



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

智能机器人系统

课程学习报告

姓 名：姚天亮

学 号：2150248

联系电话：15000476845

指导教师：刘成菊

上课时间（课号）：10072701

二〇二三年十一月

摘要

本文回顾了智能机器人的早期理论构思到结构机构、控制理论、人工智能技术成熟等阶段，探讨了机器人从单一任务向智能多能的转变。从技术体系上分析，概念化地将智能机器人技术分为算法智能和机构智能两个层面。重点介绍了各类感知技术、控制论、变胞机构等当前领域的热点。以代表性项目举例，阐释各技术点在具体问题中的实际应用，如视觉、触觉等在机械臂的实践，变胞机构在灵巧手中的实施等。并选择医疗领域进行深入剖析，结合 AI 在成像、内外科辅助等多种情形，探讨智能机器人，特别是医疗机器人的未来前景及机遇和挑战。

关键词：智能机器人；智能感知；智能控制；机构智能；医疗机器人

一、智能机器人的发展历程

1.1 智能机器人的定义

智能机器人（Intelligent Robot）是一类具有高度自主性的自动化机器或设备，是机器人技术发展的高级形态。智能机器人技术涉及力学、机械学、电子学、控制论、计算机、人工智能和系统工程诸多领域的交叉学科[1]。

对于智能机器人的定义，美国机器人协会（RIA）认为是这一种可编程和多功能的操作机，或是为了执行不同的任务而具有可用电脑改变和可编程动作的专门系统。日本机器人协会（JRIA）认为智能机器人能够模仿人脑，完成一些人脑的智力工作。国际标准化组织（ISO）将智能机器人定义为具有一定程度的自主能力，可在其环境内运动，以执行预期任务的可编程执行机构。

经过长期的研究，大多数专家认为智能机器人至少要具备三个要素，感知、运动与思考。智能机器人具备形形色色的内部信息传感器和外部信息传感器，如视觉、听觉、触觉、嗅觉。与生物体一样，智能机器人除了具有感受器外，它还有效应器，作为作用于周围环境的手段。这就是肌肉，通常是电动机。

1.2 智能机器人的历史发展

在早期的科幻作品里，机器人是一种能听命于人、能从事劳动、形状像人甚至表现出人的某些思维和行为的人造机器。人类对这种先进生产工具的最初想象里，就要求它具有人类自身所特有的智能。

中国古代对机器人也已经有了一些比较初步的探索，包括：东汉张衡发明的指南车、《梦溪笔谈》中记载的自动木人抓老鼠、诸葛亮发明的木牛流马。

1942年美国科幻作家 Isaac Asimov 在他的科幻作品「我，机器人」中第一次提到机器人的三个行为准则，日后被大家称为机器人三定律。包括：机器人不得伤人，或任人受伤而袖手旁观；除非违背第一定律，机器人必须服从人的命令；除非违背第一及第二定律，机器人必须保护自己。

1954 年美国人 George.C.Devol 设计并制作了世界上第一台机器人实验装置，发表了《适用于重复作业的通用性工业机器人》一文，并获得了专利[2]。这台机器人把遥控操纵器的多自由度关节型连杆机构与数控机床的伺服轴连结在一起，编程输入预定的机械手动作后，就可以离开人的辅助而独立运行。此外，操作人员还可以用手带动机械手依次通过作业任务的各个位置，进行示教，同时将这些位置序列记录在存储器内。在任务的执行过程中，各个关节在伺服驱动下重新遍历出那些位置序列，从而完成作业。因此，这台原型机器人的主要技术功能就是“可编程”以及“示教一再现”。



二次世界大战后，美国阿贡国家能源实验室研制主从式遥控机械操作手，用于处理放射性物质。



1960 年，美国 Unimation 公司研制出一台工业机器人样机，并定型生产

Unimate（意为“万能自动”）工业机器人，第一台 Unimate 安装在了通用汽车公司用以热压铸。



70 年代机器人产业蓬勃兴起，机器人学与技术发展为专门的学科。1970 年第一次国际工业机器人会议在美国举行。各种成功的实用范例推动了机器人应用领域的进一步发展。1979 年 Unimation 公司推出了 PUMA 系列多 CPU 协调控制的先进工业机器人；日本山梨大学研制成功平面关节型 SCARA 机器人，在此后的装配作业中得到了广泛应用；20 世纪 80 年代，形成了工业机器人产业。同时，少数工业化国家开展了具有视觉、触觉、多臂、能跨越或回避障碍等特殊作业条件下的各种特种机器人研究。



PUMA 系列机器人



SCARA 机器人

20 世纪末至今，随着计算机和人工智能技术的快速发展，机器人智能化成为可能。早期的机器人智能行为只能实现积木的分类、堆放动作等，一些有视觉和触觉的机器人可用于铸件、泵体的识别和检查，集成电路的装配和焊接。现在的机器人装有各种各样的内外传感器，对环境具有比较全面的感知能力，另外还有像肌肉一样的效应器，具有作用于周围环境的能力。有的智能机器人已经能够很

好地理解人类的语言，可以直接进行对话交流，而不仅仅是简单地模拟人或者动物的动作和行走，甚至可通过对环境的感知和识别，对情景的理解，进而对任务重新规划和执行。例如美国波士顿 Dynamics 公司研制的大狗四足机器人，它能够在冰面和险要斜坡快速跑动，并且在强大外力冲击时也能很好地保持机器人本体的平衡。智能机器人的智力反映在它对环境信息的感知和处理以及对情势的判断和决策能力，或者说是一种对环境的、仿生的自适应能力。

1.3 智能机器人的核心技术

人的构成包括骨骼、骨架、肌肉和血液，其中的骨架就类似于机器人的结构，决定了机器人的运动范围。在骨架的基础上加上动力驱动、神经系统传感，能够让机器人具备动力与思维方式，我们做智能机器人，就需要从这些角度综合考虑，进一步提高智能机器人的性能。

智能机器人应该具备算法智能和机构智能，在算法智能方面，通过人工智能技术，让机器人具有自主性以及智能处理信息的能力；在机构智能方面，机器人本身的机械结构也要能够在各种任务场景中实现自适应切换。目前的智能机器人包含七大关键技术：重构技术、多传感信息融合、导航与定位、路径规划、机器人视觉、智能控制、人机接口技术。

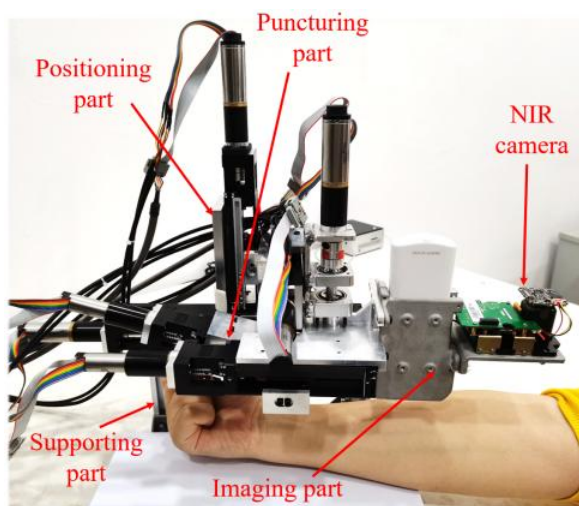


二、 算法智能

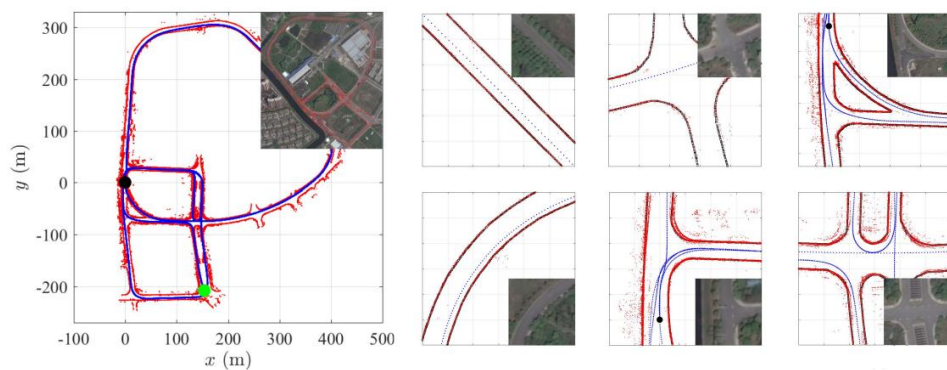
2.1 智能感知

智能机器人的感知与其实也与人的感受一样，主要有视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉。目前在智能机器人领域，目前研究最为广泛的是视觉与触觉，本报告也将详细介绍视觉与触觉的智能感知。

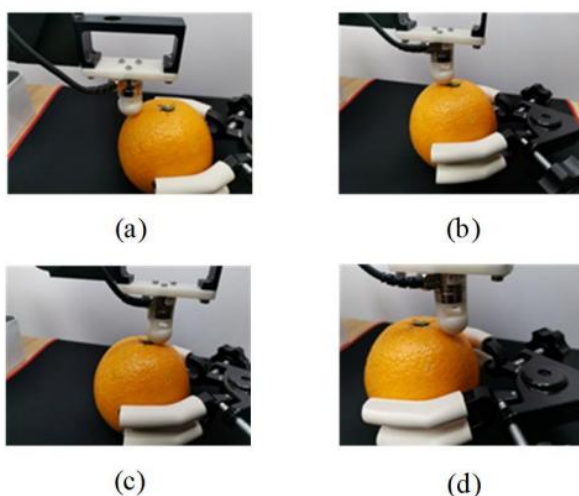
视觉感知是机器人获取环境信息和完成任务的重要途径。当前，机器视觉主要采用数字图像处理技术和深度学习方法。数字图像处理技术可以实现颜色、形状、运动的识别，但识别率和复杂场景下的识别能力有限。近年来，深度学习在计算机视觉领域取得显著进步。通过对大量图像的数据训练，深度学习网络可以学习视觉特征，完成图像分类、目标检测、图像识别等任务。这大大提高了机器人视觉系统的鲁棒性和智能性。Yu Chen 团队[3]开发的智能静脉穿刺机器人，就使用了近红外与超声模态图像，通过深度学习网络实现了对于穿刺部位、穿刺深度的识别与分析，并结合控制算法，实现对机器人穿刺位置、角度、力度的精准控制。



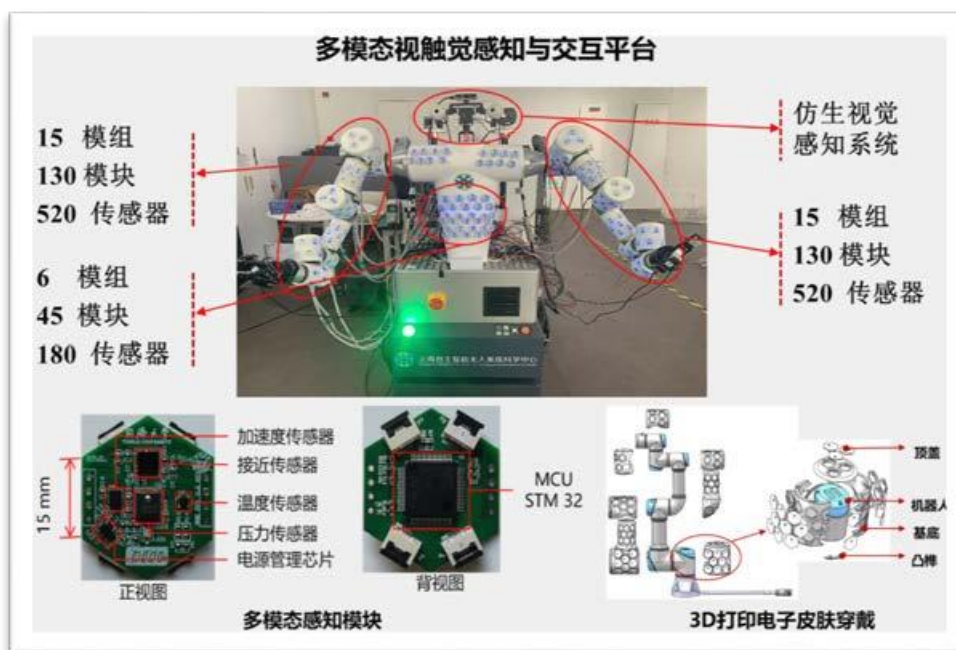
而对于智能驾驶汽车，视觉里程计、激光雷达，都可以帮助机器人获取周围环境，王峻教授团队就曾开发了 3D-LiDAR 传感器检测路缘，并对相关数据进行分割与分析，离线实验证明了该方法的准确性和鲁棒性[4]。



触觉感知可以帮助机器人感知物体的形状、质量、硬度等物理属性，识别环境中的障碍物，完成精细操作任务。机器人触觉系统主要包括触觉传感器和触觉处理模块。常见的触觉传感器有压力传感器、力传感器等。它们可以收集接触物体时产生的压强或力信号。同济大学 Peng Qi 团队利用 ATI Nano 17 接触力传感器，设计了自适应力控算法，实现了机械夹爪对橘子、纸张等表面特性差异巨大的物体的有效夹持[5]。并通过利用神经网络将这些感知信号通过触觉处理算法进行分类和识别，实现了机器人的触觉感知，据了解，这项研究获得了 IEEE ICARM 2023 的最佳会议论文提名。



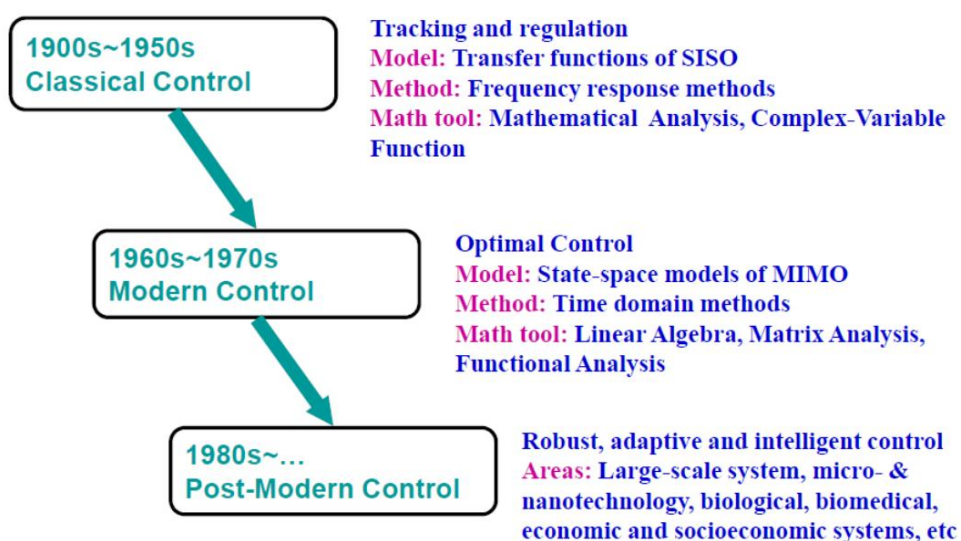
同时，多个分布式触觉传感器的搭配，能够提高机器人手抓物体和完成任务的灵活性，上海自主智能无人系统科学中心（张江人工智能岛）的实验室就有一个由数百个微型触觉传感器构成的电子皮肤系统，非常的有趣。



香港大学机械工程系 Ka-Wai Kwok 团队[6]提出了一种用于电子皮肤大尺寸形变的感应系统，包括基于多物理场仿真的优化设计、基于力学有限元的数据插值和基于神经网络的形变预测。团队在一块由简单光学元件组成的电子皮肤上验证了该系统的感应性能：它能够准确感应复杂且大尺寸的自身形变（平均距离误差约 0.27mm）。

2.2 智能控制

控制理论的发展可以认为经历了三个阶段：



第一阶段为 20 世纪 40~60 年代，称为“经典控制理论”时期。主要特点：考虑单输入和单输出 SISO 问题（而且主要研究线性定常系统，对非线性系统，分析是采用的相平面法也针对二阶的非线性系统），主要采用传递函数、频率特性、根轨迹为基础的频率分析方法。该时期的主要代表人物有伯德（H. W. Bode）和伊文思（W. R. Evans 提出根轨迹法）。

第二阶段为 20 世纪 60~70 年代，称为“现代控制理论”时期。其特点是：控制对象可以是多输入多输出 MIMO 问题，系统可以是线性的，定常的，也可以是非线性的，时变的。通过引入状态的概念，系统主要使用状态空间法来描述。该时期的主要人物有：庞特里亚金（于 1961 年提出极大值原理）、贝尔曼（Bellman, 1957 年提出动态规划）及卡尔曼（R. E. Kalman, 提出状态的概念，Kalman 滤波器等）。

第三阶段为 20 世纪 70 年代末至今，控制理论向着“大系统理论”和“智能控制”的方向发展。“大系统理论”是控制理论在广度上的开拓，“智能控制”是控制理论在深度上的挖掘。“智能控制”是模拟人类智能活动方面的控制与信息规律，研制具有某些仿人智能的工程控制与信息处理。智能控制的特点是它是一种非基于模型的控制。

维纳总结了控制论的三要素：信息、反馈和控制。因而，可以将具有智能信息处理、智能反馈和智能控制决策的控制方式，称为智能控制，把这种以智能控制为核心的控制论成为智能控制论。

智能控制主要包括如下内容：知识工程与专家系统、迭代学习控制（基于模型的智能控制）、模糊控制、基于人工神经网络的控制、进化计算与遗传算法。

模糊控制是其中一个很有意思的内容，这一有趣又完备的理论体系是由 Zadeh 建立的，模糊控制是以模糊集合论，模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种计算机数字控制[7]。这种模糊集合与相应隶属度函数的构建，非常符合我们人们日常的习惯，为我们设计符合人习惯的控制器提供了参考。

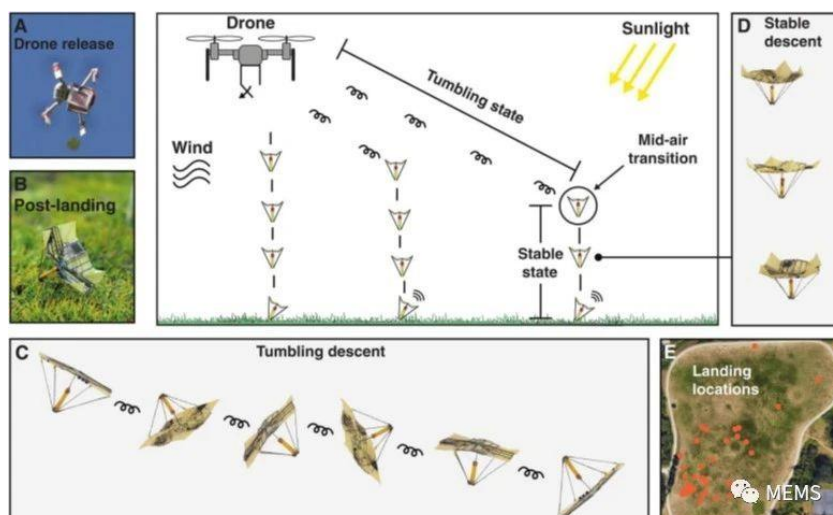
而作为“万能拟合器”的神经网络，自然不必多说，如今爆火的深度学习，就是神经网络的最广泛运用。目前，对于神经网络可解释性的研究是一大研究方向。

三、机构智能

机构是智能机器人的骨架，也是其控制系统、视觉系统与智能系统的载体。因此机构对于智能机器人非常重要[8]。在实际应用中，智能机器人要想适应当前环境就需要根据不同的环境、需求进行变形，因此机器人在结构上要可重构，达到一机多能，这就是机构智能。为此，世界机器人机构学领域的顶级专家戴建生教授（英国皇家工程院院士（FREng），欧洲科学院院士，IEEE Fellow, ASME Fellow, RSA Fellow, IMechE Fellow）提出了“变胞机理”的概念，作为机器人机构创新的新途径。

回顾人类的进化过程，100 多万年来与自然环境的交互、重构改造；机器的变革由单一简单任务到复杂工况，经历了四次工业革命，在此启发下，戴建生教授在 1999 年提出了一个新的概念——“metamorphic mechanisms”，metamorphic 是指从生物学原理出发，改变形态、重新构造[9]。2000 年，戴建生教授与张启先院士一同将“metamorphic mechanisms”译为“变胞机构”，这种变胞机构与传统结构一样是变自由度、变拓扑，而不同之处在于，过去并联机构在 3UPS 活动路径确定后，再从 3UPS 到 3SUP，自由度需要全部重新设计，但变胞机构能够帮助 3UPS 和 3SUP 进行快速转变，实现机构智能[10]。

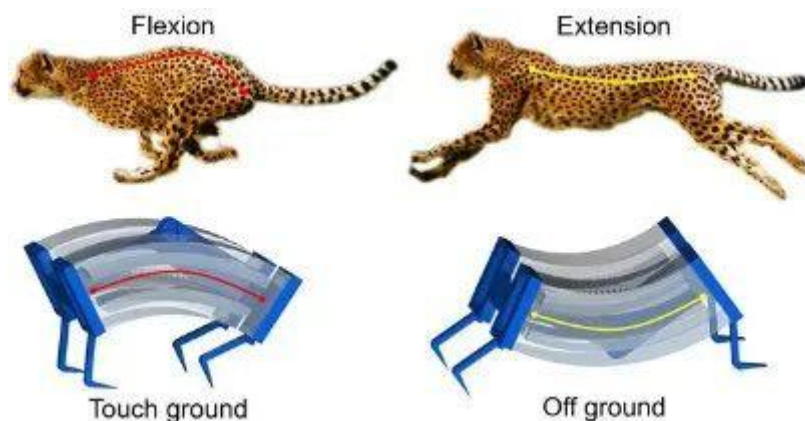
近期在机构智能领域，来源于中国传统折纸艺术的折纸结构是一大热点，有很多在研究。美国华盛顿大学与法国格勒诺布尔大学阿尔卑斯分校 LEGI 实验室组成的科研团队构建了太阳能折纸结构微型飞行器；这种微型飞行器在空中可以通过电子装置改变其形状，以实现无线传感器的风力分散部署。使用双稳态叶片结构设计了这款折纸结构微型飞行器，并发现了一项重要特性：这些折纸结构形状的简单改变会导致两种截然不同的下落行为[11]。



机构智能的研究中，基于机构智能的变胞灵巧手是学者关注的重点。灵巧手的关键在于手掌不是一块一成不变的铁板，而是一个变胞机构，其自由度可以从 0 到 1 再到 2，可以收缩、重新展开，这就像人类手掌一样，具有很强的灵活度，可以广泛应用在各类机器人的执行端，进行仿人自适应的夹持操作[12]。



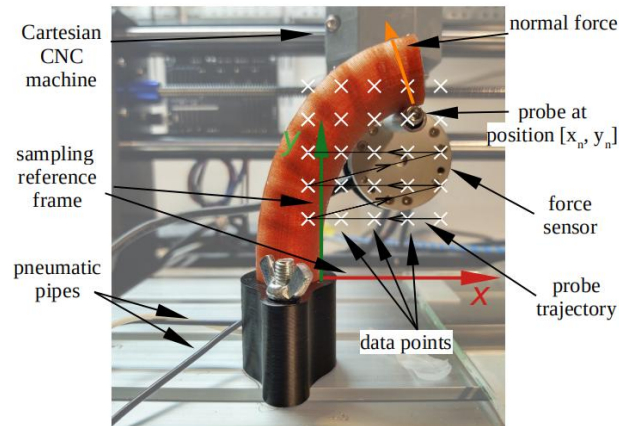
还有一类非常有趣的机器人是软体机器人，传统机器人比较僵化，通常不适合执行精细任务或近距离与人类互动，而软体机器人的灵活性和柔顺性降低了人机交互过程中的潜在风险，并适应更广泛的任务。软体机器人是一门多学科交叉融合的学科，涉及机器人技术的前沿领域，是实现智能、安全、柔顺的“人机交互”的途径之一，得到广泛的关注和研究。在顶刊论文中，经常能看到软体机器人的近期成果，2020 年发表在 *Science Advances* 上的论文将机械失稳机理用于设计受脊椎启发的高速和强力的软体机器人，使其能快速储存和释放能量。由此，展示了一种像猎豹一样高速奔跑的爬行器，运动速度达到 2.68 个体长/秒[13]。



约翰内斯·开普勒大学软材料实验室团队开发的一款由电磁驱动的微型软体机器人，最快可以以 70 体长/s 的速度奔跑，相比之下，猎豹的运行速度约为 25 体长/s，F1 赛车为 50 体长/s（每秒体长表示的相对速度可以量化不同生物体在各种体型中的速度）。这一类基于软电磁弹性体的机器人（SEMR）通常响应速度快、易于小型化；软电磁弹性体致动器可以在弹性基板上印刷液态金属线圈制成，通过对液态金属施加电流，可以控制致动器运动[14]。



英国玛丽女王大学的 Kaspar Althoefer 团队等受到哺乳动物相关结构特点的启发，通过在结构上模拟仿生硬化机制，研制了可变刚度的软体机器人驱动器，为软体机器人的自适应可变力响应提供了新的解决方案[15]。



连续体机器人也可以算作机构智能的新代表，这是一类形态非常特殊的机器人，模仿了生物界的象鼻这类细长的结构，适用于特殊工况：包括人体的自然腔道检查与治疗、介入导管手术、飞行器发动机内部巡检等空间狭小的场景[16]。

四、应用于医疗场景的智能机器人系统

在国际机器人旗舰期刊 ROBOTICA 四十周年创刊专辑中，Editor-in-Chief 戴建生教授在编者按中将机器人的发展分为了两个 25 年：传统机器人的 25 年（1985—2010）和现代机器人的 25 年（2010—2035）。前者是工业机器人的高速发展时期，例如工厂流水线机器人，而服务机器人、医疗机器人处于初创与起步阶段；后 25 年则是服务机器人、医疗机器人的高速发展阶段[17]。我们就以复杂度高、灵巧性要求高但应用前景极其广阔的医疗场景来进行智能机器人技术与应用的未来展望。

The arms, torso and leg mechanics of Da Vinci's Mechanical Knight.

Renaissance (14th-17th century)

Source: news.com.au




30 July 2020
ABCP Lecture

Centre for Robotics Research
Department of Engineering



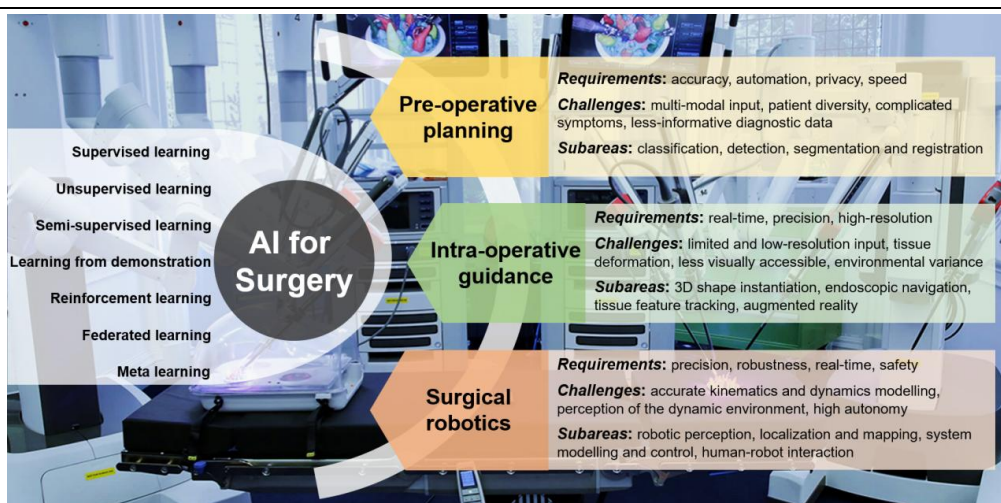
这张图很有意思，是达芬奇在文艺复兴时对于双臂机器人的设想，如今我们最为著名的 Da Vinci 手术机器人，其形态结构看着也是继承了达芬奇的设想。

人工智能（AI）在医疗机器人中的应用为医学带来了一个新时代。先进的医疗机器人可以执行诊断和外科手术，帮助康复，并提供替代肢体的假肢。这些设备所使用的技术，包括计算机视觉、医学图像分析、触觉、导航、精确操作和机器学习（ML），可以让智能机器人执行诊断成像、远程手术、外科子任务，甚至整个外科手术[18]。

医学影像引导机器人技术结合了医学影像和机器人技术，前者可以确定关键解剖结构、病变和物体的位置，后者则可以精确放置器械或工具，从而带来巨大优势。机器人可在辅助成像的引导下，操控手术器械到达关键目标。在这里，人工智能的重点通常放在转向机械学和规划算法上，因为穿越软组织涉及曲线路径，而这些路径受到穿过组织的最小曲率半径以及器械插入时组织位移的限制。机器人辅助也被用于内窥镜检查：在外科胃肠道成像和支气管镜检查中使用刚性或柔性内窥镜，甚至是带磁驱动的胶囊。

软体机器人技术是开发更灵活、适应性更强的手术机器人的一个前景广阔的途径，它具有必要的灵巧性和刚度调节能力，可以安全地、灵活地执行外科手术。软体机器人的主要特点是使用可变形、弯曲、收缩和改变刚度的材料，将机器人手术的范式推向更安全、更柔软的方向。但是，软体机器人技术目前仍存在大量技术挑战。在传统的机器人中，电机直接驱动机器人的关节，效应器由刚性部件制成，在操作过程中不会变形。而软体机器人产生的运动很难建模，可能导致位置精度降低，这是机器人辅助手术中的一个关键问题。为了克服这一挑战，目前研究人员正在开发基于数据驱动控制的先进策略，以应对软体机器人的高度非线性的运动行为。

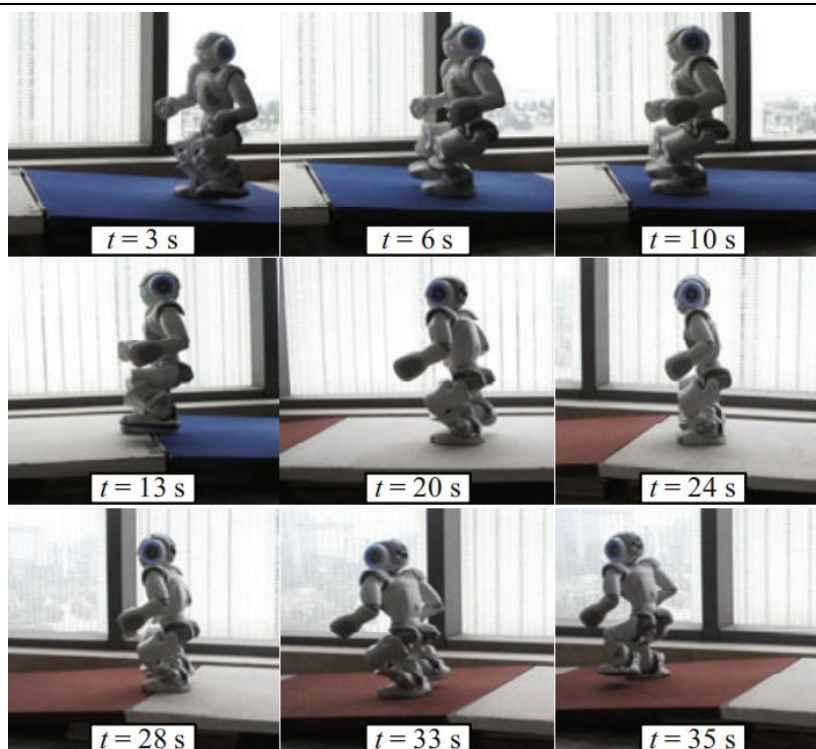
总的来说，智能机器人将会在医疗场景取得更大的综合性突破，杨广中教授（前帝国理工学院 Hamlyn 中心创始人，现上海交大医疗机器人研究院院长）就总结了医疗机器人的机遇与挑战（如下图）[19]，相信在场景应用中解决这些问题，也能够推动智能机器人技术的进一步变革。



五、总结

本文从智能机器人的定义、发展历程、核心技术、算法智能、机构智能等多个维度展开介绍，并针对医疗场景进行了深入阐释。随着新一代智能机械臂、软体机器人和连续体机器人等新技术的不断涌现，医疗机器人在辅助治疗、微创手术等方面都显示出巨大潜力。虽然目前面临许多技术难点和挑战，但随着机器人技术、人工智能和模式识别等相关技术的不断进步，医疗机器人无疑会带来更人性化、更精准的诊疗体验，智能机器人也将会实现新的技术突破与飞跃。

如今，具身智能 (Embodied AI) 成为了智能机器人领域的新热点，图灵奖得主、中国科学院院士姚期智认为，人工智能领域的下一个挑战将是实现“具身通用人工智能”。具身智能的本质是智能体具备和环境交互感知能力，以及基于感知到的任务和环境进行自主规划-决策-行动-执行等一系列行为的能力[20]。未来的智能机器人需要真正做到和人一样，通过实现规划决策（大脑）、运动控制（小脑）、主控系统、主干结构及零部件的组合（类似于人的一系列关节和肌肉）达成这一目标。我们相信，随着前文列举的若干核心技术的共同发力，我们一定能看到人形具身智能机器人出现在我们的日常生活中。刘成菊教授带队的 TJ-Ark 机器人足球队也是早已耳闻，成绩优异。其中的双足机器人正是我们未来人形机器人的范本，在双足机器人的运动控制方面，刘成菊、陈启军教授团队也过仿生控制、各类非线性优化算法的应用，已经取得了不少突破[21]-[23]。



群体智能，一种来源于大自然的思想，成为了当今多智能体的一大研究热点。自然界中的生物群体通过个体自主决策和简单信息交互，经过演化，使整个群体宏观上“涌现”出自组织性、协作性、稳定性以及对环境的适应性，这对于多智能体协同是一个有趣的启发[24]。

相信随着更多新技术的集成，我们的机器人足球队会取得更大的成功，仿人机器人也会取得更大突破！

最后，非常感谢电信学院控制系刘成菊教授组织的这一门非常精彩的课程，在头尾两节课为我们带来了非常全面、专业的智能机器人知识介绍，给了我很多的启发与思考。

参考文献

- [1] Wang, T. M., Tao, Y., & Liu, H. (2018). Current researches and future development trend of intelligent robot: A review. *International Journal of Automation and Computing*, 15(5), 525-546.
- [2] Engelberger, J. F. (1999). Historical Perspective and role in automation. *Handbooks of Industrial Robotics*.
- [3] Chen, Y., Wang, Y., Lai, B., Chen, Z., Cao, X., Ye, N., ... & Qi, P. (2021). VeniBot: Towards Autonomous Venipuncture with Semi-supervised Vein Segmentation from Ultrasound Images. *arXiv preprint arXiv:2105.12945*.
- [4] Zhang, Y., Wang, J., Wang, X., & Dolan, J. M. (2018). Road-segmentation-based curb

detection method for self-driving via a 3D-LiDAR sensor. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 19(12), 3981-3991.

[5] Qi, P., Wu, Y., Yao, T., Lu, B., Sun, Y., & Dai, J. S. (2023, July). A Haptic Exploration and Surface Classification of Objects with Four Typical Surface Properties. In *2023 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)* (pp. 137-142). IEEE.

[6] Mak, C. H., Li, Y., Wang, K., Wu, M., Ho, J. D. L., Dou, Q., ... & Kwok, K. W. (2023). Intelligent Shape Decoding of a Soft Optical Waveguide Sensor. *Advanced Intelligent Systems*, 2300082.

[7] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.

[8] Dai, J. S., (2021). *Screw Algebra and Kinematic Approaches for Mechanisms and Robotics*, Springer, London.

[9] Dai, J. S., & Rees Jones, J. (1999). Mobility in metamorphic mechanisms of foldable/erectable kinds.

[10] Dai, J. S. (2014). *Geometrical foundations and screw algebra for mechanisms and robotics*. Higher Education Press, also *Screw Algebra and Kinematic Approaches for Mechanisms and Robotics*.

[11] Johnson, K., Arroyos, V., Ferran, A., Villanueva, R., Yin, D., Elberier, T., ... & Gollakota, S. (2023). Solar-powered shape-changing origami microfliers. *Science Robotics*, 8(82), eadg4276.

[12] Dai, J. S., Wang, D., & Cui, L. (2009). Orientation and workspace analysis of the multifingered metamorphic hand—Metahand. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(4), 942-947.

[13] Tang, Y., Chi, Y., Sun, J., Huang, T. H., Maghsoudi, O. H., Spence, A., ... & Yin, J. (2020). Leveraging elastic instabilities for amplified performance: Spine-inspired high-speed and high-force soft robots. *Science advances*, 6(19), eaaz6912.

[14] Mao, G., Schiller, D., Danninger, D., Hailegnaw, B., Hartmann, F., Stockinger, T., ... & Kaltenbrunner, M. (2022). Ultrafast small-scale soft electromagnetic robots. *Nature communications*, 13(1), 4456.

[15] Fras, J., & Althoefer, K. (2023, May). A fluidic actuator with an internal stiffening structure inspired by mammalian erectile tissue. In *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 662-668). IEEE.

[16] Shi, C., Luo, X., Qi, P., Li, T., Song, S., Najdovski, Z., ... & Ren, H. (2016). Shape sensing techniques for continuum robots in minimally invasive surgery: A survey. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 64(8), 1665-1678.

[17] Dai, J. S. (2010). Surgical robotics and its development and progress. *Robotica*, 28(2), 161-161.

[18] Yip, M., Salcudean, S., Goldberg, K., Althoefer, K., Menciassi, A., Opfermann, J. D., ... & Lee, I. C. (2023). Artificial intelligence meets medical robotics. *Science*, 381(6654), 141-146.

[19] Zhou, X. Y., Guo, Y., Shen, M., & Yang, G. Z. (2020). Application of artificial intelligence in surgery. *Frontiers of medicine*, 14, 417-430.

[20] Duan, J., Yu, S., Tan, H. L., Zhu, H., & Tan, C. (2022). A survey of embodied ai: From simulators to research tasks. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 6(2), 230-244.

[21] Liu, C., Zhang, T., Zhang, C., Liu, M., & Chen, Q. (2019). Foot placement compensator design for humanoid walking based on discrete control Lyapunov function. *IEEE Transactions on*

Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 51(4), 2332-2341.

[22] Liu, C., Yang, J., An, K., & Chen, Q. (2019). Rhythmic-reflex hybrid adaptive walking control of biped robot. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 94, 603-619.

[23] Liu, C., Xu, T., Wang, D., & Chen, Q. (2016). Active balance of humanoids with foot positioning compensation and non-parametric adaptation. *Robotics and Autonomous Systems*, 75, 297-309.

[24] Kennedy, J. (2006). Swarm intelligence. In *Handbook of nature-inspired and innovative computing: integrating classical models with emerging technologies* (pp. 187-219). Boston, MA: Springer US.