

现代设施园艺装备与技术丛书

番茄采摘机器人  
快速无损作业研究

刘继展 李智国 李萍萍 著



科学出版社

建外借

现代设施园艺装备与技术丛书

# 番茄采摘机器人快速无损 作业研究

刘继展 李智国 李萍萍 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

在我国农业快速步入全面机械化的背景下,果蔬生产作业的机械化仍存在大量空白,而鲜食果蔬的采收更占用高达40%的劳动力,采摘机器人技术研究具有重要的科学价值和现实意义。本书阐述全球采摘机器人研究的进展与进程,并针对困扰机器人采摘作业中果实损伤与作业效率的关键矛盾,提出机器人快速采摘中的夹持碰撞与快速无损收获问题,进而通过力学特性与互作规律、建模仿真、设计方法、样机开发、控制优化的有机结合,系统开展番茄果实宏微本构特征、无损采摘机器人系统开发、黏弹对象的夹持碰撞规律、快速柔顺夹持建模仿真、真空吸持拉动的植株-果实响应、植物体激光切割、快速无损采摘控制优化等研究,有力地推动机器人采摘技术的进步。

本书内容面广,体系鲜明,反映我国智能农业领域的最新研究进展,而又注重读者广度与学术深度的结合,值得广大机器人技术爱好者和研发人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

番茄采摘机器人快速无损作业研究/刘继展,李智国,李萍萍著. —北京:科学出版社,2018.2

(现代设施园艺装备与技术丛书)

ISBN 978-7-03-056435-1

I. ①番… II. ①刘… ②李… ③李… III. ①机器人-应用-番茄-采收-作业研究 IV. ①S641.209

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 017899 号

责任编辑: 惠 雪 曾佳佳 / 责任校对: 彭 涛  
责任印制: 张克忠 / 封面设计: 许 瑞

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年2月第一版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年2月第一次印刷 印张: 23

字数: 460 000

定价: 199.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 《现代设施园艺装备与技术丛书》编辑委员会

主 编：李萍萍

委 员：（按姓氏笔画排序）

王纪章 毛罕平 付为国 朱咏莉

刘继展 李萍萍 李智国 张西良

周宏平 胡永光 赵青松 郭世荣

蒋雪松

## 丛 书 序

近 40 年来,我国设施园艺发展迅猛,成就巨大,目前已成为全球设施园艺生产最大的国家。设施园艺产业的发展,不仅极大地丰富了我国城乡人民的“菜篮子”,摆脱了千百年来冬季南方地区只有绿叶菜、北方地区只有耐贮蔬菜供应的困境,而且也充分利用了农业资源和自然光热资源,促进了农民增收,增加了就业岗位。可以说设施园艺产业是一个一举多得的产业,是人们摆脱自然环境和传统生产方式束缚,实现高产、优质、高效、安全、全季节生产的重要方式。设施园艺对于具有近 14 亿人口的中国来说必不可少。

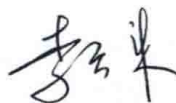
然而,由于设施园艺是一个集工程、环境、信息、材料、生物、园艺、植保、土壤等多学科科学技术于一体的技术集合体,也就是设施园艺产业的发展水平取决于这些学科的科学技术发展水平,而我国在这些学科的许多领域仍落后于部分发达国家,因此我国设施园艺产业的发展水平与部分发达国家相比还有很大差距,距离设施园艺现代化还相差甚远。缩小这一差距并赶上和超过发达国家设施园艺产业发展水平是今后一段时期内的重要任务。要完成好这一重任,必须联合多学科的科技人员协同攻关,以实现设施园艺产业发展水平的大幅度提升,加快推进设施园艺的现代化。

自 20 世纪 90 年代起,李萍萍教授就以江苏大学特色重点学科——农业工程学科为依托,利用综合性大学的多学科优势,组建了一个集园艺学、生物学、生态学、环境科学、农业机械学、信息技术、测控技术等多个学科领域于一体的科技创新团队,在设施园艺装备与技术的诸多领域开展了创新性研究,取得了一系列研究成果。一是以废弃物为原料研制出园艺植物栽培基质,并开发出基质实时检测技术与设备;二是研制出温室环境调控技术及物联网在温室环境测控中的应用技术;三是深入分析温室种植业的生态经济,研究建立温室作物与环境的模拟模型;四是明确设施果菜的力学特性,研制出采摘机器人快速无损作业技术,并研发果蔬立柱和高架栽培的相应机械化作业装备;五是研制出茶果园防霜技术和智能化防霜装备以及田间作业管理中的智能化装备。这些研究成果,无不体现了多学科的交叉融合,已经完全超越了传统意义上的“农机与农艺结合”。近年来,她又利用南京林业大学大生态、大环境的办学特色和优势,在设施园艺精准施药技术与装备、设施土壤物理消毒技术与装备等领域开展了多校协同的创新性研究。这些研究不仅体现了李萍萍教授的科技创新能力,也充分体现了她的组织协调能力和团结协作精神。这些创新成果已与许多生产应用企业合作,通过技术熟化和成果转化后,开展了大

规模的推广应用,其中基质配制与栽培模式、温室环境检测控制、清洁生产技术、自动生产作业的完整技术链,已成为设施园艺工程领域的样板。

为深入总结上述研究成果,李萍萍教授组织她的科技创新团队成员编著了一套《现代设施园艺装备与技术丛书》,丛书共包括《园艺植物有机栽培基质的开发与应用》《温室作物模拟与环境调控》《温室物联网系统设计与应用》《设施土壤物理消毒技术与装备》《番茄采摘机器人快速无损作业研究》《温室垂直栽培自动作业装备与技术》《果园田间作业智能化装备与技术》《茶果园机械化防霜技术与装备》八部。这套丛书既体现了设施园艺领域理论与方法上的研究成果,又体现了应用技术和装备方面的研发成果,其中的一些研究成果已在学术界和产业界产生了较大影响,可以说,这套丛书是李萍萍教授带领团队 20 余年不懈努力工作的结晶。相信这套丛书的问世,将成为广大设施园艺及其相关领域的科技工作者和生产者的重要参考书,也将对促进我国设施园艺产业的技术进步发挥积极的推动作用。

这套丛书问世之际,我受作者之约,很荣幸为丛书作序。说实话,丛书中的有些部分对我来说也是学习,本无资格为其作序。但无奈作者是我多年朋友,她多年来带领团队努力拼搏开展设施园艺生产技术创新研究令我钦佩,所以当她说出让我作序之时,我欣然接受了。写了上述不一定准确的话,敬请批评指正。



中国工程院院士

2017 年 9 月

## 序

机器人技术的快速发展使人类生产生活发生了深刻的变化。农业，特别是大量依赖人工的果蔬产业中，采摘、移栽、施药、运输等农业机械人的研发应用将带来产业的巨大变革。

由于环境的非结构化和对象个体的差异性显著，机器人化果蔬采摘被公认为最具挑战性的机器人技术之一，其研究更需要通过生物力学、优化设计、先进感知与智能控制等的高度融合来有力推动。作者是我国率先开展该领域研究并具有重要影响的青年专家，对该领域的研究进展与发展趋势具有深刻的认识和把握。作者十几年如一日倾力于相关的理论研究与应用开发，在采摘机器人基础理论与装备研发方面取得了丰硕的成果，在该领域形成了鲜明特色并产生了重要影响，为推动该领域的发展做出了重要贡献。特别是作者率先提出了机器人采摘中的夹持碰撞与快速无损收获问题，并在国家自然科学基金等项目的支持下，围绕“快速无损收获”主题形成了力学特性与互作规律、建模仿真、设计方法、样机开发、控制优化的技术体系。

该书是作者十余年采摘机器人技术研究成果的结晶。书中系统梳理了全球采摘机器人研究的进展与进程，并提出了不同国家(地区)的采摘机器人发展特色与各自社会经济条件和农业经营模式的内在联系。集中介绍了作者推动开展的机器人快速无损采摘研究的有关成果和发现，反映了采摘机器人研究的多学科高度融合特征，其关于黏弹对象的夹持碰撞、植物体激光切割、真空吸持拉动的植株-果实响应、基于个体差异性的性能概率分布等研究，具有突出的创新性和重要价值。该书内容面广，体系鲜明，反映了我国智能农业领域的最新研究进展，而又注重读者广度与学术深度的结合，值得从事机器人研发和使用的科研及工程技术人员和广大学生阅读。

作者曾赴我所领导的美国密歇根州立大学机器人与自动化实验室进行访学，和我有多年的学术交流和技术合作。此次赴江苏大学访问期间，承作者之邀，我很高兴为该书作序并向读者推荐。

席宁

香港大学讲座教授、IEEE 机器人与自动化学会主席

2018年1月

## 前 言

我出生于北方农村，年幼便成为母亲身边的重要劳力，麦田里三更既起的弓腰挥镰，盛夏日头当空的锄禾灌水，老茧和汗水伴随整个童年。从 18 岁远走江南投身工学，便冥冥注定将工学和农业结合而成为终生的事业。

从事农业装备研究的十数年，弓腰挥镰早已成为历史的追忆，而土地流转和机械化正共扶迎来中国农业的盛世。但是，在土地密集型的粮油生产机械化盛景下，却无法回避劳动密集型的果蔬生产所面临的劳动力骤缺和生产水平低下的困境。绿叶繁枝几数果，众里寻她，却在丛中笑，联合收割机远无法将一个个鲜嫩的瓜果送到消费者的篮子里。毫无疑问，智能化装备是实现果蔬生产中人力替代的不二选择。

番茄，俗称西红柿，是中国人餐桌上的最爱，也是全球需求量最大的果菜，然其鲜果的非人力收获为最难实现的作业之一。蒙师弟纪章与俄亥俄州立大学 Peter Ling 教授之陪，亲赴美国 10hm<sup>2</sup> 大型番茄生产温室，见其高度机械化作业下仍需数十劳力以完成周年采收之任务。番茄采摘机器人，在日、美等国应运而生，中国亦后起而势头可畏，无人采收愿景美妙却仍任重道远！

2006 年初，我和智国从零起步开始第一台装备的研发，并系统展开番茄机器人采摘的理论与工程研究。伴随着内外合作和多名研究生的陆续参与，建立起番茄采摘机器人研究的果实宏微观结构、黏弹力学特性、机器人-果实互作规律、夹持-变形损伤的数学建模与虚拟仿真、设计方法、样机开发、果实识别定位、控制优化的完整技术链条。特别是关注到机器人收获作业的“无损伤”与“高效率”要求的突出矛盾问题，提出并围绕“快速无损采摘”主题开展了黏弹对象的夹持碰撞、植物体激光切割、真空吸持拉动的植株-果实响应、基于个体差异性的性能概率分布等特色研究，在国内外同行中产生了重要影响。

十年磨一剑，在恩师李萍萍教授的支持下，番茄机器人收获的研究小有所成，我获得了博士学位，从年轻的讲师成为年逾 40 的研究员、博士生导师。智国从读研攻博继而获得玛丽·居里奖学金奔赴英伦，也成长为今日的青年翘楚。本书不仅是番茄“快速无损采摘”研究工作的集成，更是那段青春岁月的写录。

书里汇报了我、智国、李老师和王凤云、白欣欣、徐秀琼、倪军、倪齐、胡杨等研究生与本科生的研究工作，亦梳理阐述了全球采摘机器人研究的进展与进程，探讨了对采摘机器人技术未来发展的看法。尽我所能反映采摘机器人研究的多学科高度融合特征，构建鲜明严谨的逻辑体系，同时尽力兼顾读者广度与学术深度，



既供同行专家阅读批评,也希望对广大机器人技术爱好者能有所裨益。

感谢国家自然科学基金委员会的持续资助,感谢江苏大学农业装备工程学院、教育部现代农业装备与技术重点实验室、江苏省农业工程优势学科的鼎力支持,同时感谢毛罕平教授、尹建军教授、王新忠教授等的诸多帮助!

前路漫漫却时不我待,秉承铭志而忘我之心,愿和同仁为无人采收美妙愿景而孜孜共求!

刘继展

2018年1月

# 目 录

丛书序  
序  
前言

第 1 章	采摘机器人技术发展的历史与现状	1
1.1	鲜食果蔬产业与收获问题	1
1.2	全球采摘机器人装备开发的历程与现状	1
1.2.1	番茄采摘机器人	2
1.2.2	林果采摘机器人	14
1.2.3	蔬果采摘机器人	31
1.2.4	其他果实采摘机器人	51
1.2.5	通用型及其他采摘机器人	58
1.3	综述与展望	69
1.3.1	采摘机器人技术的持续进步	69
1.3.2	采摘机器人技术发展的关键条件	70
1.3.3	采摘机器人技术发展的重点领域	70
1.3.4	采摘机器人技术发展的突破口	71
第 2 章	机器人采摘中的对象损伤与无损采摘作业问题	72
2.1	机器人采摘中的果实致损原因	72
2.2	机器人采摘中的被动柔顺结构	72
2.2.1	指面弹性材料	73
2.2.2	欠驱动末端执行器	74
2.2.3	手指的弹性介质	76
2.3	机器人采摘中的主动柔顺控制	78
2.4	快速无损采摘问题的提出	80
2.4.1	快速无损采摘的问题特殊性与研究意义	80
2.4.2	机器人—果蔬快速夹持碰撞问题的特殊性	81
2.4.3	快速无损采摘的研究体系	82
第 3 章	番茄的果—梗物理与力学特性	85
3.1	概述	85
3.1.1	研究意义	85
3.1.2	内容与创新	85

3.2	面向机器人收获的果实-果梗物理/力学特性指标体系	86
3.3	番茄果、梗的物理特性	86
3.3.1	番茄的果、梗结构	86
3.3.2	物理特性	88
3.4	番茄果实的组元力学特性	91
3.4.1	试验材料、仪器与方法	91
3.4.2	试验结果与分析	97
3.5	番茄整果的压缩力学特性	102
3.5.1	挤压力-变形特性	102
3.5.2	蠕变特性	106
3.5.3	应力松弛特性	107
3.5.4	加卸载特性	109
3.6	番茄果实摩擦力学特性	112
3.6.1	静动摩擦系数	112
3.6.2	滚动阻力系数的测定	114
3.7	番茄整果力学结构模型	115
3.7.1	果实轮式简化力学结构	115
3.7.2	不同心室番茄的力学特征	117
3.8	番茄果实的损伤	125
3.8.1	番茄果实的机械损伤机理	125
3.8.2	番茄受压缩后的生理变化	125
3.9	果梗特性	132
3.9.1	梗系统结构	132
3.9.2	果梗力学特性试验	133
3.9.3	试验结果分析	137
<b>第 4 章</b>	<b>番茄无损采摘手臂系统的设计开发</b>	<b>140</b>
4.1	概述	140
4.1.1	研究意义	140
4.1.2	内容与创新	140
4.2	无损采摘末端执行器设计	140
4.2.1	无损采摘末端执行器的系统方案设计	140
4.2.2	末端执行器机构设计	149
4.2.3	感知系统设计	158
4.2.4	控制系统设计	158
4.2.5	供电系统设计	162
4.2.6	末端执行器结构设计	163

4.2.7	样机及性能指标	164
4.2.8	主被动复合柔顺采摘末端执行器	165
4.3	基于商用机械臂的无损采摘系统	167
4.3.1	商用机械臂与自开发末端执行器融合的背景和需要	167
4.3.2	商用机械臂的控制系统结构	167
4.3.3	机械臂与末端执行器的控制系统集成	169
<b>第 5 章</b>	<b>果实快速柔顺夹持的数学建模</b>	<b>173</b>
5.1	概述	173
5.1.1	研究意义	173
5.1.2	内容与创新	173
5.2	果实快速夹持试验与特殊碰撞特征	173
5.2.1	果实快速夹持试验	173
5.2.2	快速夹持的碰撞特征	174
5.3	果实快速夹持的特殊碰撞问题	175
5.4	果实快速夹持过程的阶段动力学特征	175
5.5	果实压缩模型	176
5.5.1	果实的黏弹特性与本构模型表征	176
5.5.2	番茄果实蠕变特性表征的 Burger 修正模型	180
5.6	果实快速夹持的复合碰撞模型	185
5.6.1	匀速加载阶段与应力松弛阶段	185
5.6.2	碰撞减速阶段	186
5.7	果实夹持碰撞规律	187
5.7.1	夹持碰撞过程的力变化规律	187
5.7.2	夹持速度与果实成熟度对碰撞时间的影响	188
5.7.3	夹持速度与果实成熟度对碰撞变形的影响	189
5.7.4	夹持速度与果实成熟度对碰撞峰值力的影响	190
5.8	夹持碰撞耗时的理论推算	191
5.8.1	手指夹持过程的构成	191
5.8.2	手指夹持的尺寸关系	192
5.8.3	手指夹持过程的耗时构成	192
5.8.4	柔顺夹持的控制模式选择	193
5.8.5	柔顺夹持的时间计算	193
<b>第 6 章</b>	<b>果实柔顺夹持的仿真研究</b>	<b>195</b>
6.1	概述	195
6.1.1	研究意义	195
6.1.2	内容与创新	195

6.2	果实有限元模型	195
6.2.1	番茄整果的黏弹性有限元模型	195
6.2.2	番茄果实非线性多组元有限元模型	203
6.3	静态夹持仿真	205
6.3.1	手指-果实接触几何模型	205
6.3.2	建立接触对	206
6.3.3	模型验证方法	206
6.3.4	抓取损伤预测方法	208
6.3.5	不同加载方式的组元应力仿真	209
6.4	采摘夹持过程的动态仿真	223
6.4.1	动态夹持仿真的软件实现	223
6.4.2	末端执行器夹持系统虚拟样机建立	224
6.4.3	末端执行器夹持番茄仿真分析	227
<b>第 7 章</b>	<b>树上果实吸持拉动的模型分析</b>	<b>230</b>
7.1	概述	230
7.1.1	真空吸持拉动在机器人采摘中的作用	230
7.1.2	树上果实真空吸持拉动问题的研究意义	231
7.1.3	研究内容与创新	232
7.2	真空吸盘吸持力学建模	233
7.2.1	球形果实的真空吸持力学模型	233
7.2.2	真空度对吸持力的影响	235
7.2.3	吸盘直径对吸持力的影响	236
7.2.4	果实表面轮廓对吸持力的影响	237
7.3	真空吸持拉动力学模型	239
7.3.1	树上果实吸持拉动的运动学分析	239
7.3.2	树上果实吸持拉动的静力学分析	240
7.3.3	树上果实吸持拉动的效应分析	243
7.4	树上果实吸持拉动的概率模型	249
7.4.1	果实吸持拉动的夹持干涉率与成功率	249
7.4.2	不同采摘轮次的每穗果实数目比重	250
7.4.3	不同每穗果实数目所需拉动距离及其概率	252
7.4.4	实需拉动距离对夹持干涉率的理论影响	260
7.4.5	吸持拉动距离的确定	261
<b>第 8 章</b>	<b>机器人作业中果-梗分离方式的比较研究</b>	<b>263</b>
8.1	概述	263
8.1.1	研究意义	263

8.1.2	内容与创新	263
8.2	无工具式分离方式的试验比较	263
8.2.1	无工具式分离方式	263
8.2.2	株上果实的拉断采摘试验	264
8.2.3	株上果实的扭断采摘试验	265
8.2.4	株上果实的折断采摘试验	265
8.2.5	离层强度与分离理论	267
8.3	果梗激光分离的试验探索	270
8.3.1	果梗激光分离方法的提出	270
8.3.2	生物材料的激光切割原理及优势	271
8.3.3	果梗激光分离的特殊性	272
8.3.4	果梗激光穿透与切割试验	273
8.3.5	激光穿透性能及其影响因素	278
8.3.6	果梗激光切割的实现	280
<b>第 9 章</b>	<b>番茄快速无损采摘试验研究</b>	<b>282</b>
9.1	概述	282
9.1.1	研究意义	282
9.1.2	内容与创新	282
9.2	快速柔顺夹持的参数优化	282
9.2.1	运动控制系统的 PID 参数调整	282
9.2.2	加减速过程中的加速和减速段耗能分析	292
9.2.3	快速柔顺夹持的速度优化	302
9.3	真空吸持拉动的控制优化	306
9.3.1	最大拉动速度与加速段位移的关系	306
9.3.2	动吸持拉力与真空度阈值的关系	310
9.3.3	吸持拉动的位移/位置参数优化	311
9.3.4	动作协调的控制模式优化	314
9.4	手臂协调的快速柔顺采摘控制	317
9.4.1	手臂协调控制模式	317
9.4.2	手臂协调采摘试验	320
	参考文献	324
	索引	348

# 第1章 采摘机器人技术发展的历史与现状

## 1.1 鲜食果蔬产业与收获问题

水果和蔬菜既是人类生活中必不可少的食物，也是重要的经济作物。据统计，2017年全球的水果和蔬菜产量分别达6.8亿t和12.6亿t，其中全球鲜食果蔬与加工果蔬的比例约为7:3。中国蔬菜、水果的种植面积和产量均稳居世界首位，但其加工果蔬的比例仅占5%左右。

通常情况下，加工用果蔬可以不必区分果蔬的成熟度，容许收获中有一定的损伤，如番茄等可整株收获，苹果等林果可通过振动树干、树冠等进行收获。在发达国家用于加工型果蔬的无选择性机械化收获已经逐渐普及，而对于占更大比重的鲜食果蔬，由于无选择性机械化收获方式无法适应其果实个体的成熟上市期差异以及无损收获的严苛要求，迄今为止，仍然依赖于人力劳动来进行选择性收获(selective harvesting)。随着果蔬栽培生产各环节的逐步机械化，收获问题亦成为突破全程机械作业的最后一环。据调查，日本草莓生产的劳动力消耗达20000h/hm<sup>2</sup><sup>[1]</sup>，其中仅收获就占其总劳动量的40%左右<sup>[1,2]</sup>。同时农业劳力紧缺、劳动力成本不断上升，已严重影响了果蔬产业的发展。在我国，近年来农业劳动力特别是青壮年劳动力也迅速向其他行业转移，农忙季节广大农村开始出现劳力荒，农村留守老人、妇女的劳动强度大大增加，生产效率明显降低。

果蔬生产的快速发展和农业劳动力短缺、劳动强度过大的矛盾日益显现，而替代选择性收获这一复杂人力劳动只有通过采摘机器人技术的深入研究才能实现。果蔬采摘机器人的研究开发，对于减轻农业从业者的劳动强度、解放农业劳动力和提高果蔬的集约化生产水平，都具有重要的意义。

## 1.2 全球采摘机器人装备开发的历程与现状

果蔬采摘机器人通常是由移动平台、机械手、末端执行器、视觉系统和控制系统组成。果蔬种类和品种庞杂，栽培模式也纷繁各异，国内外先后针对性地开发了各类采摘机器人及其末端执行器，其动作原理、结构形式、复杂程度、作业效果和性能也有很大差别。

### 1.2.1 番茄采摘机器人

#### 1. 鲜食番茄及其机器人采摘

深受人们喜爱的鲜食蔬果番茄，其机器人采摘研究较早得到全球研究者的重视，多年来得到持续的开展，并产生了一系列的成果。

同时，番茄亦是机器人采摘难度最大的果蔬种类之一。目前面对鲜食需要，通常对普通番茄实施单果采摘，而对樱桃番茄实施成串采摘。对目前绝大多数普通番茄品种及栽培方式而言，与黄瓜、茄子、苹果等果蔬相比，番茄果实每穗达 3~5 个，密集生长，相互触碰，且果实生长方位差异更为显著 (图 1.1)，因而对实施机器人的智能化采摘提出了更大的挑战。



(a) 番茄

(b) 黄瓜

(c) 茄子

图 1.1 番茄与黄瓜、茄子果实的生长姿态及分布差异

#### 1) 目标果实的识别

果实之间的靠拢与重叠遮挡更加严重，对采摘机器人的视觉系统而言，尽管对成熟番茄果实可以通过颜色差别而轻松辨别，但是由于多个果实图像连成一体而难以分割，甚至被完全遮挡，造成对目标果实识别和定位的困难 [3,4]。

#### 2) 采摘动作的实施

番茄成穗生长，相互触碰，造成采摘机器人对目标果实的夹持空间受限，夹持动作失败或把相邻果实碰伤；番茄果实的生长方位差异极大，每次采摘的姿态和作用力关系都有所变化；果梗较短且梗长不一，造成机械式刀头难以顺利实施果梗的切割，而扭断、折断果梗的力学作用规律变化很大，成功率受限，进一步加大采摘的难度。

因此末端执行器成为番茄机器人收获的研究关注点，其形式各异、功能相差极大。功能单一的剪断式末端执行器无法满足机器人采摘作业的要求，因而相继衍生出夹剪一体式和夹果断梗式两大类末端执行器。

#### 2. 日本的番茄采摘机器人

植株的种植模式对机器人采摘的性能影响很大，对传统的杯形种植，果实非常分散，机器人需要很大的工作空间，同时枝干的空间分布使采摘作业非常困难。而



日本的鲜食番茄一般采用单架栽培模式,由支柱和绳索支撑,在与地面垂直的方向栽培,数个果实成串悬挂生长,由于叶柄很短,果实识别大大简化,同时采摘作业性能得到保证 [5]。

日本早在 20 世纪 80 年代初就开始了番茄采摘机器人的研究,数十年来京都大学、冈山大学、岛根大学、神奈川工科大学、大阪府立大学等高校以及武丰町设施生产部等均推出了番茄采摘机器人样机,近藤直、门田充司等专家引领了番茄采摘机器人技术的研究热潮。

各样机多针对温室采用电动轮式底盘或轨式底盘,少数对露地栽培而采用履带式底盘 [6]。对通常栽培模式,由于冠层的复杂性和果实分布的随机性,其机械臂从早期的 3 自由度发展到以 6 和 7 自由度关节式机械臂为主;而近藤直等针对使番茄果实倒垂生长,从而使采摘难度大大降低的单架式栽培模式,应用直角坐标机械臂实施采摘;Chiu 等则将商用关节式机械臂与剪叉式升降机结合,从而扩大垂直方向的工作空间 [7-10]。

### 1) 番茄果实的逐个采摘

京都大学的川村登等较早进行番茄采摘机器人的开发 [11,12](图 1.2),采用速度分别为 0.52m/s 和 0.25m/s 的双速电动轮式底盘和 5 自由度机械臂,利用固定于底盘的单相机的移动两位置检测来实现对果实的定位。该机器人从整机结构到目标检测技术方法仍较为简单,但已成为初期对机器人采摘技术的重要探索。

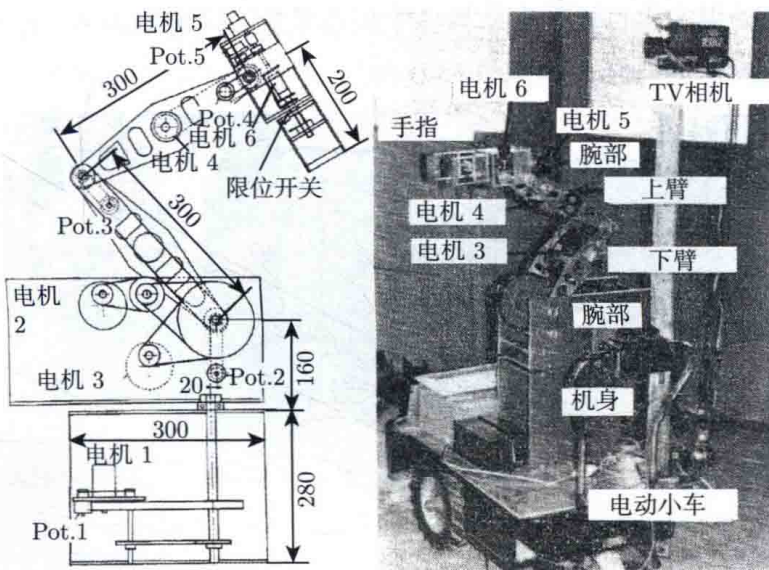


图 1.2 京都大学的番茄采摘机器人 (单位: mm)

神奈川工科大学的 Yoshihiko Takahashi 等针对老年人或残疾人的需求,提出了人工操作直角坐标型番茄采摘机器人 [13](图 1.3),通过屏幕显示遥控操纵机器人