



农业机器人现状与展望

赵春江

中国工程院

院士

国家农业信息化工程技术研究中心

主任

中国人工智能学会

副理事长

国家新一代人工智能战略咨询委员会

委员

zhaocj@nercita.org.cn



报告内容

- 一、农业机器人产业需求背景
- 二、典型农业机器人与关键技术
- 三、农业机器人发展展望



一、农业机器人产业需求背景

社会原因-以草莓采摘为例

当前草莓采摘高度依赖于人工，西方劳动力严重缺乏、不稳定且成本高昂。



传统大田垄式草莓采摘



借助运输车人工采摘



英国现代化高架草莓温室大棚



高架草莓采摘工与运输车

西方劳动力缺乏：

- 严重依赖季节性工人
- 西欧主要来自东欧国家

采摘人工成本高昂：

- 挪威采摘工约：120元/时
- 英国采摘工约：80元/时

季节性采摘工来源不稳定：

- Covid 19 期间非常不稳定，严重影响生产



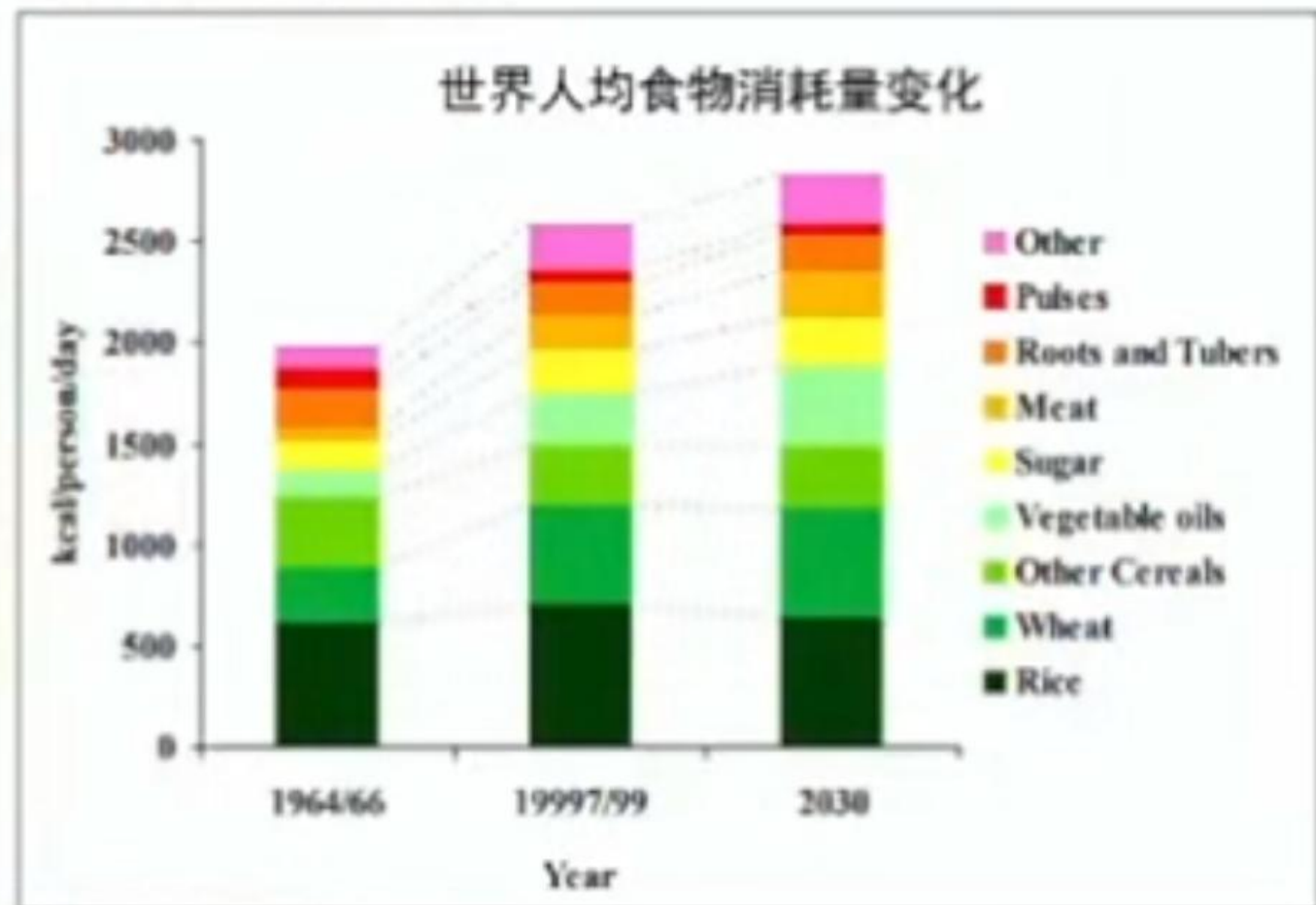
疫情导致季节工缺乏，挪威农场主夜不能寐

1.2 农业生产效率急需提高

根据联合国粮食及农业组织 (FAO) 的测算，到2050年，世界需要增加60%的食物生产来满足93亿的全球人口需求。这要求农民在相同的土地上更精确、高效地生产食物，并减少环境影响以实现可持续性。



来源：联合国2007

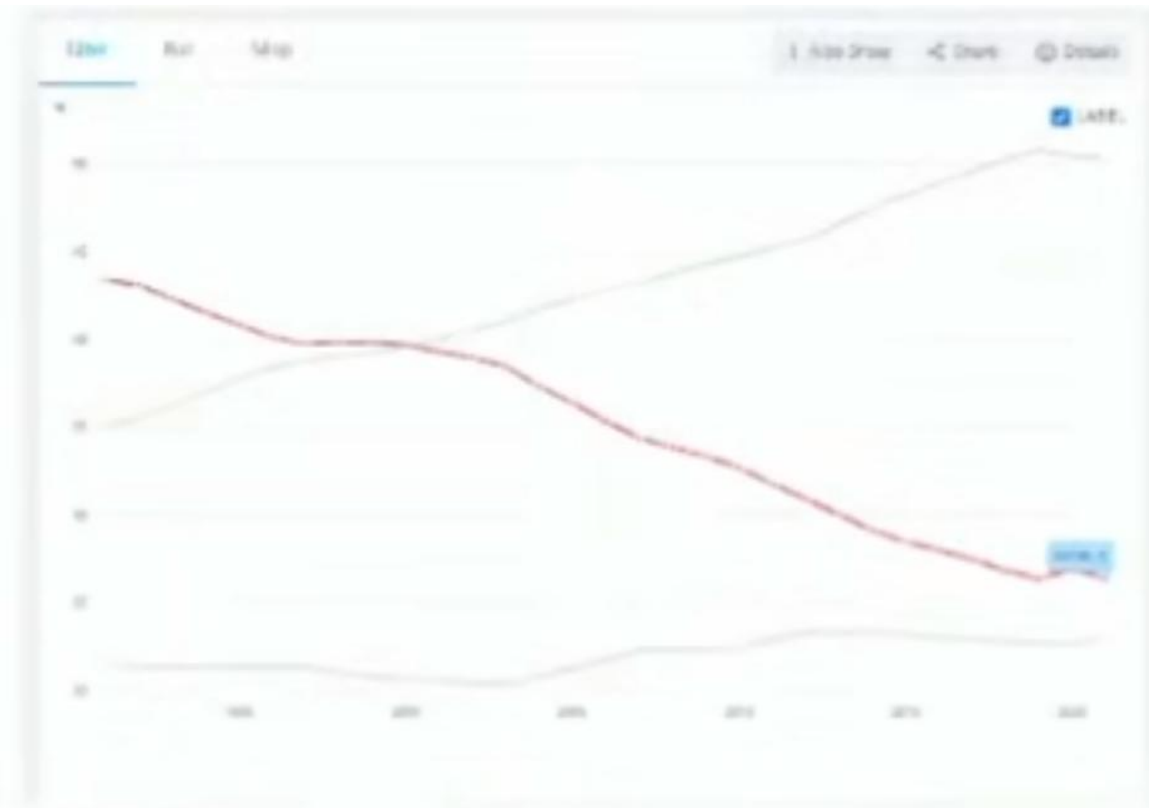


来源：FAO, 2002

农业机器人等智慧农业技术能在恰当的时间和恰当的地点为每株植物提供恰当种类和数量的输入物，例如化肥、水和农药，不仅能提高农产品的产量和质量，还能改善水和化学品等资源的使用效率。

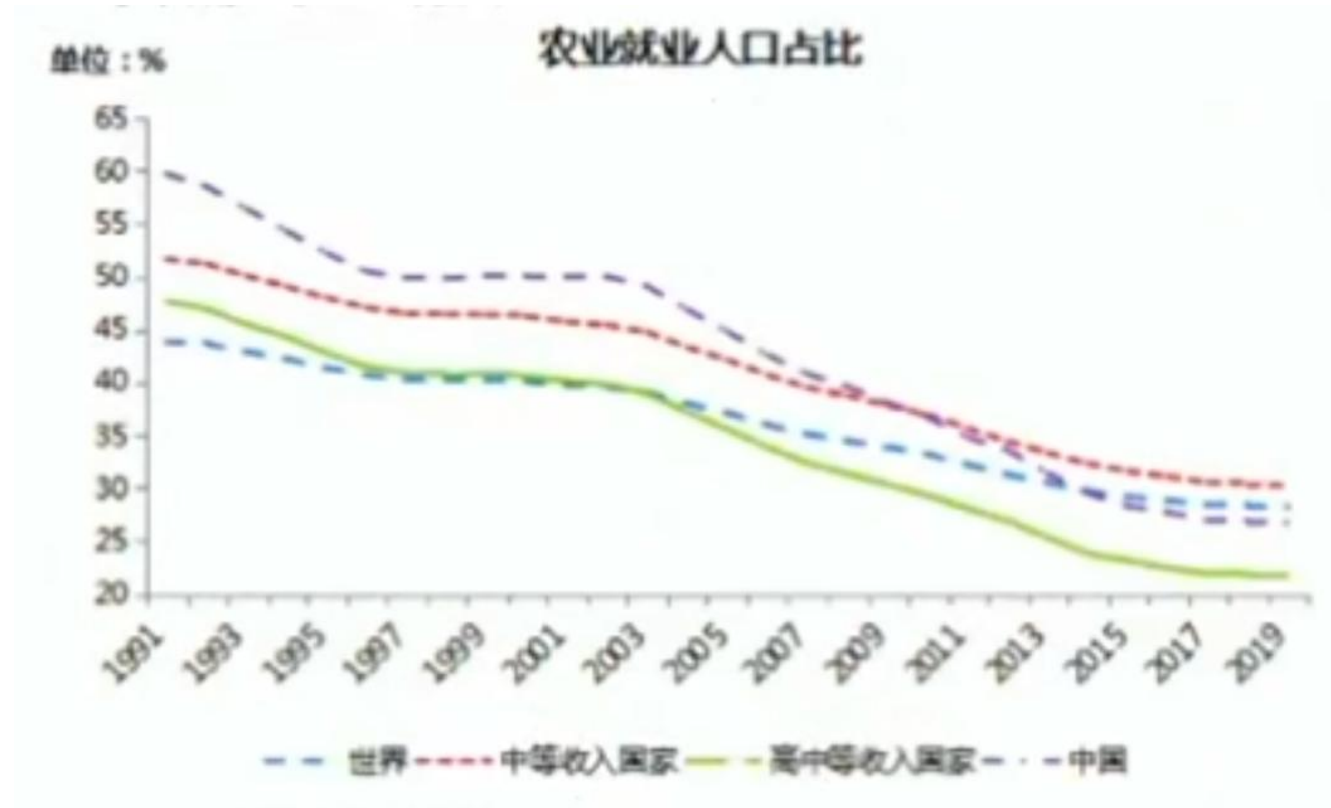
1.3 农业劳动力短缺日趋严重

世界农业劳动力占比已从1991年的44%将至2021年的26%



来源：国际劳工组织ILO,2021

中国农业劳动力也在城镇化进程下加速减少，“十三五”时期平均每年减少约1300万人



来源：布瑞克农业数据，2020

不仅如此，中国农业生产还面临农业劳动力老龄化的问题。2017年中国农业劳动力的平均年龄为53.3岁；55岁及以上农业劳动力的占比从1996年第一次农业普查时的12.7%上升到2016年第三次农业普查时的33.6%，增幅达165%。

未来如果没有能够替代人工作业的高端农业装备，我们很可能面临“无人耕种、天价食品”的窘境。

2.1 农业机械的发展历程与机器人诞生



2.1 农业机械的发展历程与机器人诞生

■ 技术变革推动社会生产力发展

- 从原始社会到智能社会，伴随着人类对美好生活的需求，在技术的变革推动下，社会生产力得到了飞速发展
 - 技术能够丰富生产资料的来源和利用方式，创造和改良生产工具
 - 生产力从以人为核心向以技术为核心演进
 - 在智能时代，AI将成为社会发展的新质生产力



2.3 定义与基本组成

农业机器人：替代人工作业的高端智能农业机器。



特点：农业非结构化环境，导致比工业机器人更加复杂。



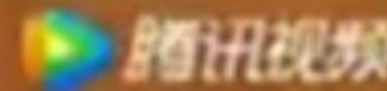
来源：由提示词驱动ChatGPT 4o生成，熊亚，2024

基于AI的大型农业机器人



智能装备特性

智能 精准 高效



Headland Setup

Width	# Sides
27.43 (m)	All

Accept Cancel

Speed (GPS) 0.0 km/h

Ridge 0 cm

Area 0.00 ha

Work Control Off

Headland

No Smooth Auto

All Field Types

x3 Edit: X. Liu

农业机器人发展



- **农业机器人**，面向农业场景可精准感知、自主决策、智能控制、自动执行
- 与传统农机相比，可自主从事复杂劳作任务，**服务无人智慧农场**



Hands Free Hectare (HFHa), 2016
Harper Adams University · UK



二、典型农业机器人与关键技术

3.1 巡检、作物表型、放牧机器人



巡检机器人，中国国家智能农业装备工程技术研究中心，2021



作物表型机器人，美国伊利诺伊大学香槟分校，2017



作物表型机器人，德国波恩大学，2021



放牧机器人，澳大利亚悉尼大学，2016

3.1 巡检、作物表型、放牧机器人

关键技术： 农业机器人移动平台、机器人导航、作物表型分析、路径规划、智能决策、物联网等。



来源：挪威生命科学大学，2018

主要技术：

1. 模块化轻量化设计
2. 高机动性设计：原地转弯
3. 高抗震性设计
4. 姿态控制



来源：熊亚等，2022

主要技术：

1. 大田卫星导航
2. 基于激光雷达或视觉的即时定位与地图构建 (SLAM)
3. 多源传感器融合
4. 路径规划与循迹导航



来源：德国波恩大学，2021

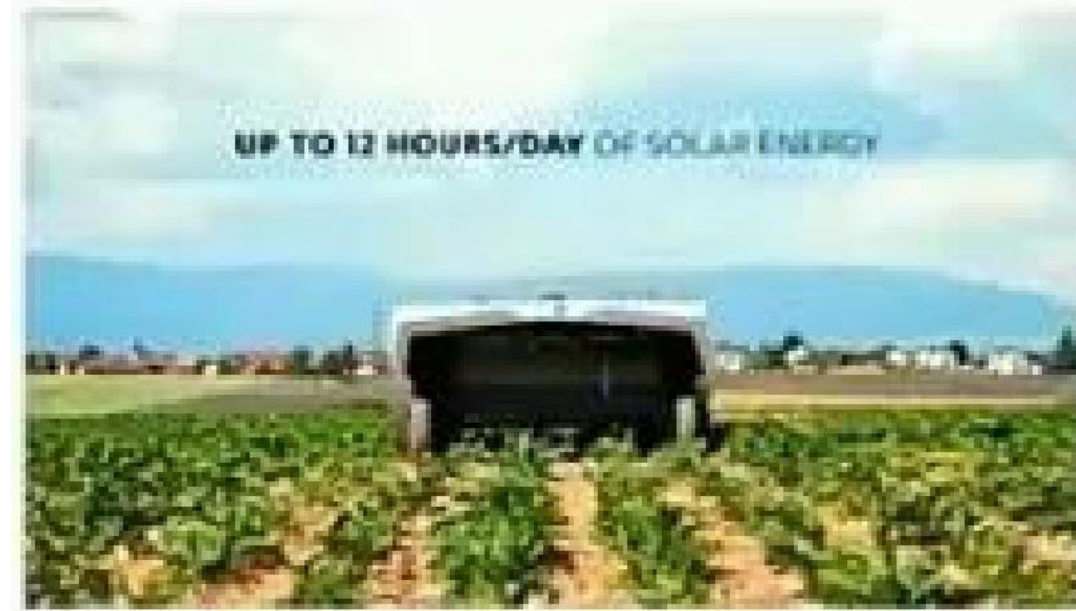
主要技术：

1. 作物识别与跟踪
2. 三维重建
3. 结构分析

3.2 对靶施药、施肥机器人



喷药机器人，中国国家智能农业装备工程技术研究中心，2021



对靶施药机器人，瑞士ecoRobotix公司，2020



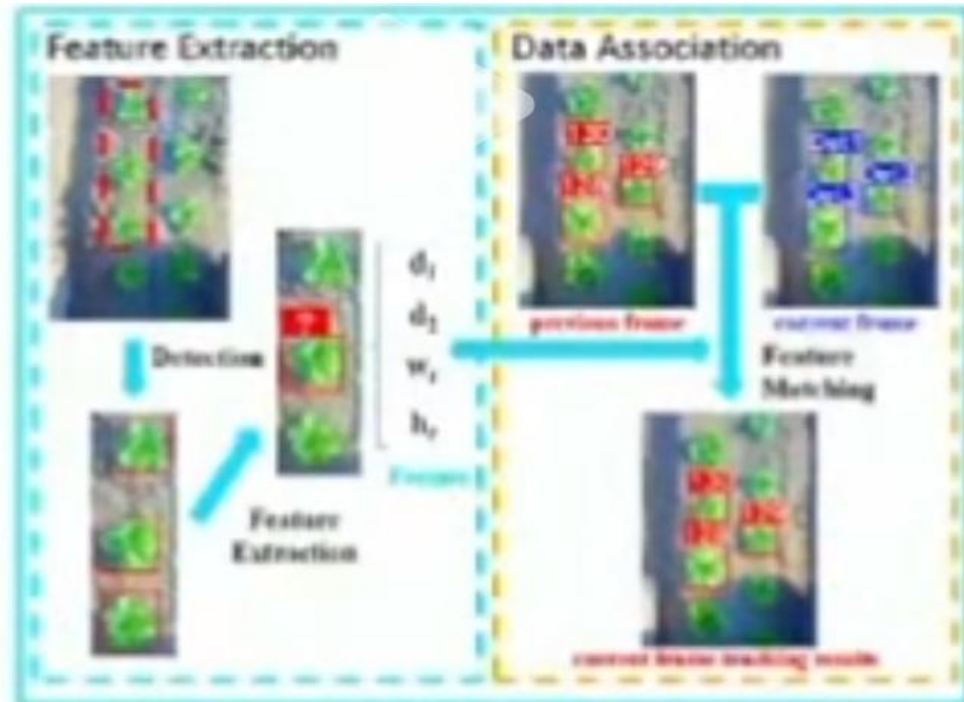
对靶施药机器人，中国农业大学，2021



精准定点施药机器人，悉尼大学，2015

3.2 对靶施药、施肥机器人

关键技术： 农业机器人移动平台、机器人**对行导航**、**作物检测**、**对靶控制**、路径规划、智能决策、物联网等。



来源：Hu 等，中国农业大学，2022

主要技术：

1. 目标识别
2. 目标跟踪
3. 大小预测



来源：Zhao 等，聊城大学，2020

主要技术：

1. 喷嘴设计
2. 雾化控制
3. 动态补偿

3.3 精准除草机器人



精准机械锄除草机器人，悉尼大学&Agrris公司，2020



精准机械抓取除草机器人，荷兰Odd. Bot公司，2023



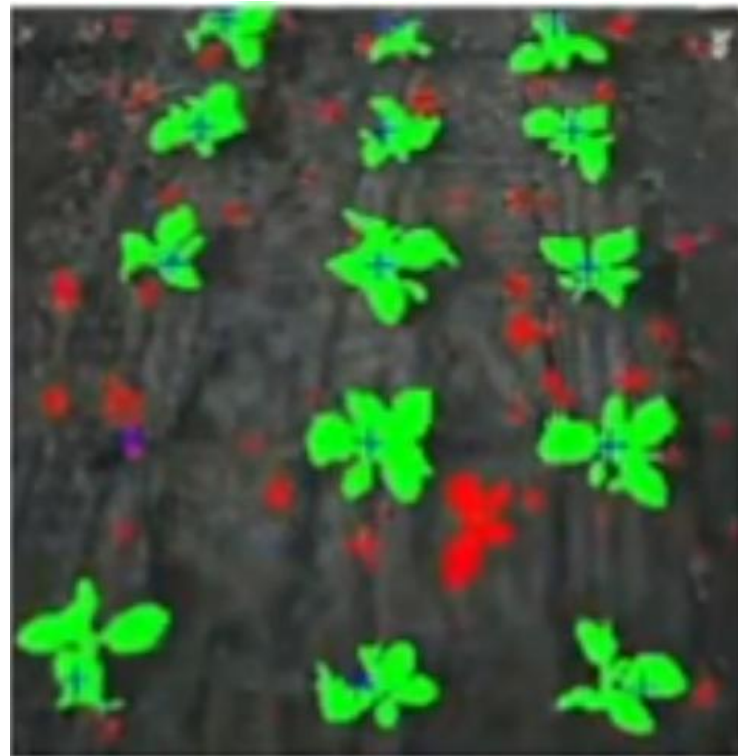
精准喷药除草机器人，璃士ecoRobotix公司，2019



精准激光除草机器人，美国Carbon robotics公司，2022

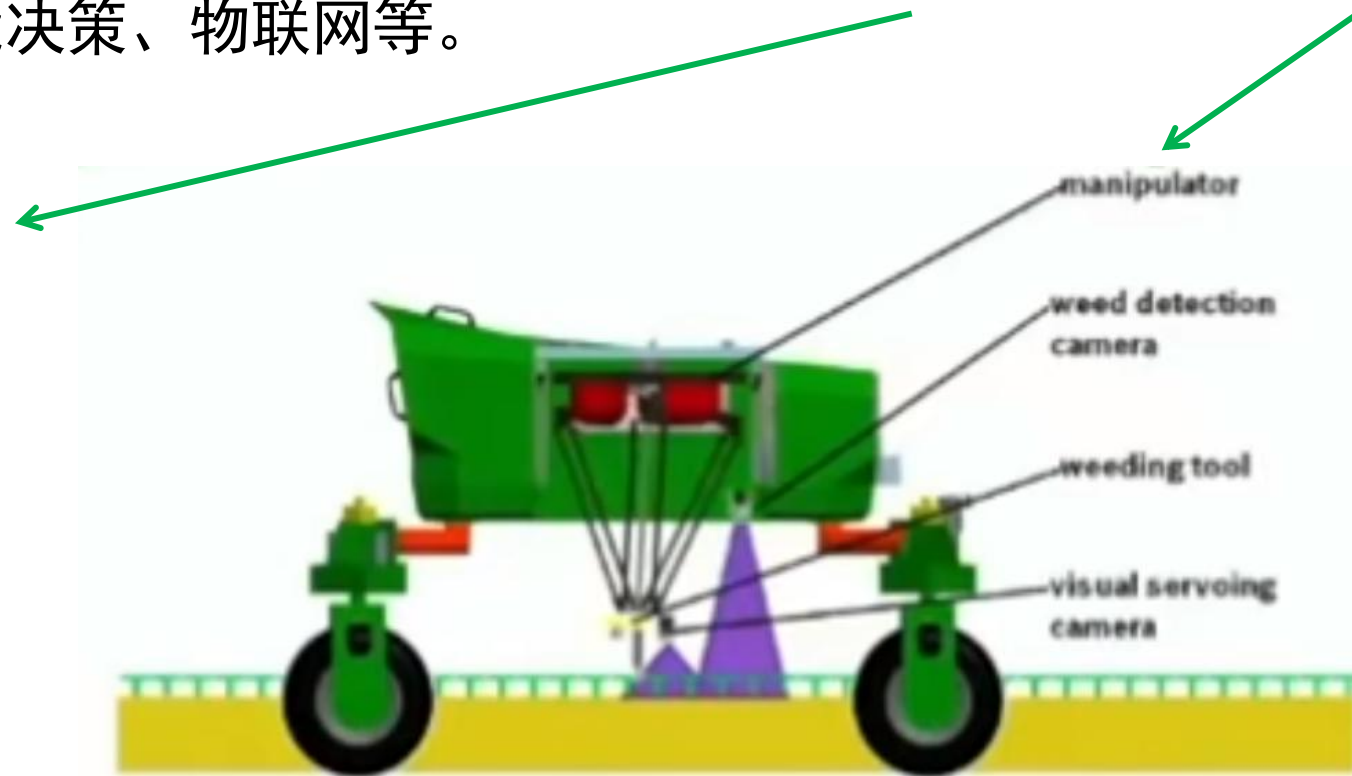
3.3 精准除草机器人

关键技术： 农业机器人移动平台、机器人对行导航、**大数据、杂草与作物检测、执行器设计、视觉伺服、路径规划、智能决策、物联网等。**



来源：西澳大利亚大学，2015

- 主要技术：**
1. 目标识别
 2. 目标跟踪
 3. 形状补偿



来源：Zhoo等，聊城大学，2020

- 主要技术：**
1. 末端执行器设计
 2. 机械臂设计
 3. 机电一体化

- 主要技术：**
1. 机械臂控制
 2. 路径规划
 3. 动态补偿(机器人移动、目标动)

3.4 剪枝机器人



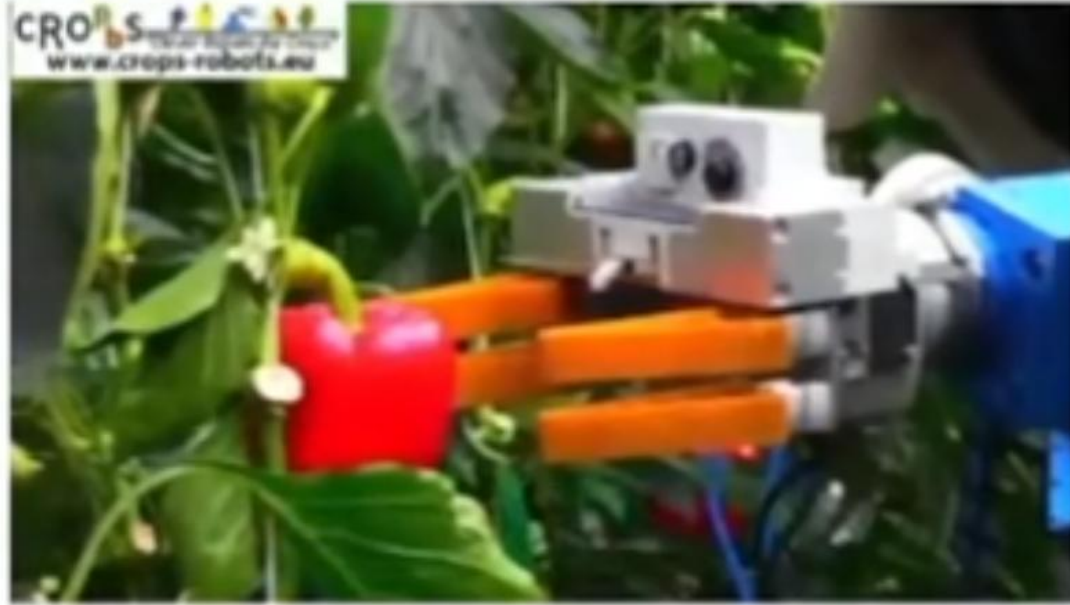
葡萄园剪枝机器人，美国Vision Robotics公司，2009



西红柿剪枝机器人，荷兰Priva 公司，2021

3.5 果蔬采摘机器人

青椒采摘



青椒采摘机器人，荷兰瓦赫宁根大学，2015



青椒采摘机器人，荷兰瓦赫宁根大学&以色列本古里安大学，2020



青椒采摘机器人，澳洲昆士兰大学，2020



青椒采摘机器人，日本Agrist大学，2023

3.5 果蔬采摘机器人

西红柿采摘



西红柿串采机器人，以色列MetoMotion公司，2021



西红柿单采机器人，以色列Root AI公司，2020

3.5 果蔬采摘机器人

苹果采摘



苹果采摘机器人，美国Abundant robotics公司，2017



苹果采摘机器人，以色列FFR Robotics公司，2021



苹果采摘机器人，以色列Tevel Tech公司，2021



苹果采摘机器人，中国国家智能农业装备工程技术研究中心，2022

3.5 果蔬采摘机器人

草莓采摘



草莓采摘机器人，西班牙Agrobot公司，2019



草莓采摘机器人，比利时Octinion公司，2019



草莓采摘机器人，美国Advanced Farm公司，2021



草莓采摘机器人，挪威生命科学大学，2022

3.5 果蔬采摘机器人



来源：Root AI, 2020



来源：澳洲昆士兰大学, 2020

3.6 团队正在研发的果蔬采摘机器人



1. 采收一体式番茄串采机器人



番茄采摘机器人，李亚军、冯青春等

3.6 团队正在研发的果蔬采摘机器人

2. 采收一体式草莓采摘机器人



多源视觉感知融合
(授权发明1件)

果框轮换机构
(申请专利1件)

换电管理系统
(组合申请专利1件)

软硬一体机械手
(申请专利1件、
授权发明1件)

视觉-激光雷达融
合导航

混联机械臂
(授权发明2件，
发表顶会1篇)

四轮独驱独转移动
平台(申请专利1件)

特点：

- ① 完全独立产权(核心部件均已申请专利)、纯自主研发
- ② 混联机械臂操作空间大、能折叠越障、能在移动时保持末端姿态不变
- ③ 柔性折断式机械手损伤低、容错高
- ④ 视觉-激光雷达融合导航温室环境下精度高
- ⑤ 换电系统电池热插拔,保证不间断作业

草莓采摘机器人, 熊亚等

3.6 团队正在研发的果蔬采摘机器人



2. 采收一体式草莓采摘机器人

会“劈叉”的混联多自由度机械臂

草莓采摘机器人初步测试



- ① 操作空间是同等大小的串联机械臂UR3的3倍、并联机械臂IRB360的14倍
- ② 能劈叉后降低本体以避免高处障碍物(大棚里的横梁、种植槽等)
- ③ 能在机器人移动时保持末端姿态不变

草莓采摘机器人初步测试



草莓采摘机器人初步测试

特点:

- 完全独立产权、自主研发
- 混联机械臂操作空间大
- 柔性折断式机械手损伤低



机械手方案2:多自由柔性手



混联多自由度机械臂



已授权2项发明专利



三、农业机器人发展展望

1、全球农业机器人产业化现状

问题：为什么机器人已经广泛应用于工厂流水线却没有从事于果蔬采摘？

已经产业化的农业机器人：

1. 农业机器人移动平台：

- Thorvald — Saga Robotics(挪威)
- Ted, Dino, Oz — Naio Technologies(法国)
- BoniRob — BOSCH(德国)
- Amiga — Farm-NG(美国)

2. 对靶施药机器人：

- Ara — Ecorobotix(瑞士)
- Qii-Jet — Bogaerts(比利时)
- Solix — Solinftec(美国)

3. UV-C病虫害防控机器人：

- Thorvald — Saga Robotics(挪威)

接近产业化的农业机器人：

1. 精准除草机器人：

- Blue River Technology(美国)
- Carbon Robotics(美国)
- Ecorobotix(瑞士)
- Nexus(加拿大)

2. 果园运输机器人：

- Buro(美国)

3. 棉花打顶机器人：

- 维尔科技(中国)



芯片设计比开发草莓采摘机器人容易得多！

“I used to work in the semiconductor industry. I was a development engineer for Intel, and it was a lot easier to make semiconductor chips.”

Bob Pitzer, 美国Harvest CROO机器人公司创始人

离产业化还有较大距离的农业机器人：

1. 果蔬采摘机器人：

- 草莓 — Agrobot (西班牙)、DogTooth (英国)、Octinion (比利时)、Advanced Fams(美国)、Tortuga AgTech
- 苹果 — Tevel(以色列)、Advanced Farms(美国)、FFR Robotics (以色列)、Ripe Robotics(澳大利亚)
- 西红柿 — Root AI(以色列)、MetoMotion(以色列)、中科原动力(中国)
- 猕猴桃 — RoboticsPlus(新西兰)
- 青椒 — Agrist(日本)

2. 剪枝机器人：

- Priva(荷兰)

2、存在的问题

2.1. 复杂环境下感知不精准



果实耐挤压特性



前景曝光不足



相互遮挡的作业环境



变化光照强度

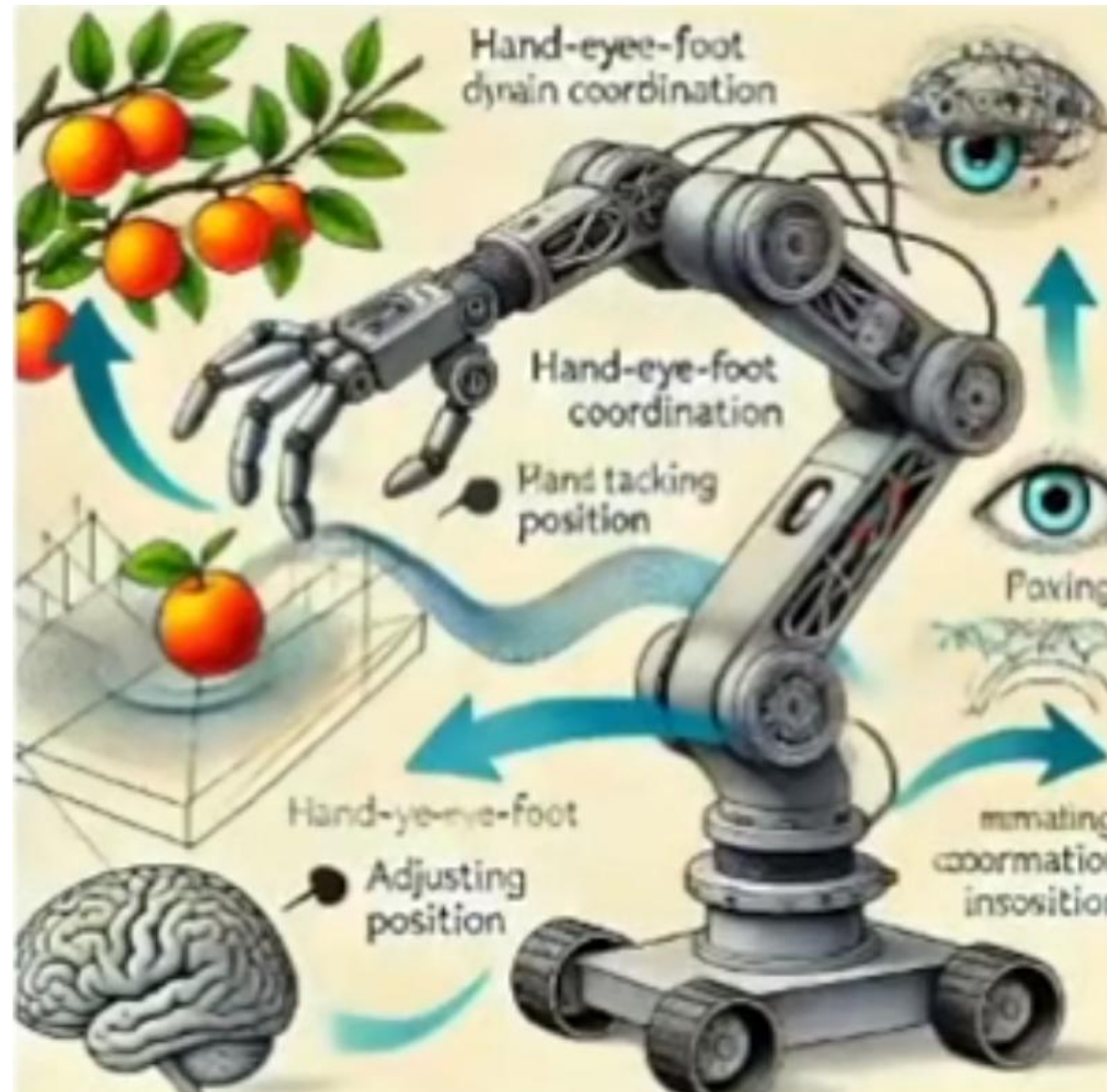


背景过度曝光

2、存在的问题

2.2. 动态环境下手-眼-脚-脑协调难

动态的果实、动态的机器人，系统延迟，如何使手-眼-脚-脑协同？



来源：由提示词驱动ChatGPT 4o生成，熊亚，2024

2、存在的问题

2.3. 末端执行器操作不灵巧



在成簇聚集生长、果梗相互缠绕的草莓中，如何灵巧地选择性采摘成熟果实且保证不损伤果实？



灵巧机械手抓取草莓

来源：由提示词驱动CharGPT 4o生成，熊亚. 2024

● 番茄采摘机器人

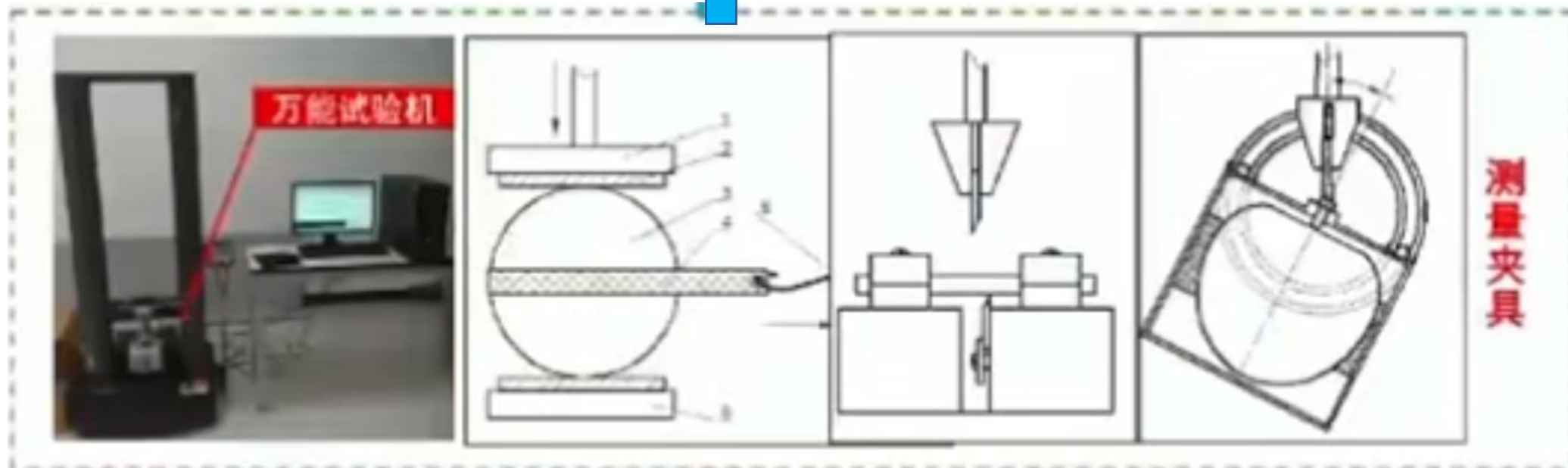


恒压气囊夹持果萼分离式采摘手爪

单气缸驱动果柄切割夹持式采摘手爪

采摘力学特性测量分析

- 果结离层断裂特性
- 果萼离层断裂特性
- 果实(柄)摩擦特性
- 果柄切割断裂特性
- 果实耐挤压特性





第一代苹果采摘抓持器

2023. 6. 1开始研发

2023. 11. 1第一代样机完成



第一代样机

抓取力测试



36.33N

41.76N

35.04N

34.99N

31.80N

平均抓取力35.98N



第一代样机

苹果模型抓取测试

2X



第一代样机

甩动测试





摘取成功

2X



摘取失败

2X

地信界 整理

扫码下载更多文档

第一代样机

障碍物缠绕 脱困模拟测试



地信界 整理

扫码下更多文档

单指受困

2X

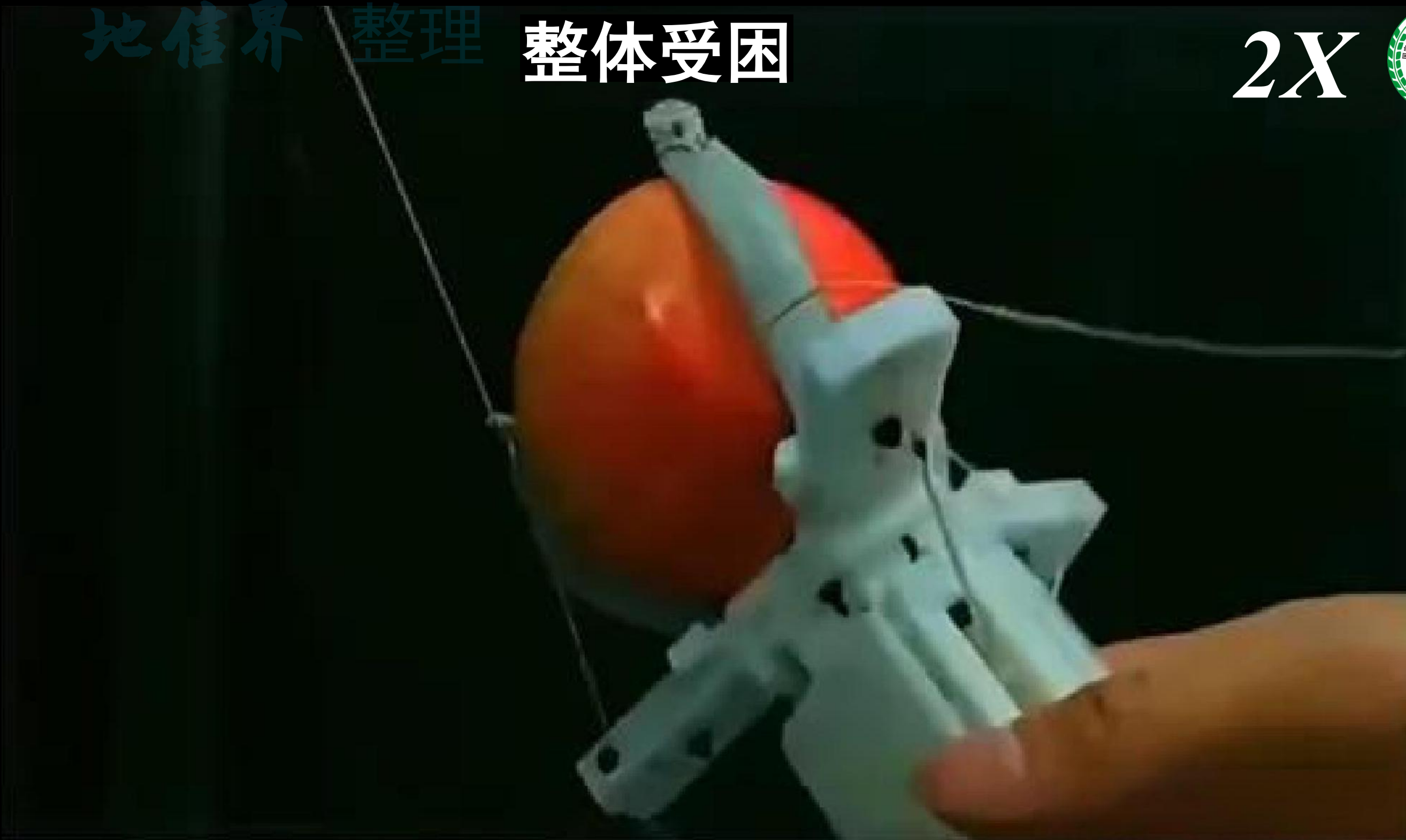
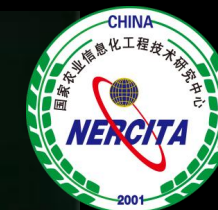


地信界

整理

整体受困

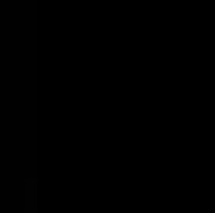
2X



刚性物体误抓



2X





2023.11.14-2024.6.10

反复修改迭代
第三代样机研发完成



外观迭代

三代样机外观对比



初代抓取器



二代抓取器

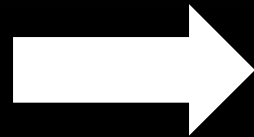


三代抓取器



设计方案迭代

三指设计；
方案初步验证；



四指设计；
优化走线；
外观与结构重新设计；
性能提升；



结构优化；
进一步提升性能；
增加旋转自由度；
机械与电气接口适配；

初代抓取器

二代抓取器

三代抓取器

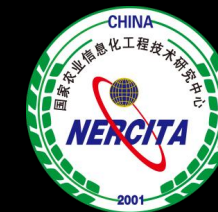


三代样机性能对比

直径	抓取角度		正对苹果中轴	与中轴 45°	垂直苹果 中轴	性能提升 (与中轴 45°)	总体性能 提升
	样机代别						
82 mm	初代		41.6N	32.4N	17.9N	/	/
	二代		51.8N	41.7N	26.9N	28%	31%
	三代		72.33N	54.8N	43.33N	31%	41%
100 mm	初代		24.6N	15.3N	14.1N	/	/
	二代		41.36N	30.5N	17.63N	99%	66%
	三代		59.58N	42.46N	32.18N	39%	50%

地信界 整理

扫码下载更多文档



第三代样机

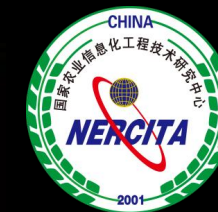
运动示意



2X

地信界 整理

扫码下载更多文档



第三代样机

初步集成与调试

地在苹果采摘平台上的集成及初步测试

扫码下载更多文档

2024.8.19



2、存在的问题

2.4. 效率问题



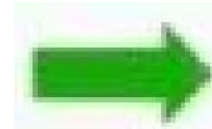
- 感知算法制约
- 规划算法制约
- 控制算法制约
- 机械臂性能制约

2、存在的问题

2.5.持续作业难



当前农业机器人难以实现持续作业，特别是果蔬采摘机器人，如何保证机器人长时间持续作业？



故障检测与自恢复

2.6.智能程度低 适应性差



当前机器人存在大量设定性程序，大多只能用于特定场景，难以适应各种农场或农作物品种



大模型与通用人工智能

2.7.成本高



如何将动辄几十万的农业机器人降到3-5万，农民能承担得起的价格？



核心部件国产化

云计算

规模化生产



3、发展趋势（短期：未来3-5年）

专用农业机器人逐步进入农场

应用：

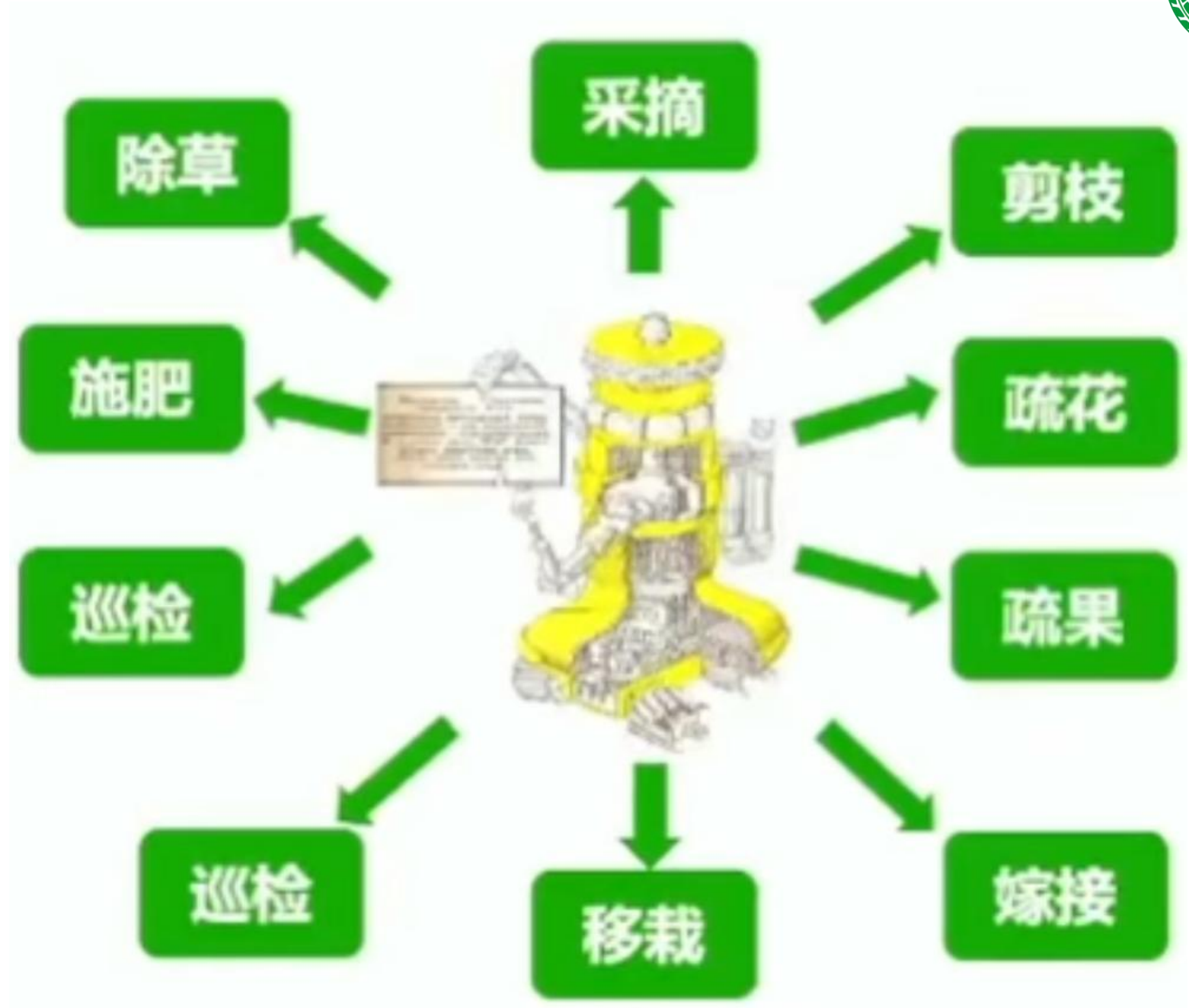
- 对靶施药、病虫害防控机器人得到大量使用
- 精准除草机器人、果园运输机器人等逐步得到推广使用
- 果蔬采摘机器人得到初步应用（解决部分劳动力）

技术突破：

- 复杂环境下精准感知技术大幅提升
- 手-眼-脚-脑协同问题得到解决
- 采摘机械手、专用机械臂等核心部件实现国产化
- 灵巧操纵技术进一步提升
- 大模型技术在农业机器人规划与决策领域得到大量应用

3、发展趋势（长期：未来5-20年）

A. 通用农业机器人(一机多用)



“一机多用”示意图

3、发展趋势（长期：未来5-20年）



B. 多机协同



来源：由提示词驱动ChatGPT 4o生成，2024

4、农业机器人技术创新

- 自主、智能、共融、协作是未来机器人发展趋势

ICRA 热词



IROS 热词



4、农业机器人技术创新

随着农业机器人的兴起，越来越多的新技术将被引入



4、农业机器人技术创新

智能农业机器人系统关键技术 Agribot key technology

