



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

# 体内机器人： 从毫米级至纳米级

**Intracorporeal Robotics:  
From Milliscale to Nanoscale**


迈克尔·高瑟 (Michaël Gauthier)

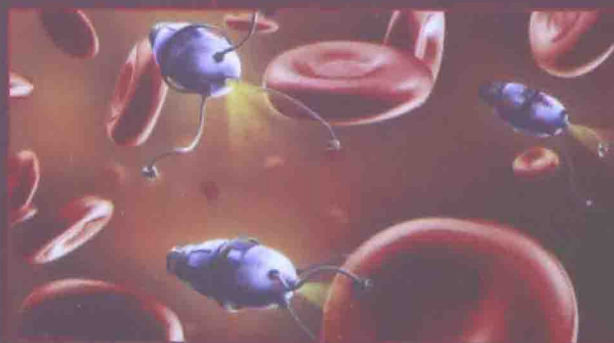
[法] 尼古拉斯·安德烈夫 (Nicolas Andreff) 著

艾蒂安·冬布雷 (Etienne Dombre)

曹 峥 译



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# 体内机器人： 从毫米级至纳米级

迈克尔·高瑟 (Michaël Gauthier)

[法] 尼古拉斯·安德烈夫 (Nicolas Andreff) 著

艾蒂安·冬布雷 (Etienne Dombre)

曹 崢 译



机械工业出版社

Copyright © 2014 John Wiley & Sons, Ltd.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled < Intracorporeal Robotics: From Milliscale to Nanoscale >, ISBN: 978-1-84821-371-5, by Michaël Gauthier, Nicolas Andreff, Etienne Dombre, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2014-5460 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

体内机器人: 从毫米级至纳米级/(法) 高瑟等著; 曹峥译. —北京: 机械工业出版社, 2015.5

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Intracorporeal robotics: from milliscale to nanoscale

ISBN 978-7-111-49766-0

I. ①体… II. ①高…②曹… III. ①体内-机器人 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 058939 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 顾 谦 责任编辑: 顾 谦

责任校对: 张 薇 封面设计: 马精明

责任印制: 乔 宇

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷

2015 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 9.5 印张 · 179 千字

0001—2600 册

标准书号: ISBN 978-7-111-49766-0

定价: 59.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

本书对医用体内机器人的设计和控制进行了系统的介绍。全书共分为四章，在前三章，作者分别对尺寸在毫米级（ $>1\text{mm}$ ）、微米级（ $10\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ ）和亚微米级（ $100\text{nm} \sim 10\mu\text{m}$ ）的体内机器人的设计原理进行了介绍，并对实际应用中遇到的问题及其解决方案进行了阐述。在第4章，作者对纳米级（ $1 \sim 100\text{nm}$ ）的体内机器人的发展前景进行了展望。本书层次清晰、内容精炼，详细地叙述了体内机器人设计中应用到的科学知识，书中给出的案例分析更是有助于读者更好地理解其内容。体内机器人在医疗领域的成功应用需要来自不同领域的科研人员（如生物、物理、化学、机械、自动化、微电子等）之间的充分合作，本书非常适合具有相关背景并对此领域感兴趣的广大读者参考阅读。

# 译 者 序

目前，我国医用机器人的产业化发展非常有限，主要还停留在科研阶段。工业机器人是我国“十二五”规划中重点发展的七大战略性新兴产业之一，而“微创医疗机器人”则是其中一项重大项目，已在哈工大等科研院校启动。随着我国产业转型升级的逐步推进，对以工业机器人为代表的智能装备的需求必将迎来一个爆发期。而伴随人类对于生命科学的不断深入了解，以及我国老龄化发展趋势的日渐明显，整个社会对于医用机器人的需求将大幅度提高。

医用体内机器人的开发和应用需要科研人员结合生物医学、机械、自动化、微电子、物理、化学、材料等众多基础和应用学科的知识才能实现，本书正是这样一本涉及多学科、多角度内容的教材，译者认为，对于医用体内机器人感兴趣的在校学生和研究学者来说，本书是一本不可多得的参考书。

在此，译者希望感谢一直以来支持自己的家人以及负责本书引进工作的机械工业出版社的朋友们。

译 者

# 原书前言

近 30 年来，关于医疗机器人的研究开发已经使得许多原型机在技术上被验证，其中的一些在临床上也已被验证。在这方面涉及许多专业，其中包括骨科、神经外科、内镜显微手术（主要是妇科、泌尿科、胎儿手术等）、心脏、胸和血管手术、耳鼻喉（ENT）手术等。

很显然，机器人可以使手术变得更容易，例如微创手术（MIS）、经自然腔道内镜手术（NOTES）、单孔入径手术（SPA）和介入放射学，因此机器人在显微外科领域的应用前景十分光明。表 I.1 中列出了机器人在手术室（OR）中能带给病人和外科医生带来的一些好处。概括地讲，手术机器人可能对创伤更小且更为精确的外科姿势有所贡献。它们也可能在超越人类的局限性方面有所帮助。

表 I.1 医疗机器人：带给外科医生和病人的好处

应用领域	带给外科医生的潜在好处	带给病人的潜在好处
- 骨科手术	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↗ 精确度</li> <li>- 进行复杂的切割、钻孔和打磨的可能性</li> <li>- 对多种术前和术中信息（视觉、力）的整合</li> <li>- ↗ 安全性（虚拟夹具）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 更少的修正手术</li> <li>- 假体的预期寿命更长</li> </ul>
- 微创内镜手术	<ul style="list-style-type: none"> <li>- - 第三只手</li> <li>- 更强的舒适性</li> <li>- 去除了支轴效应</li> <li>- 额外的内部活动性</li> <li>- 对生理运动的补偿</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 向创伤越来越小的手术和无可见疤痕的方向发展</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 神经外科</li> <li>- 介入性心脏病学</li> <li>- 放射疗法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↗ 精确度</li> <li>- ↗ 安全性（避免重要的结构）</li> <li>- 对生理运动的补偿</li> <li>- ↘ 暴露于辐射</li> <li>- 对于剂量规划的精确的空间追踪</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↘ 创伤</li> <li>- 对于越来越小的肿瘤的早期治疗</li> <li>- ↘ 健康组织暴露于辐射</li> </ul>
- 显微镜术	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 降低力和位移的尺度</li> <li>- 过滤外科医生的震颤</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 开发出外科医生能够达到的精度极限的创新的术方法</li> </ul>

考虑到这些好处，只有很少数的原型机被 OR 或医疗机构所采用这一事实很令人惊讶。一些普遍的原因已经被提出，下面给出了其中 3 项最重要的原因。

- 成本问题：机器人系统的成本效益还没有被证明。几项反对的因素包括：OR 的成本被提高；需要一支技术团队；外科团队必须被培训；用于设置和“皮肤对皮肤”的时间比传统方法所需的时间更长。与 OR 混乱的环境的兼容性也需要被改善：机器人体积仍然较为庞大；通常来说，机器人的重量、尺寸和足迹与它所施加的力及其在手术中所覆盖的工作空间不成比例。

- 临床附加价值：如 IARP 在关于医疗机器人的技术研讨会的一项报告<sup>⊖</sup>中指出的那样，医疗附加价值必须得到改善：医疗机器人受到“鸡和蛋”现象的困扰，也就是说，系统需要在进行临床测试前被开发出来，但是只有通过临床测试才能证明它们的有效性和实用性……。

- 安全问题：医疗机器人是一个复杂的系统，它包括：①一个链接的电动机机械结构；②一个人机界面；③电子元器件；④一个软件控制器。这些部件在一个被约束的没有完全结构化的环境中，在病人的体内或体外，与外科医生合作，并有医务人员存在的情况下被用于执行手术操作。因此，可以很容易理解为什么系统失败或功能障碍非常关键<sup>[SAN 13b]</sup>。

这一分析推进了新一代机器人系统的开发，并伴随着 3 个主要的挑战<sup>[DOM 12b]</sup>：

- 成本：它们将比目前的系统体积更小，且更廉价。

- 人体工程学：为了将安装时间最小化，它们将像 OR 中大多数工具和设备一样即插即用。为了避免要求医疗人员具有某些特殊的技术技能，它们将很容易被使用。此外，传感器将可以被消毒，或是一次性的，并且高度集成到这些系统的结构中。

- 安全和医疗附加价值：它们将具有越来越少的侵入性，并且不会显著地延长干预的时间。此外，医生/机器人界面将被进行特殊设计，从而在确保操作安全性水平尽可能高的同时促进操作。

以上挑战（成本、人体工程学以及安全和医疗附加价值）暗示了将来的外科手术机器人应该更小，且专注于有限数目的功能，并且针对它们所需要完成的任务的复杂性，具有一定程度上适当的自主性。在任意手术或探索过程期间，不管情况如何，外科医生都必须保持对手势的控制。从这一观察可以理解，对于许多外科应用来说，将移动设备和传感器整合到体内而不是体外是有意义的。换句话说，与其用一个体外机器人对一个用了上千年的硬质设备（如剪刀或夹钳）

⊖ <http://www.nsf.gov/eng/roboticsorg/IARPMedicalRoboticsWorkshopReport.htm>。

## VI 体内机器人：从毫米级至纳米级

进行控制，不如开发在运动质量、安全性和与医生互动上，能够提供至少相同性能的体内机器人。

对于手术机器人提出的几个伦理问题，应该在设计过程中很早地得到解决。其中一些已经应用于涉及制药和医疗设备行业的法规。对于体内机器人，来自小型化的特定问题应该被解决，但它们目前还没有得到应有的关注。IEEE 机器人和自动化学会<sup>Ⓒ</sup>已经启动了一个关于机器人伦理的技术委员会<sup>Ⓓ</sup>，负责提供“关于机器人研究的伦理问题的框架”。2005~2012年，他们已经与 IEEE 机器人和自动化国际会议 (ICRA) 一起组织了一场专注于该话题的一年两次的研讨会。在 2013 年的 ICRA 上，举办了一场关于下一代机器人的法律、经济和社会伦理问题的研讨会<sup>Ⓔ</sup>。该研讨会是通过和 FP7 项目 RoboLaw<sup>Ⓜ</sup> 合作组织的。读者还可以参考 G. Veruggio<sup>Ⓖ</sup> 在欧洲机器人研究网络 (EURON) 框架中的首创倡议和 R. C. Arkin<sup>Ⓕ</sup> 在佐治亚理工学院的研究，作为这一话题的其他切入点。

虽然跨越皮肤的界限开启了新的临床界限，但需要克服一些技术上的障碍。这些障碍取决于被操作的生物对象的尺寸，包括器官、组织、细胞和细胞的内部组件。细胞的内部组件处在纳米尺度，而细胞大小大多数在  $100\mu\text{m}$  以下，通常为  $5\sim 10\mu\text{m}$ 。根据它们的大小，用来形容这些物体行为的物理准则是不同的：大的微观物体（例如  $100\mu\text{m}$ ）的动力学受惯性限制，而更小的物体（例如  $1\mu\text{m}$ ）的动力学受黏度限制。因此，将世界划分为以下 3 个层次更方便：

- 宏观世界由体积效应（惯性和重量）主宰。
- 微米世界里，体积效应（介电泳和磁泳）、表面效应（范德华力）和线性效应（粘滞力）相互平衡。
- 纳米世界由表面效应和线性效应主宰。

本书将考虑物体尺寸的 4 个尺度，这是由所遇到问题的类别，以及为了操纵物体和到达体内目标所需要实施的解决方案所决定的（注意，没有证据表明物体的尺寸和操纵它的设备的尺寸相关）：

- 毫米尺度（第 1 章）：物体的尺寸在几微米到几厘米之间，操纵组织所需的力在几微牛到几牛之间。大多数这个尺度下的机器人系统使用宏观世界的操作原理。

---

Ⓒ <http://www.ieee-ras.org/>。

Ⓓ <http://www.ieee-ras.org/robot-ethics>。

Ⓔ [http://www.robolaw.eu/ws\\_icra2013.htm](http://www.robolaw.eu/ws_icra2013.htm)。

Ⓜ <http://www.robolaw.eu/index.htm>。

Ⓖ <http://www.veruggio.it/>。

Ⓕ <http://www.cc.gatech.edu/aimosaic/faculty/arkin/>。



- 微米尺度 (第2章): 包含  $10\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$  的物体, 力在几十纳牛到几微牛的数量级。在磁场下或液体介质中, 游泳的原创操纵原理在此尺度下被验证。

- 亚微米尺度 (第3章): 处于  $100\text{nm} \sim 10\mu\text{m}$ , 力在几皮牛到几十纳牛之间。引入这一术语以划分这样一个尺度, 在这个尺度下与任何工具接触都有可能破坏该物体, 需要实施非接触式的操纵原理。

- 纳米尺度 (第4章): 在  $1\text{nm} \sim 100\text{nm}$ , 对于物体的操作仍然是一个挑战, 需要在范例上进行改变。正如将要讨论的, 该领域的进展将依赖于将生物、化学、机器人和更广泛的工程科学汇集起来的多学科的研究。

本书对上述的每一种尺度下的物理原理, 以及设计和控制体内机器人系统时, 科学和方法上必须克服的挑战进行了综述。在前三章中, 为了说明给外科医生和病人带来的预期好处, 对最突出的设备及最先进的原型机进行了描述。在第4章, 将讨论纳米机器人的前景。

下面来回顾一下机器人的定义, 即“一个可在两个或多个轴内编程的具有一定程度自主权的驱动机制, 在它的环境中运动, 从而执行预定的任务”(ISO 8373: 2012 文件)。使用机器人技术或机电一体化技术, 或机器人中所用到的部件, 但不能进行自主运动的设备应该被区别称呼(例如, 机器人系统、机械手和机器人定位器)。为了简化, 术语“机器人”将被更宽泛地用于任何可编程的、可遥控的或共同操作的设备。

# 目 录

译者序

原书前言

<b>第 1 章 体内毫米机器人</b> .....	1
1.1 简介 .....	1
1.2 原理 .....	1
1.2.1 具有主动远端活动性的部分体内设备 .....	2
1.2.2 体内机械手 .....	4
1.2.3 体内移动设备 .....	12
1.3 科学问题 .....	16
1.3.1 建模 .....	16
1.3.2 设计 .....	19
1.3.3 驱动与传输 .....	21
1.3.4 传感 .....	24
1.3.5 控制 .....	26
1.4 设备案例 .....	29
1.4.1 Araknes 项目的机器人平台 .....	30
1.4.2 由同心超弹性管制成的蛇形机器人 .....	34
1.4.3 MICRON: 用于眼科手术的手持式机器人设备 .....	37
1.5 小结 .....	41
<b>第 2 章 体内微米机器人</b> .....	42
2.1 简介 .....	42
2.2 体内机器人的新范例 .....	42
2.2.1 体内机器人的分类 .....	42
2.2.2 微米尺度下使用的物理原理 .....	43
2.3 方法 .....	49
2.3.1 模型 .....	50
2.3.2 设计 .....	53
2.3.3 驱动 .....	57
2.3.4 传感 .....	60
2.3.5 控制 .....	65

2.4 设备 .....	72
2.4.1 磁导式导管 .....	72
2.4.2 用于腔内显微嗓音外科手术的远末端移动设备 .....	73
2.4.3 自主的主动胶囊 .....	76
2.4.4 磁导式胶囊 .....	78
2.5 小结 .....	80
<b>第3章 体外非接触式亚微米机器人 .....</b>	<b>82</b>
3.1 简介 .....	82
3.2 原理 .....	83
3.2.1 介绍 .....	83
3.2.2 激光捕获 .....	85
3.2.3 静电原理 .....	89
3.3 科学挑战 .....	91
3.3.1 建模 .....	91
3.3.2 设计 .....	96
3.3.3 感知 .....	97
3.3.4 控制 .....	97
3.4 实验设备 .....	98
3.4.1 激光捕获 .....	98
3.4.2 DEP 系统 .....	103
3.5 小结 .....	109
<b>第4章 走向生物医用纳米机器人 .....</b>	<b>110</b>
4.1 应用上的挑战 .....	110
4.1.1 体外应用 .....	110
4.1.2 生物医用的纳米组装 .....	110
4.1.3 体内应用 .....	110
4.2 科学挑战 .....	111
4.2.1 去除科学间界限的新模式 .....	111
4.2.2 能量来源 .....	111
4.2.3 未来还有多远 .....	112
<b>参考文献 .....</b>	<b>113</b>

# 第 1 章 体内毫米机器人

## 1.1 简介

传统的手术机器人通常被安装在手术室（OR）的桌子旁边或病人身上，体内毫米机器人处在传统手术机器人的边缘。体内毫米机器人依然在体积力和力矩（例如重量）主宰的宏观世界里工作。这个命名是指具有部分的或全部的体内驱动自由度（DoF）的装置，它们的机体尺寸最大可以达到几十毫米。手术部位的尺寸从几毫米到几厘米，然而当毫米机器人可以移动时，它的工作空间可以达到几立方厘米。机器人作用在组织上的力从几微牛到几牛，牵引器官或夹持针的力可达几十牛。

在这个尺度下，许多原型机被开发出来，但是它们中只有极少数被引进了OR。在许多情况下，因为运用了刚体运动模型和基于视觉或力的控制算法，它们看起来很像传统的机器人。它们或多或少地可以被看作已有解决方案的小型化版本。

然而，为了符合环境的限制（生物组织、安全等）和任务的限制（进入较深的解剖空间、保护重要结构、高敏捷性等），很多努力被用在原创的以操纵和运动为目的的具有先进感应能力的运动学设计上。目前一个具有应用前景的方法是将机器人整合到设备中，而不是将机器人作为一个简单的设备架。

在 1.2 节中，将介绍一系列提供体内操纵和运动能力的毫米级设备。在 1.3 节中，将对毫米尺度下机器人特有的科学问题进行解决。这些问题涉及了机器人研究中有关建模、设计、驱动、传感和控制的主要领域。在 1.4 节中，将更具体地介绍毫米尺度下 3 个具有代表性的先进机器人系统：一个双叉臂式主—从系统、一个由同心管制成的蛇形机器人和一个手持式机器人设备。

## 1.2 原理

本节将介绍 3 类设备的原理：

- 具有主动远端活动性的部分体内设备；
- 体内机械手；
- 体内移动设备。

它们的目标包括功能探索（对于胶囊来说）和干预（去除息肉、放置支架、本地化递送药物等，但还包括传统手术中的切割、牵引、解剖和烧灼）。为了审查潜在的机器人解决方案的功能质量和限制，对于每个类别中的几个具有代表性的设备进行了重点介绍。对于世界上存在的更多原型机的更为全面的综述，读者可以参考文献 [DOM 12b]。

### 1.2.1 具有主动远端活动性的部分体内设备

对于这个称谓，是指那些为了提高外科医生或放射科医生的敏捷性或精准性而被修改的传统设备。例如，包括了任何在人体的入口和工具（拉钩、镊子、针驱动器以及内窥镜的前端）之间提供两个额外驱动自由度的设备，工具夹爪的闭合和打开不算在内。该部分体内设备通常被连接到一个外部设备，该外部设备可以是一个提供补充自由度的机器人。外科医生或是在联合操纵的模式下对其进行直接的外部驱动（见 1.3.5.3 节），或是在遥控模式下从一个主工作站对其进行外部驱动（见 1.3.5.2 节，图 1.1）。

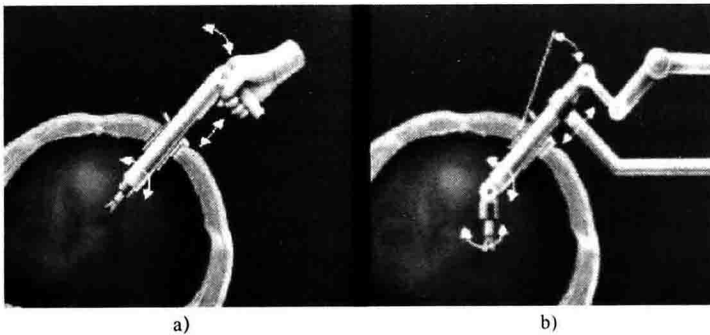


图 1.1 部分体内自由度

a) 联合操纵设备 b) 遥控设备<sup>[SAL 04]</sup>

有了这样一个定义，将用于内窥镜手术和导管的驱动设备划分到这一类。通常来说，这些设备的直径在腹部手术中被限制在 8 ~ 10mm，在心脏手术中被限制在 5 ~ 6mm，在宫内胎儿手术中被限制在 2.5 ~ 3mm<sup>[HAR 05, ZHA 09a]</sup>，在主动导管中被限制在 0.5 ~ 2mm。

#### 1.2.1.1 用于内窥镜手术的驱动设备

相对于开放式手术，内窥镜手术自 20 世纪 70 年代初期开始彻底改变了外科手术的做法。通常被称为微创手术（MIS）的内窥镜手术减小了术后伤口、降低了感染风险、缩短了恢复时间以及减少了治疗费用。但它也有几个缺点：由套管针所引起的运动上的约束导致了内部活动性的损失，由手部和工具前端的运动方向的反转导致手眼协调问题、力和触觉反馈的缺失、受限的工作空间以及外科医生的疲劳。

这些限制刺激了 OR 中的机器人的开发和引入。自 90 年代中期以来,主从式架构 [机器人系统 ZEUS (Computer Motion<sup>⊖</sup>) 和 Da Vinci (Intuitive Surgical<sup>⊖</sup>)] 已经被 MIS 所采用:设备由两个或三个从机器人手所携带,被外科医生从一个远程主控制台进行遥控。值得一提的类似的设备还有来自华盛顿大学的 Raven II 平台<sup>[HAN<sup>13</sup>]</sup>和来自 DLR 的 MiroSurge<sup>[HAG<sup>10</sup>]</sup>,它们被用于机器人手术的研究工作。

在这些系统中,每种设备的主动部分最多可能含有两个安装在一个刚性空心管远端的驱动自由度(不包括夹持器的驱动),该空心管用于通过驱动线,如图 1.2 左图所示。这样的额外的自由度也可能被安装在一个轻便的手持式系统的远端,如图 1.2 右图所示,这为外科医生提供了在不使用主臂的情况下对设备进行联合操纵的能力<sup>[ZAH<sup>10</sup>]</sup>。在这两种情况下,额外的平移和倾斜旋转补偿了通过套管针时造成的活动性上的损失。

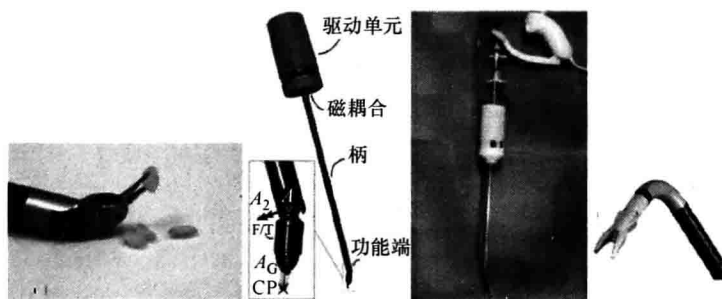


图 1.2 从左到右: Da Vinci Endowrist 尖端操纵米粒的特写; 用于内窥镜外科手术的 MIRO 平台的 DLR MICA 设备和装有一个力/力矩 (FT) 传感器的二自由度手腕的特写<sup>[HAG<sup>10</sup>]</sup>; EndoControl<sup>Ⓛ</sup>的手持腹腔镜设备 JaiMY<sup>[ZAH<sup>10</sup>]</sup>; JaiMY 的手腕的弯曲和旋转两个自由度的特写

Ⓛ <http://www.endocontrol-medical.com>。

### 1.2.1.2 驱动式导管

导管是一个细长(直径为几毫米,长度在米的数量级)的空心管,其中可以通过更小直径的功能性导管。这些功能性导管可能含有各种微型传感器(压强、超声探头、光纤等)或设备,例如用于局部用药、插入假体(支架、血管成形术球囊等)、动脉瘤血管内卷曲、以诊断为目的的穿刺/活检或肿瘤破坏(射频消除术、激光治疗等)<sup>[CHA<sup>00</sup>]</sup>的设备。导管通常被插入处在腹股沟位置的动脉。在影像学的控制下,医生通过绕其纵轴旋转而进行导向,将其推送到目的

⊖ 自 2003 年与 Intuitive Surgical 合并。

Ⓛ <http://www.intuitivesurgical.com>。

地。因为血管的狭窄、血管壁上的摩擦以及众多的分叉，这一操作比较困难。对于外科医生来说，困难在于在避免刺破动脉的前提下，在很小或无相关动觉反馈，以及受限的和稀少的视觉反馈（限制辐射剂量）的情况下，将力和动作传递给末端的执行器。

一个主动导管在图 1.3 中给出<sup>[SZE 11]</sup>。它被赋予了在具有限制性方向（包括非常急性的闭角）的分叉中的导向能力。主动导管和遥控机器人结肠镜有着一些相似性，然而主动导管的直径几乎低了一个数量级，通常为 1~2mm（对于指引导管来说，直径可以降低至 0.5~1mm）。其他的不同以及主要的困难是，导管必须在动脉中移动，而在动脉中压强和血液流的作用非常重要。在过去的 10 年中，很多主动导管的原型机被开发出来，其中很多驱动理念被进行了探索，这将在 1.3.3 节中介绍。

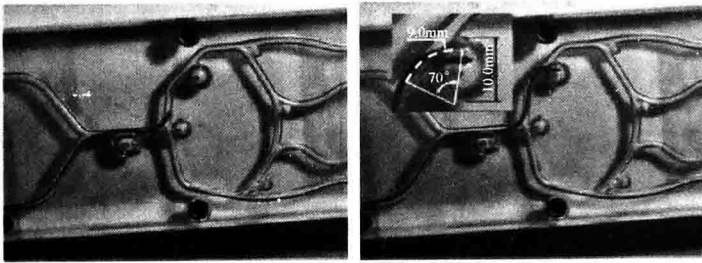


图 1.3 一个主动导管在 Willis 多边形中的动脉瘤仿真中进行导航（ $\phi 1.1\text{mm}$ ，曲率半径 = 9mm）<sup>[SZE 11]</sup>

为了避免外科医生受到辐射，可以使用允许医生对导管进行远程控制的主—从系统，例如由 Hansen Medical<sup>⊖</sup>销售的 Sensei X Robotic System 和更新的一款 Magellan Robotic System，或者来自 Catheter Robotics<sup>⊖</sup>的 Amigo RSC。这些系统提供了一个转向装置，可以推动并允许导管尖端进行双向旋转。

### 1.2.2 体内机械手

把一切为位于人体的入口和工具之间具有驱动自由度的工具提供全部（或至少大于 2）的活动性的任何设备称为体内机械手。这些设备可以是设计用于进行无疤手术新技术的微型机械手（传统机器人手臂的缩小版本）或柔性设备。在此类中，还包括了旨在在体内进行组装和拆解（或者可能的展开和收起）机器人和平台的模块化方法。

⊖ <http://www.hansenmedical.com>。

⊖ [www.catheterrobotics.com/rcs-main.htm](http://www.catheterrobotics.com/rcs-main.htm)。

### 1.2.2.1 微型机械手

通常来说,微型机械手有着厘米级的尺寸,产生亚毫米到厘米级的位移,可以施加从 1N (例如将针插入冠状动脉) 到用于牵引组织的几十牛的力。在设计中可以采用以下 3 种不同的选项:

- 具有嵌入式驱动器的离散式架构;
- 具有远程驱动器 (在病人体外) 的离散式架构;
- 具有远程驱动器的连续式架构 (蛇形或象鼻形架构)。

离散式架构具有有限数目的刚性连接和离散关节。图 1.4 中给出<sup>[LEH 08, TIW 10]</sup>了被设计用于自然腔道内镜手术 (NOTES, 见 1.2.2.2 节) 的具有嵌入式驱动器的这类机器人的一个例子: 它包含两个棱柱形臂, 每个臂通过一个旋转接头连接到一个中央机体上, 共提供 4 平面自由度。每个臂上装有一个抓钳或一个烧灼末端执行器。中央机体包含一个立体摄像头对和磁铁, 该磁铁用于与外部磁铁发生相互作用, 从而将机器人固定在内腹壁上。它被利用一个套管通过食道插入到腹腔中, 插入时手臂与中央机体处于分开的状态。

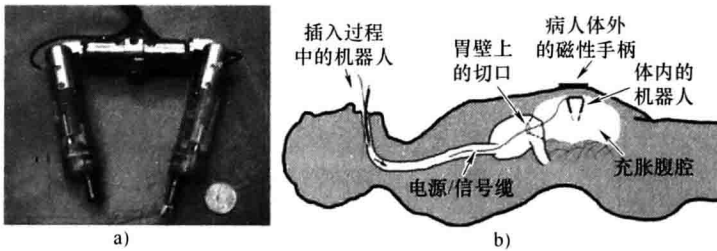


图 1.4 a) 来自范德堡大学的灵巧的体内双臂机器人和 b) NOTES 步骤<sup>[LEH 08, TIW 10]</sup>

另一个例子是模块化机器人 DRIMIS<sup>[SAL 04]</sup>, 如图 1.5a 所示, 这是利用多目标进化算法对程序进行优化, 再加上对预期的外科手术任务进行现实模拟 (冠状动脉旁路移植中的吻合) 的结果。几种具有不同的轴组织的一自由度和二自由度的模块 ( $\phi 10\text{mm}$ , 长度为 25 ~ 40mm) 被设计出来。通常来说, 一个六自由度手臂的长度为 120mm。

双臂机器人 SPRINT 的手臂具有相似的运动学原理。该平台在欧盟第七框架计划 Araknes 项目<sup>○</sup>框架中被开发出来<sup>[PIC 10, SAN 11]</sup>, 如图 1.5b 所示。SPRINT 的每个手臂具有 6 个自由度和夹持器, 4 额外的自由度由外部定位装置提供。目前版本的尺寸是直径为 18mm, 长度为 120mm。它可以施加最高 5N 的力。该机器人预期在单孔 (SPA) 手术中被连接在肚脐入口处 (见 1.2.2.2 节)。对于该系统

○ <http://www.araknes.org/home.html>。



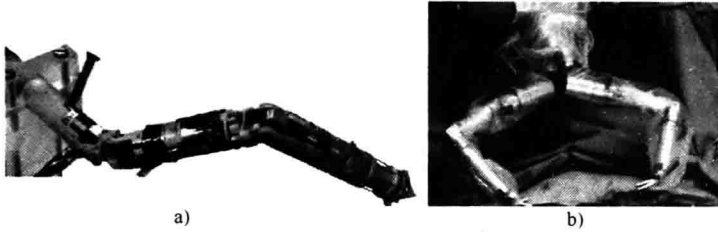
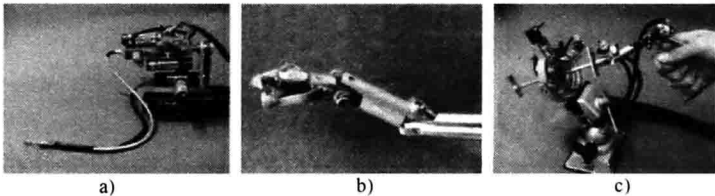


图 1.5 具有刚性连接和离散关节的架构

a) DRIMIS (ISIR)<sup>[SAL 04]</sup> b) SPRINT (Araknes 项目)<sup>[PIC 10, SAN 11]</sup>

的详细描述在 1.4.1 节中给出。

当微型驱动器被嵌入到结构中时，一个问题是电缆的布线，另一个问题是这个尺寸下可用的驱动器都具有较小的功率—重量比，这严重地限制了机器人能够施加到组织上的力。后者对于远程驱动器来说不再是问题。然而，远程驱动器意味着使用机械线来驱动关节，这比布线电缆更需要技巧。由 Ikuta 等人<sup>[IKU 03]</sup>设计的这类架构的一个例子在图 1.6 中给出：Hyper Finger (Mark-3) 是一个用于腹腔镜手术的 7 自由度（包括镊子的夹取动作）电线驱动的主动镊子（ $\varnothing 10\text{mm}$ ）。一个特殊的分离的 2 自由度“环联”机制被开发出来，其中每个自由度可以被独立驱动。它被通过一个类似的 7 自由度的拇指进行遥控。

图 1.6 Hyper Finger<sup>[IKU 03]</sup>

a) 处在一个导管末端的 7 自由度从机械手 b) 7 自由度机械手的特写 c) 主机械手

对于前面提到的离散式微型机械手的一个有趣的替代是连续型机器人。它们在具有可比的性能参数的同时具有更小的外径<sup>[XU 12]</sup>。它们或多或少地对弯曲型主动导管前端的设计进行了扩展。驱动器被放在病人的体外，对不同技术的电缆或“肌腱”进行扯拉，从而控制分布式的刚度和曲率，这部分内容将在 1.3.3 节中讨论。Zhang 等人<sup>[ZHA 11]</sup>为胎儿手术设计了一种 6 自由度电线驱动的机械手，该设备被用于治疗先天性膈疝，即在胎儿的气管里放置一个可拆卸的硅胶气球。该机器人由 3 个单元组成，每一个单元具有两个自由度。机器人的直径为 2.4mm，接触力被控制在小于 0.3N。

为了在有限的操作空间导航，避开重要的器官和危险的区域，更高数目的自