

第 1 章 绪 论

1.1 选题背景与研究意义

宋朝僧人志南留下的“沾衣欲湿杏花雨，吹面不寒杨柳风”绝美诗句，不仅将初春时节和风细雨描绘得细致入微，更是写出了人体皮肤细腻的触觉感知能力。触觉是我们与环境交互的重要方式。因为触觉的存在，人才能够感知物体材质和旁人触摸，也能够感知本体的运动和对物体的操纵；凭借后者，人类实现了直立行走、使用工具的进化道路，完成了钻木取火、刀耕火种的文明进程。触觉对每个人来说是如此常见，但人们对触觉机理的研究认识直到今天还在持续。2021 年 10 月，美国科学家 David Julius 和 Ardem Patapoutian 因为“发现温度和触觉受体”而被授予诺贝尔生理学或医学奖^[1]，如图 1.1 所示。他们的重要研究成果之一便是发现了外界刺激在神经系统中形成电信号的媒介和过程，揭示了触觉形成的重要生理机制。



图 1.1 2021 年诺贝尔生理学或医学奖授予温度和触觉受体的发现者

注：图片改自诺贝尔奖介绍页^[1]

触觉研究之所以获得重要关注,一方面是因为触觉是人的重要生理功能,是人进行物体辨识、躯体运动、物品操纵的重要基础。认知心理学的研究发现,触觉交互是人认知发育的重要环节^[2],触觉异常则可能导致应激性相关的神经疾病^[3-4]。另一方面,触觉研究的现实技术需求也在与日俱增,触觉机理研究是触觉评价的基础,也是发展触觉感知、触觉复现等人机交互技术的关键,如图 1.2 所示。例如,产品的外形质感会显著影响人的情绪和感受,触控设备的触觉交互体验是评价其性能的重要指标,因此,以提高商品触觉品质为目标的人因工程研究逐渐受到关注。近年来兴起的元宇宙(metaverse)概念希望借助技术手段构建与现实世界映射和交互的虚拟现实(virtual reality, VR)数字空间,实现这一目标的重要媒介是 VR 辅助设备。理想的 VR 辅助设备不仅要营造视觉的环绕体验,更需要实现触觉的复现才能真正做到身临其境。再比如不断发展的智能假肢系统,其不仅要捕捉人的生理信号以便进行假肢控制,还要具备灵敏和全面的末端触觉感知能力,通过这样的双向反馈使假肢真正成为患者身体的延伸^[5]。



图 1.2 触觉研究的意义以及科技领域的典型应用需求

触觉研究对智能机器人技术发展同样有着举足轻重的作用。《中国制造 2025》规划中指出^[6],智能机器人核心技术是应对新一轮科技革命和产业变革的关键,并对新一代智能机器人的信息融合能力、智能感知能力、灵活操作能力和人机协同交互能力提出了更高要求。可以预见,触觉感知技术是机器人实现灵巧性、交互性和智能化的重要基础。类似地,美、德、日等制造业强国也都提出了各自的机器人发展战略。其中比较有代表性的是,在美国计算社区联盟支持下,美国工业界和学术界在 2009 年联合制定了

《机器人发展路线图：从互联网到机器人》(以下简称路线图)^[7]，对未来5~15年内机器人技术在制造业、服务业、医疗等领域的重要推动作用进行了详细探讨。该路线图2016年和2020年的更新版本中都对机器人操作能力提出了远景目标，即依靠精细的触觉感知和优异的动力学性能实现媲美人类的灵巧操作能力，如图1.3所示。如今，以电子皮肤技术为代表的触觉感知技术不断发展，力求实现类似人的触觉感知能力。但是，目前的触觉感知技术在灵敏性、准确性和功能性等方面与人的触觉功能仍有较大差距。对人的触觉产生机理和人手抓取操作行为规律的深入研究，将极大启发和促进触觉传感技术和机器人灵巧操作技术的发展。

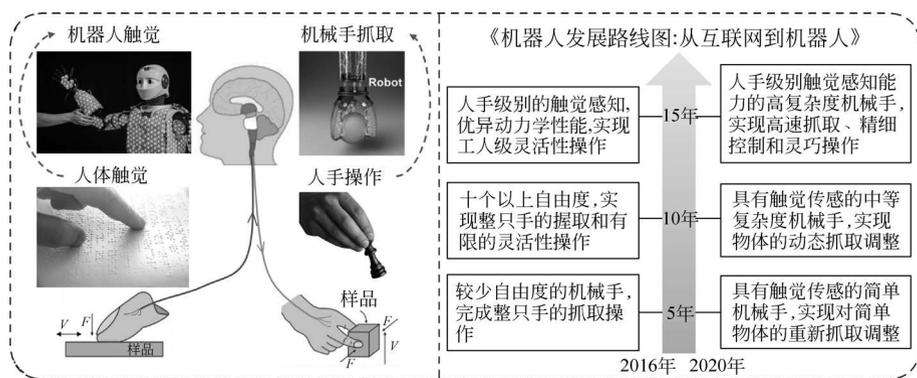


图 1.3 触觉感知反馈在智能机器人灵巧抓取中的关键作用

目前,生物学、神经科学和心理学等领域对触觉的分子生物学机理、神经生理学基础和行为学规律已经开展了比较系统的研究,但是对手指皮肤接触物体到形成触觉的力学过程关注不足,特别是力学信号与触觉感知之间的关系仍然不够明确,因而无法对触觉传感、触感评价及智能机器人技术的发展提供有效指导^[8]。事实上,手指皮肤与物体表面接触摩擦是触觉形成的力学基础。当手指与物体表面发生接触和相对运动时,接触界面形成具有一定空间时间分布特征的法向应力和切向应力。这些力学特征经过皮肤中触觉感受器编码产生神经信号,经神经系统传递到大脑皮层,经过大脑的解码加工形成人的触觉感受,如图1.4所示。当人抓取物体时,人手通过感知接触界面摩擦状态,及时调控抓取所需的摩擦力,从而保证对各种物体的快速、精确、稳定的抓取和操纵。由此可知,皮肤界面的力学信息是触觉信息的本质来源,手指对摩擦状态的感知是人手实现灵巧抓取的关键。

因此,研究手指的摩擦触觉感知机理,不仅可以揭示触觉形成的界面力

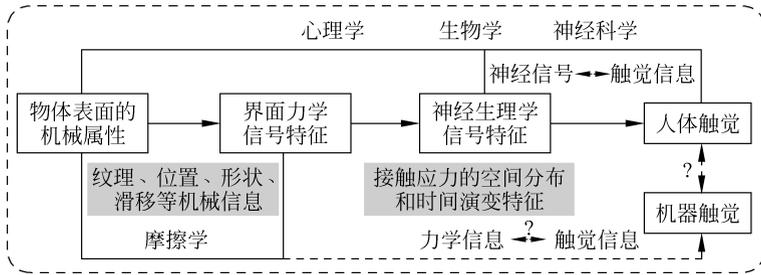


图 1.4 界面摩擦行为是触觉形成的力学基础

学机制,还能够构建生物触觉研究和机器触觉研究的重要桥梁,这对于先进机器触觉和灵巧操作研究具有重要指导意义,其衍生技术对于人机交互、智能机器人的发展具有重要推动作用。本章后续内容将围绕摩擦触觉感知机理与灵巧抓取应用的主题,对国内外研究现状进行介绍。首先对触觉产生的生理学机理、触觉与摩擦的相关性研究、抓取过程的触觉反馈机理进行介绍,其次对干、湿状态的摩擦学现象和机理进行介绍,再次介绍受人体触觉启发的典型触觉传感技术和灵巧手应用研究,最后分析梳理了现有工作存在的不足和本书的主要研究内容。

1.2 人体触觉感知机理研究进展

生物学和神经科学领域对触觉形成的生化基础有着系统和广泛的研究。本节主要关注与界面力学行为关系密切的触觉感受器响应机制、抓取触觉反馈和触觉摩擦相关性的研究进展。

1.2.1 触觉的生理学基础

人们对触觉的认识是一个漫长的过程。17世纪,哲学家笛卡尔提出皮肤的不同部位上有“线条”与大脑相连,因此当人用一只脚靠近明火时,人体皮肤就会通过这些“线条”向大脑发送一个温度信号^[1],如图 1.5(a)所示。这样的朴素假设与后来的生物学研究中神经传导的动作电位机制不谋而合。1944年,美国两位生理学家 Joseph Erlanger 教授和 Herbert Gasser 教授也因不同类型的感觉神经纤维的发现而获得了诺贝尔生理学或医学奖。除了神经传导机制,不同类型的触觉感受器如何对不同环境刺激产生反应也是理解触觉形成机理的关键,这正是 2021 年两位诺贝尔奖得主的重

要贡献。20世纪末,David Julius 教授^[9]利用辣椒素发现了皮肤神经末梢中对热反应的通道蛋白 TRPV1,随后他^[10]又和 Ardem Patapoutian 教授^[11]分别独立地用薄荷醇发现了对寒冷响应的受体蛋白 TRPM8。后来,Ardem Patapoutian 教授^[12]用压敏细胞发现了对机械刺激响应的一系列离子通道蛋白,并将其命名为 Piezo,如图 1.5(b)所示。这些突破性的发现让我们对神经系统如何感知热、冷和机械刺激有了更深入的认识,但对于这些通道蛋白的详细响应机制仍然缺乏了解。伴随着冷冻电镜技术的突破,2015年,清华大学杨茂君、肖百龙等^[13]科学家率先解析了机械力离子通道 Piezo 蛋白家族的高分辨率三维结构,并在随后的一系列研究中揭示了其精妙的三聚体三叶螺旋桨结构是 Piezo 蛋白能够响应局部机械力和远程机械力的重要基础^[14],如图 1.5(c)所示。这些神经科学和生物学研究深刻揭示了人体触觉产生的分子基础。

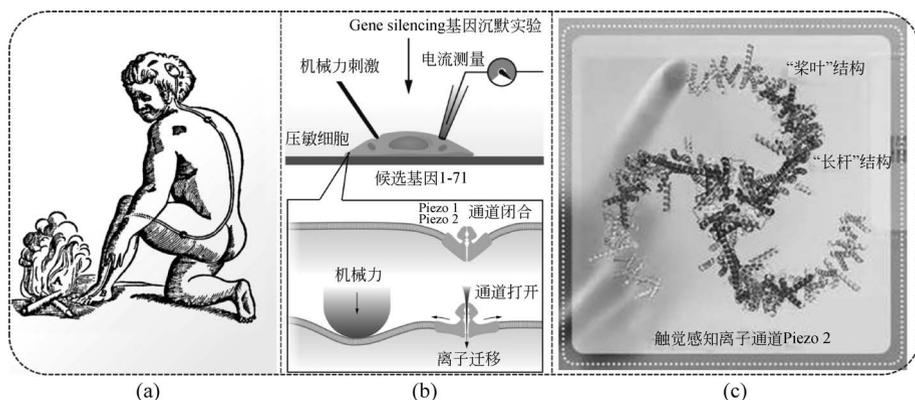


图 1.5 触觉的神经科学和分子机理典型研究

(a) 笛卡尔对神经传导的设想^[1]; (b) 触觉 Piezo 蛋白发现实验^[1]; (c) 触觉 Piezo 蛋白的典型分子结构^[14]

人体的触觉形成过程,本质上是信息转译的过程^[15]。不过,不同于视觉、听觉等感官功能对外界物理信息的直接响应,触觉的形成依赖于人与物体的交互作用。正如触觉研究的先驱 Katz^[16]所描述的“它们(触觉)保持沉默直到我们让它们说话……色彩的产生不依赖眼球运动,但触觉的产生却需要手指的运动”。当人手接触物体时,物体的粗糙、软硬、形状、温度等机械属性通过界面的力或温度传递到皮肤,这些物理量被人体神经系统转译编码为神经信号;这些神经信号传递到大脑,经大脑皮层整合解码,人体

得以对物体触觉信息进行感知。其中,人体皮肤中能够对接力信息进行编码的生理学基础是触觉感受器。神经科学研究表明,在人的皮肤中存在着4种不同形态和结构特征的触觉力感受器^[15]:根据响应速度分为快速适应(fast adapting,FA)型和慢速适应(slow adapting,SA)型,根据感受野大小分为I型(小)和II型(大),如图1.6所示。其中,帕西尼氏小体(Pacinian cell,FA-II)主要感受高频率(40~500 Hz)的振动和皮肤的突然位移;梅克尔盘(Merkel disk,SA-I)主要响应低频接触(1~16 Hz/0.4~3 Hz)和切向受力,空间分辨率可达0.5 mm;麦斯纳小体(Meissner corpuscle,FA-I),主要感受低频率(2~60 Hz)振动和皮肤的突然位移;鲁菲尼终末(Ruffini ending,SA-II)主要响应皮肤的拉扯(100~500 Hz)。这些机械触觉感受器具有不同的感受野和不同敏感频率,能够响应不同类型的机械刺激。例如,SA-I与手指的两点识别能力有关,FA-II与人操作物体时接触感知有关。

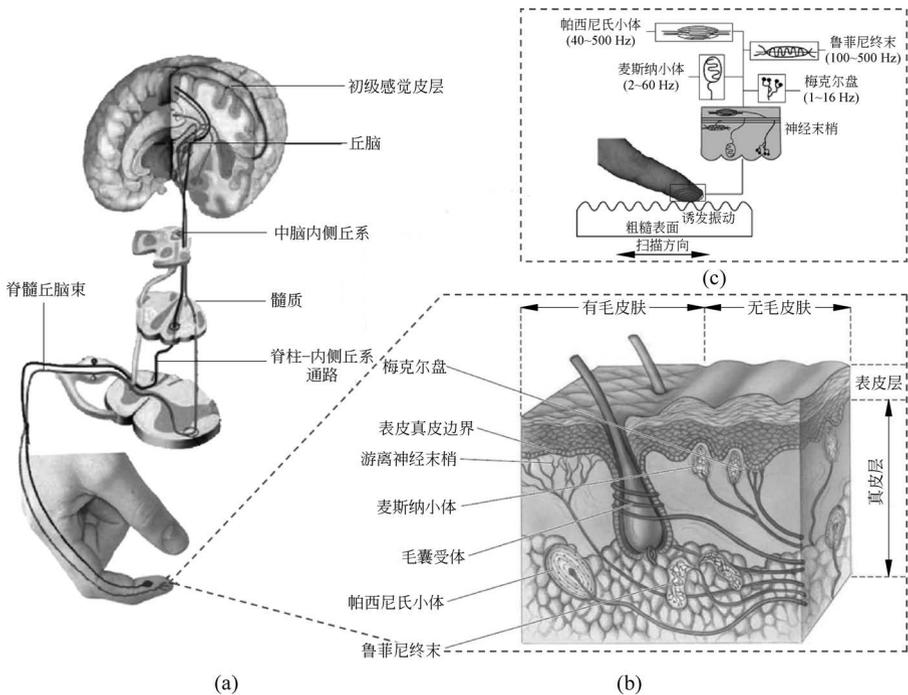


图 1.6 触觉产生的生理学基础

(a) 触觉神经传导路径^[8]; (b) 皮肤的组成^[17]; (c) 四种机械传感器示意图^[18]

人的机械触觉感受器在皮肤和内脏中都有广泛分布,其中在鼻、口唇和指尖分布密度最高也最灵敏,加上手指的灵活性和功能性,因此人们常用手指进行表面触觉感知。对于大尺度的轮廓特征,人们往往会借助梅克尔盘(SA-I)精细的接触感知能力,通过手指的探索性动作和同步定位建图原理对物体的三维形状进行识别。对于小尺度的表面纹理特征,Katz^[16]在1925年提出了二维感知理论,即粗糙纹理的辨别属于静态空间属性,而精细表面的纹理辨识则依赖手指运动的振动属性。这一理论被 Hollins 等^[19]预加振动的手指触觉感知实验所证实,并解释了这种振动感知与帕西尼氏小体(FA-II)的频率响应特性有关,如图 1.7(a)所示。他们还确定了 200 μm 的空间周期是区分粗糙表面和精细表面的界限。手指指纹也被认为在精细触觉感知中具有重要意义,Fagiani 等^[18]发现手指摩擦过程的振动信号与指纹宽度有直接关系,如图 1.7(b)所示;Scheibert 等^[20]则通过人造手指的模拟实验证明手指指纹引起的振动主频与帕西尼氏小体最佳响应频率一致,如图 1.7(c)所示。目前的大量生理学和心理学研究已经初步揭示了手指粗糙触觉感知的生理学基础,但对诱发触觉响应的界面力学信息尚缺少更多关注和系统研究。

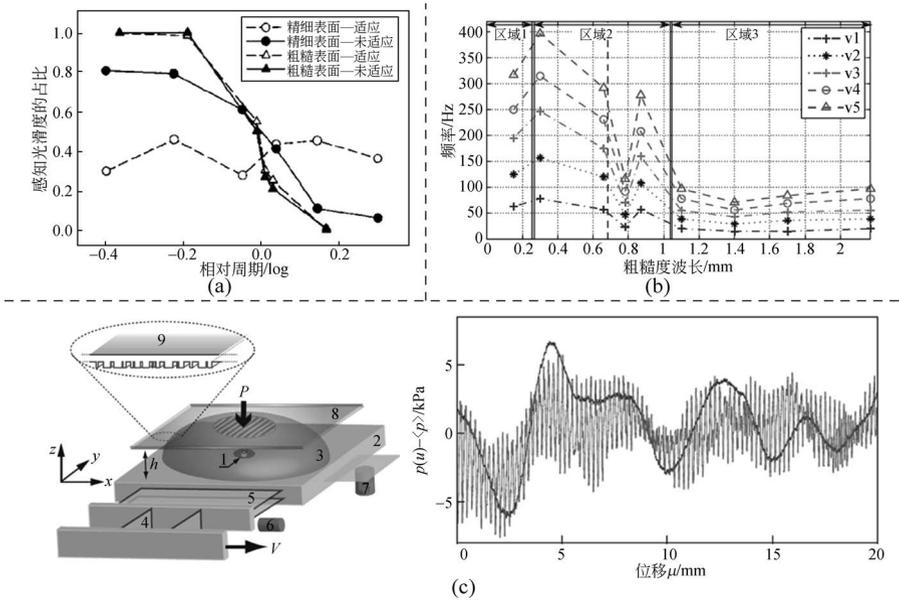


图 1.7 粗糙感知与振动的关系

(a) 预加振动可以弱化精细表面粗糙感知能力^[19]; (b) 振动信号受扫描速度和指纹宽度影响^[18]; (c) 人造手指的指纹有助于高频振动产生^[20]

1.2.2 抓取过程的触觉反馈

人们很早就关注到触觉反馈在人手抓取物体过程中的作用。Johansson 等^[21]设计了一种经典的抓取实验范式,如图 1.8(a)所示,实验者在不被告知实验目的的情况下,用拇指和食指抓取一个安装有力传感器的重物。通过同步记录法向抓取力、纵向载荷力及传入神经的活跃情况,可以将人手的抓取过程分为七个阶段^[22]:预加载、加载、过渡、保持、放置、卸载和释放,如图 1.8(b)中 a~g 的区域所示。当手指接触到物体表面时,FA-I 和 FA-II 感受器响应作为接触标识,人手随后进行加载提拉操作;当物体离开支撑表面时,FA-II 感受器再度出现响应,释放物体离开桌面的信号,抓取力不再增加并趋于稳定;当需要将物品放回桌子上时,FA-II 感受器在物体与桌面接触时再次响应,人手开始执行卸载动作。在整个抓取力施加过程,慢适应的 SA-I 和 SA-II 感受器都处于响应状态,其中前者可以感受接触区的精确受力情况,因此在加卸载过程响应更加强烈;后者则主要感受皮肤的切向拉伸,在切向力最大的保持阶段相对强烈。

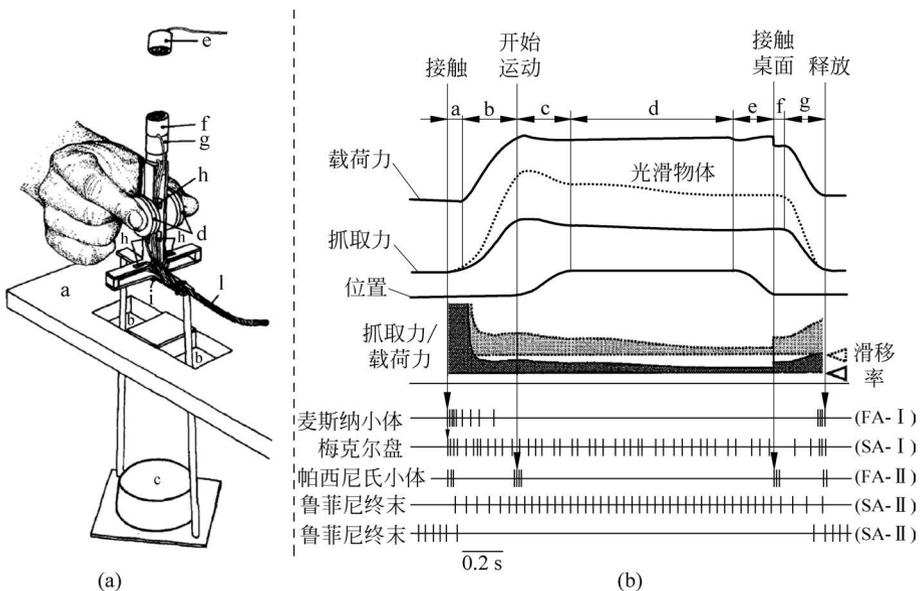


图 1.8 人手抓取过程的触觉感知研究

(a) 经典抓取力测量装置^[21]; (b) 抓取过程的典型抓取力曲线和触觉响应^[22]

人手的灵巧抓取行为的表现之一是对不同重量和不同摩擦状态物体的

适应性抓取能力。Johansson 和 Edin^[22] 发现人在抓取之前会根据视觉信息和先前经验设定一个预期加载力曲线,当实际负载重量与预期不同时,会执行纠错程序(调整加载力)直到回到预期位置。Jenmalm 等^[23] 利用核磁共振成像手段证实这一纠错机制与小脑和大脑运动皮层的活动有关。一般情况下,相同表面不同重量的物体抓取力的加载速率是一致的。对于不同光滑程度的物体表面,越光滑的表面施加的抓取力越大,抓取力的加载速率也更高;为了避免过载,最终的加载力往往只是达到略高于避免滑移所需的临界加载力^[15]。为了确定表面粗糙程度和摩擦系数哪种物理信息对抓取反馈起了决定性作用,Cadoret 等^[24] 同时改变织构和摩擦系数,发现界面摩擦系数是影响抓取力加载曲线的主要因素,平均抓取力和发生滑移的临界抓取力与摩擦系数的倒数呈线性关系,如图 1.9(a)所示。研究人员进一步推测,相对光滑表面的接触区域存在更多的局部滑移和蠕变,如图 1.9(b)所示。这种滑移和蠕变事件可以强烈地激发 FA-I 神经响应,是触觉神经进行摩擦编码和反馈控制的基础。这一观点与人造手指的多点接触实验结果相吻合^[15]。然而,由于缺少人手接触滑移过程的直接实验结果,人手感知和判断界面摩擦状态的力学机制仍需更多实证。

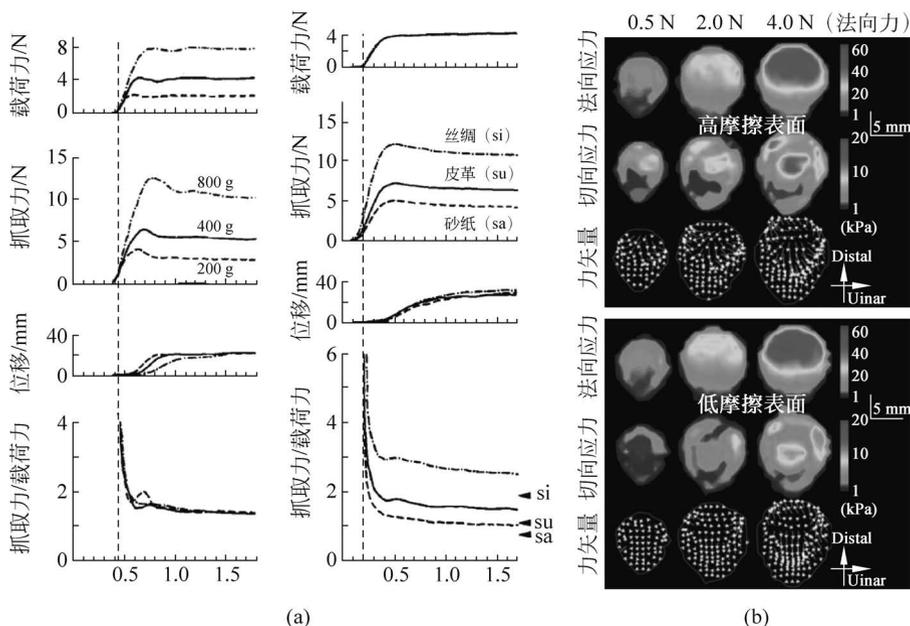


图 1.9 不同物体的抓取行为(见文前彩图)

(a) 不同重量和光滑程度表面的抓取力曲线^[24]; (b) 探针实验得到的不同表面接触力分布^[15]

除了正常的抓取加载操作外, 滑移信息常作为抓取临近失败的重要反馈和加载纠错指示信号。Srinivasan 等^[25]研究表明, FA-I 和 FA-II 信号是检测指尖滑动和新物体接触的主要信息来源, 通过滑动信息的监测是抓取过程抗干扰能力的重要保证。由此可知, 人手皮肤中一系列的触觉响应机制是识别手与物体接触/分离、与桌面的分离/接触、拉伸、滑移等信息的关键, 触觉感知能力和纠错反应是人类能够熟练安全地操纵各种各样的物体的保证。但受实验手段的限制, 目前人们对抓取过程的界面力学反馈机制缺少系统研究, 特别是对应力空间分布特征和时间演化规律所蕴含的接触和摩擦状态信息缺少深入认识。

1.2.3 摩擦触觉的相关性研究

皮肤接触物体并相对滑动过程会在界面产生法向应力和切向摩擦力, 这些具有空间分布和时间演变特征的力学信号被皮肤中的触觉感受器编码进而形成触觉。为了阐明界面摩擦与触觉感知之间的相关性, 触觉摩擦(tactile friction)研究逐渐兴起, 其目标是以界面摩擦力学信息为媒介, 构建人体感受与物体表面属性之间的桥梁。Lederman 等^[26]在早期研究中使用较粗糙的纹理(空间周期大于 0.5 mm)开展粗糙感知实验, 发现空间周期和法向接触力决定了粗糙度的感知, 与切向力无关。但是 Smith 等^[20]后续在实验中发现, 感知的粗糙度虽然与切向摩擦力的均值大小没有显著关系, 但与其波动幅值具有强的相关性。作为验证, 如果不改变表面结构, 但是通过加入润滑剂降低切向力幅值的均方根, 也可以有效降低感知的粗糙度, 如图 1.10(a)所示。Bensmaïa 和 Hollins^[27]的研究进一步表明, 由帕西尼小体感知到的摩擦振动的能量在粗糙度感知中起着不可或缺的作用, 这也是后来的研究者将力学信号关注点由力的幅值转向力引起振动的原因。Tang 等^[28]利用人造手指研究触觉感知过程中皮肤的振动和摩擦信号, 提取了八个与振动和摩擦系数相关的特征值来表示触觉感知。Ding 等^[29]同样利用人造手指和合成皮肤研究了护肤霜对皮肤摩擦学特性的影响, 发现护肤霜能够显著降低摩擦力波动和振动, 从而产生光滑的触觉感受。

早期触觉摩擦研究中对触觉的描述多依靠主观描述, 缺少相对量化的描述方法。基于脑电图(electroencephalography, EEG)、皮肤电、功能型近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)脑成像等生理实验法在认知心理学等领域有着广泛应用, 这些生理学手段能够对外界刺激