产业外延：**

**推进农业自动化：**葡萄采摘机器人是自动化农业的一个重要组成部分。随着人工智能、机器视觉和机器人技术的进步，将更多的农作物采摘过程自动化，有望提高生产效率，减少对季节性劳动力的依赖。

**提供智能农业解决方案：**葡萄采摘机器将整合先进的传感器、摄像头、数据分析等技术，从而实现更智能化的农业管理。这些技术可以监测作物的生长情况、病虫害情况等，帮助农民做出更准确的决策。

**辅助数据驱动的农业决策：**葡萄采摘机器人在操作过程中会收集大量数据，包括果实大小、成熟度等信息，帮助农民更好地了解作物的生长情况，从而优化施肥、灌溉和采摘策略。

**未来展望：**

**提高生产效率：**随着机器人技术的不断进步，未来的葡萄采摘机器人将更加高效，能够在短时间内完成大量采摘任务。这将有助于减少作业时间，提高葡萄的采收量。

**降低劳动力成本：**农业劳动力短缺是一个全球性的问题，特别是在繁忙的采摘季节。葡萄采摘机器人可以减轻农民的劳动压力，降低劳动力成本，从而增加农业的可持续性。

**精准采摘技术：**未来的机器人会更加精准地判断果实的成熟度和采摘时机，从而减少误摘和未摘的情况，提高采摘质量。

**多功能性和多样化应用：**除了采摘，机器人还能在果园中执行病虫害监测、施肥、除草等任务，这将使机器人在农业管理的不同方面发挥作用。

**环境友好型设计：**未来的葡萄采摘机器会更加注重环境友好型设计，减少能源消耗和对土壤的损害，促进可持续农业发展。

总的来说，葡萄采摘机器人的产业外延和未来展望将紧密与自动化、智能化和数据化趋势相结合。这将有助于推动农业向更高效、可持续和创新的方向发展。