

柔性革命：关于现代康复机器人灵巧化、智能化与临床影响的综合报告

1.0 执行摘要

康复机器人领域正在经历一场深刻的范式革命，其核心是从传统的刚性、以机器为中心的系统，向柔性、以人为本的系统的根本性转变。这一变革并非偶然的技术迭代，而是由迫切的临床需求驱动，并通过软体材料科学、柔顺驱动、智能传感和人工智能（AI）驱动的控制策略等多学科交叉融合的进步所实现的。本报告旨在全面、深入地剖析这一变革的全貌，为技术开发者、临床医生、行业投资者和政策制定者提供一份详尽的参考。

报告的核心论点是：康复机器人的“柔性化”与“灵巧化”是实现更安全、更有效、更个性化神经康复治疗的必由之路。传统的刚性机器人因其固有的重量、体积、高刚度和安全性问题，在与人体交互时存在诸多限制，难以满足神经可塑性原理所要求的高强度、高重复性、任务导向的训练需求。柔性康复机器人，特别是采用柔顺材料和驱动器的软体机器人，通过模拟生物组织的机械特性，从根本上解决了人机交互的安全性和舒适性问题，使得将康复训练从临床环境延伸至家庭成为可能。

技术层面，本报告详细分析了支撑这场革命的核心技术，包括柔性聚合物、自愈合材料等先进材料，气动人工肌肉、线驱动和变刚度驱动器等柔顺驱动系统，以及用于意图识别和反馈的柔性生物与物理传感器。在智能化层面，报告阐述了人工智能和机器学习如何在自适应控制，特别是“按需辅助”（Assist-as-Needed, AAN）范式中发挥关键作用，使机器人能够根据患者的实时状态动态调整辅助力度。此外，报告深入探讨了脑机接口（BCI）

技术作为终极人机交互方式的整合，它通过解码大脑运动意图，构建了“外周-中枢-外周”的闭环神经康复通路，极大地提升了患者的主动参与度和神经可塑性诱导效果。

临床应用方面，本报告系统性地梳理并综合了大量临床试验的证据。荟萃分析（meta-analysis）结果明确显示，与传统疗法相比，基于软体机器人的干预能够显著改善脑卒中、脊髓损伤等神经损伤患者的运动功能。例如，软体手套可显著提升上肢 Fugl-Meyer 评分（FMA），而柔性外骨骼则能有效改善患者的步行速度、耐力和平衡能力。这些积极的临床数据为该技术的有效性提供了强有力的支持。

产业与市场方面，柔性康复机器人正催生一个充满活力且快速增长的商业生态。本报告剖析了全球市场的规模、增长预测和关键细分领域，并对傅利叶智能（Fourier Intelligence）、司羿智能（Syrebo）和 Imago Rehab 等关键企业进行了深度画像。分析揭示了两种主要的商业模式正在形成：“平台生态系统”模式和“远程康复服务”模式，这为投资和战略决策提供了重要参考。

然而，挑战依然存在。报告也系统地指出了当前技术面临的瓶颈，包括材料的耐久性、驱动器的功率密度、传感器的鲁棒性、控制算法的泛化能力，以及临床评估标准的缺失。克服这些瓶颈是实现技术广泛应用的关键。

最后，本报告展望了康复机器人的未来发展方向，即朝着更加无感、可穿戴、智能化和普适化的共生系统演进。未来的康复将不再局限于固定的治疗时段，而是无缝融入患者的日常生活，提供持续、个性化、数据驱动的康复支持。基于此，报告为科研人员、临床医生、产业领袖和政策制定者提出了一系列战略性建议，旨在协同推动这一变革性技术的发展，最终造福全球数以千万计的神经功能障碍患者。

2.0 范式革命：从刚性约束到柔性共生

康复机器人领域的发展正处在一个关键的转折点，其核心特征是从第一代基于刚性连杆和电机的传统机器人，向新一代基于柔顺材料和仿生设计的软体机器人的演进。这场变革并非简单的技术升级，而是一场深刻的理念转变——从以机器为中心、强制执行预设轨迹的模式，转变为以人为中心、协同适应用户意图的共生模式。理解这一转变的驱动力，首先需要剖析传统刚性机器人在康复应用中固有的局限性。

2.1 传统刚性康复机器人的固有局限：安全性、适应性与人机交互的挑战分析

第一代康复机器人，尽管在自动化重复性训练方面展现了潜力，但其设计理念源于工业机器人，大多由金属或硬质塑料等高刚度材料构成，这在与脆弱、多变的人体交互时，暴露出一系列难以克服的根本性问题¹。

安全性与舒适性问题：最核心的挑战在于人机交互的安全性。刚性机器人的高杨氏模量与柔软的生物组织之间存在巨大的机械失配²。这种失配意味着机器人缺乏固有的柔顺性，当患者出现痉挛等非预期运动时，刚性连杆会产生巨大的反作用力，不仅让患者感到被限制、不适甚至疼痛，更有可能造成二次伤害⁵。研究明确指出，机器人设计中柔顺驱动器的缺失，是造成人机交互安全问题的根本原因之一⁷。

适应性与关节对齐问题：刚性外骨骼通常采用“一刀切”的设计，难以适应不同患者的身体尺寸和形态差异⁸。更严重的是，在运动过程中，机器人关节的旋转中心很难与人体的解剖学关节中心时刻保持精确对齐。这种失准会产生不必要的约束力，干扰患者自然的运动模式，增加额外的代谢消耗，并最终影响康复效果²。

控制复杂性与“虚拟”柔顺：为了弥补物理上的刚性，工程师们转而求助于复杂的控制算法，例如阻抗控制或导纳控制，来创造一种“虚拟”的柔顺性⁵。通过调节机器人的阻抗参数，可以使其在与环境交互时表现出从“硬”到“软”的不同行为。然而，这种柔顺性并非机器人本身固有的物理特性，它完全依赖于控制系统的完美运行。一旦传感器出现故障或控

制算法失效，系统可能会瞬间变回刚性交互状态，安全风险极高⁵。此外，这种方法仅能在末端执行器层面模拟柔顺，而无法实现机器人关节本身的柔顺，其本质上的局限性显而易见。

这些局限性共同指向一个结论：刚性机器人在本质上是一种“强加于人”的设备，它迫使人体去适应机器的预设轨迹，而非机器去适应人的自然意图。这种模式不仅限制了康复训练的舒适度和安全性，更重要的是，它与现代康复医学所倡导的、鼓励患者主动参与的理念背道而驰。

2.2 软体机器人的兴起：以柔克刚的仿生康复新范式

软体机器人（Soft Robotics）的出现，为解决上述难题提供了一个全新的、根本性的解决方案。其核心理念是仿生学，即从自然界生物体（如章鱼、蠕虫）的柔软结构和运动方式中汲取灵感，利用柔顺、可拉伸的材料来构建机器人⁴。在康复领域，这一范式带来了革命性的变化。

固有的安全性与顺应性：软体机器人的最大优势在于其“固有安全性”（Intrinsic Safety）。通过使用弹性体、织物、水凝胶等柔性材料，机器人本身就具备了物理层面的柔顺性³。这意味着即使在控制系统失效的极端情况下，机器人与人体接触时也是柔软、安全的，从根本上避免了刚性碰撞带来的风险³。这种材料层面的柔顺性使得设备能够更好地贴合人体轮廓，分散交互压力，极大地提升了穿戴的舒适性¹⁰。

无限的自由度与自然的运动：与具有有限、离散关节的刚性机器人不同，软体机器人的连续变形体结构使其拥有理论上无限的自由度。这使得它们能够实现弯曲、扭转、拉伸等复杂的仿生运动，从而更精确地模拟和辅助人体自然的运动模式¹。由于其柔软的结构，软体机器人能够自然地适应人体关节的复杂运动，避免了刚性外骨骼中常见的关节失准问题¹⁰。

从临床到家庭的应用潜力：软体机器人的轻量化、便携性、高舒适度和用户友好性等特点，使其非常适合将康复训练从专业的医疗机构推广到社区和家庭环境中¹⁷。这一点至关重要，因为神经科学的研究表明，运动功能的恢复依赖于神经可塑性，而诱导神经可塑性需要高强度、高重复性、任务导向的训练¹⁸。刚性机器人由于其笨重、不适和对专业人员的依赖，很难满足这种高剂量的训练需求。而软体机器人则为实现居家、高频次的康复训练提供了可能，让患者能够完成每日数百甚至上千次的重复练习，从而最大化康复效果。

从更深层次的逻辑来看，这场从刚性到柔性的转变，并不仅仅是工程技术路线的选择，而是由康复医学的核心理论所驱动的必然趋势。神经可塑性理论是现代神经康复的基石，它强调了大脑通过高强度、高重复性的主动训练来重塑神经网络的能力²¹。刚性机器人因其物理限制，难以在临床之外的环境中提供这种训练模式²³。软体机器人则凭借其轻便、安全、舒适的特性，成为了实现这一临床理论的理想载体²⁰。因此，可以说，是康复科学的发展“拉动”了软体机器人技术的应用，后者为前者提供了实现其理论目标的物理工具。

此外，这一转变也体现了工程解决方案的成熟。刚性机器人面临的“柔顺性鸿沟”，最初是通过软件（如阻抗控制）来“虚拟”地填补⁵。这是一种补救性措施，其安全性高度依赖于控制系统的稳定性。而软体机器人则是通过硬件（即柔性材料和柔顺驱动器）来从根本上解决这个问题，实现了“固有”的柔顺性³。这种从“虚拟柔顺”到“固有柔顺”的进化，代表了人机交互安全理念的一次重大飞跃，使系统的安全性不再仅仅依赖于代码的无误执行，而是根植于其物理本质之中。

表 1：刚性与柔性康复机器人对比分析

特征	刚性康复机器人	柔性/软体康复机器人
安全性	固有风险高，与人体机械失配，可能因痉挛等非预期运动造成二次伤害 ⁶ 。	固有安全性高，材料柔顺，能吸收冲击，人机交互更安全 ¹⁰ 。
人机交互	交互生硬，患者常感到被限	交互舒适，设备能贴合人体轮

	制、不适甚至疼痛 ⁵ 。	廓，穿戴体验更佳 ⁹ 。
适应性	适应性差，常为“一刀切”设计，难以匹配不同体型 ⁸ 。	适应性强，能灵活变形以适应不同用户和复杂环境 ¹ 。
重量/便携性	通常笨重、体积大，限制了使用场景，主要用于临床 ² 。	轻量化、便携，适合从临床延伸至家庭和社区环境 ¹⁷ 。
关节对齐	易出现机器人与人体关节失准问题，干扰自然运动 ² 。	结构柔顺，能自然顺应人体关节运动，避免失准问题 ⁹ 。
控制哲学	基于位置控制，强制肢体遵循预设轨迹；通过复杂算法模拟“虚拟柔顺” ⁵ 。	基于力/交互控制，鼓励主动参与，实现“按需辅助”；具备“固有柔顺” ³ 。
典型应用环境	康复中心、医院等专业临床机构 ²³ 。	可覆盖临床、社区、家庭等全场景康复需求 ²⁴ 。

3.0 支撑柔性与灵巧的核心技术

康复机器人从刚性到柔性的革命性转变，得益于材料科学、驱动技术和传感技术等多个领域的协同创新。这些核心技术共同构成了新一代康复机器人的物理基础，使其能够安全、舒适且智能地与人体进行交互。本章节将深入剖析这些关键技术。

3.1 基础材料：构建柔性与回弹的基石

柔性机器人的核心在于其构成材料。与传统机器人的金属和硬塑料不同，软体机器人选用

杨氏模量与生物软组织（通常在 104 至 109 Pa 范围内）相近的材料，这是实现其柔顺特性的根本前提¹¹。

3.1.1 柔性聚合物、弹性体与水凝胶

目前，构成软体机器人的主体材料主要包括各类柔性聚合物。其中，硅胶（Silicone）、橡胶、弹性体（Elastomers）和水凝胶（Hydrogels）是最为常见的选择¹³。这些材料不仅具备优异的拉伸和弯曲性能，还具有良好的生物相容性，能够安全地与人体皮肤长时间接触¹¹。例如，硅酮弹性体（Silicon elastomer）因其生物惰性和柔顺性而被广泛应用于医疗级设备，包括内窥镜和康复手套等¹¹。这些材料的选择，使得机器人能够像生物体一样自然地变形和适应环境。

3.1.2 前沿方向：自愈合与智能响应材料

尽管柔性材料带来了诸多优势，但其相对脆弱、易于磨损和撕裂的特性也带来了新的挑战，即设备的耐久性和使用寿命问题¹¹。为了解决这一难题，研究人员正积极探索具有自愈合（Self-healing）功能的先进材料。这类材料能够在受到损伤（如割伤或穿刺）后，通过内在的化学键重组或包埋的修复剂，实现自主修复，从而显著延长机器人的工作寿命²⁶。自愈合材料可分为两类：一类是本征性自愈合，材料本身具有可逆的化学键，在外力作用下断裂后能够重新连接；另一类是外征性自愈合，材料基体中包埋了微胶囊或中空纤维，损伤时释放出修复剂来填补裂缝²⁸。

另一个激动人心的研究方向是智能响应材料（Smart Responsive Materials）。这类材料能够对外部环境的刺激（如温度、光、电场、磁场或 pH 值变化）作出预设的物理或化学响应。例如，形状记忆合金（Shape Memory Alloys, SMAs）和形状记忆聚合物（Shape

Memory Polymers, SMPs) 可以在特定温度下恢复到预先设定的形状²⁹。液晶弹性体 (Liquid Crystal Elastomers, LCEs) 则能在光照下发生形变³⁰。这些智能材料为开发新型、无源或低功耗的驱动和控制方式开辟了全新的道路, 有望使未来的康复机器人更加轻便和智能。

3.2 驱动系统：驱动柔顺与自适应的动力

如果说柔性材料是软体机器人的“骨骼”和“皮肤”, 那么驱动系统就是其“肌肉”, 为机器人提供运动的动力。与传统机器人使用的刚性电机和齿轮箱截然不同, 软体机器人的驱动系统同样追求柔顺和安全的特性。

3.2.1 气动与线驱动：主流驱动技术的对比分析

目前, 在柔性可穿戴康复设备, 尤其是上肢外骨骼中, 最主流的两种驱动方式是气动驱动和线缆驱动³¹。

- **气动驱动 (Pneumatic Actuators)** : 通常被称为气动人工肌肉 (Pneumatic Artificial Muscles, PAMs) 或麦克基本肌肉 (McKibben muscles), 其工作原理是通过向柔性气囊中充入或抽出压缩空气, 使其膨胀或收缩, 从而产生拉力¹⁰。这类驱动器具有非常高的功率重量比和固有的柔顺性, 其力学特性与生物肌肉相似, 非常适合用于人机交互¹⁰。然而, 其缺点也十分明显: 系统通常需要一个外部的压缩气源, 这使得设备较为笨重且便携性差 (即所谓的“系留”问题); 同时, 气体的可压缩性导致其动态响应较慢, 且表现出高度非线性的行为, 给精确控制带来了巨大挑战³²。
- **线缆驱动 (Cable-Driven Actuators)** : 这种系统通常将直流电机等动力源放置在离人体关节较远的位置 (如腰部), 通过鲍登线 (Bowden cables) 等柔性线缆将动力远端传输至需要辅助的关节²。其主要优点是能够显著减少穿戴在肢体末端的质量和

惯量，提升穿戴的舒适性和运动的灵活性。控制相对直接，响应速度也比气动系统快。但其缺点在于线缆在传输过程中会存在摩擦损耗，且复杂的布线可能导致缠绕和干涉问题²。

3.2.2 变刚度驱动器（VSAs）：动态适应性的关键

变刚度驱动器（Variable Stiffness Actuators, VSAs）是近年来驱动技术领域的一项重大突破，它旨在解决机器人领域一个长期存在的矛盾：安全柔顺性与高力输出/高精度定位之间的矛盾。VSA 允许机器人在运动过程中实时、主动地改变其关节或连杆的刚度³⁵。在康复应用中，这意味着机器人可以在需要安全交互时变得非常柔软，以吸收非预期的冲击（如患者的痉挛）；而在需要精确引导或提供较大辅助力时，则可以变得更硬³⁶。

VSA 的设计理念多种多样，主要可分为几类：如通过改变弹簧预紧力或杠杆臂来调节刚度的机械调节式³⁶；通过层级干扰（Layer Jamming）或颗粒干扰（Particle Jamming）等原理，利用真空或电场使柔性结构快速变硬的结构调节式³⁷；以及通过拮抗式驱动两组非线性弹簧来协同控制位置和刚度的方式³⁶。VSA 技术的出现，使得软体机器人能够在“柔”和“刚”之间动态切换，极大地拓展了其应用场景和性能边界³⁹。

从更深层次分析，软体机器人设计中存在一个核心的“三角困境”：即**柔顺性

（Compliance）、力输出（Force Output）和可控性（Controllability）**三者之间的内在制衡。例如，非常柔软的材料（高柔顺性）通常难以输出强大的力量，并且其高度非线性的形变也极难精确控制³³。气动驱动器力输出较大，但可控性差³²。线驱动可控性好，但系统的柔顺性不如气动系统⁴²。整个变刚度驱动器（VSA）的研究方向，可以被理解为了试图打破这一“三角困境”的系统性努力，其终极目标是创造出一种能够同时实现高柔顺性、高峰值力输出和高精度控制的理想驱动器。

3.3 传感与感知：解码人体意图与交互信息

如果说驱动器是机器人的“肌肉”，那么传感器就是其“神经末梢”，负责感知自身状态、用户意图和外部环境，为智能控制提供必要的信息输入。

3.3.1 可穿戴生物信号传感器（EMG、IMU）：洞察运动意图

为了实现真正以用户为中心的自适应控制，机器人必须能够“读懂”用户的运动意图。表面肌电信号（surface Electromyography, sEMG）传感器通过贴在皮肤表面的电极，测量肌肉收缩时产生的微弱电信号，从而判断用户的主动发力意图³¹。惯性测量单元（Inertial Measurement Units, IMUs）则集成了加速度计和陀螺仪，能够实时追踪肢体的姿态、速度和角速度⁴⁵。这些生物信号和运动学信息被输入到控制算法中，作为触发或调节机器人辅助的依据，是实现“按需辅助”等高级控制策略的基础。

3.3.2 柔性电子皮肤（E-Skin）传感器：实现触觉与力反馈

传统刚性传感器难以与柔软、可变形的机器人结构兼容。因此，开发可拉伸、可弯曲的柔性传感器成为当前的研究热点⁴⁶。这些传感器可以直接集成在机器人的“皮肤”或织物结构中，实现对人机交互力的分布式测量。例如，研究人员开发了基于导电织物和硅胶复合材料的柔性电容式应变传感器，能够精确感知身体的微小运动⁴⁷。更进一步的电子皮肤（E-Skin）技术，则旨在模仿人类皮肤的功能，在柔性基底上集成了压力、温度、湿度等多种传感器阵列，能够提供高时空分辨率的触觉反馈⁴⁸。然而，柔性传感器在实际应用中仍面临巨大挑战，特别是信号的长期稳定性、抗汗液腐蚀能力以及对运动伪影的鲁棒性，都是亟待解决的技术难题⁴⁶。

柔性传感器的发展，其意义远不止是传统传感器的柔性化。它是构建真正闭环、共生的人机系统的关键环节。没有能够无缝集成、提供丰富分布式反馈的柔性传感器，软体机器人就如同一个“没有触觉”的躯体，无法精确感知与用户的交互状态。这使得那些先进的 AI 控制算法和 BCI 系统因为缺乏高质量的输入数据而“无用武之地”。因此，柔性传感技术是连接柔软机械本体与高级智能控制之间不可或缺的桥梁，它的成熟度直接决定了整个软体康复机器人系统所能达到的智能高度。

表 2：柔顺驱动技术概览

驱动类型	核心原理	优点	缺点	典型应用
气动 - 麦克基本型	通过向编织网套内的气囊充气，使其径向膨胀、轴向收缩，产生拉力 ¹⁰ 。	功率重量比高、固有柔顺性好、力学特性类似生物肌肉 ¹⁰ 。	需要外部气源、体积较大、控制非线性、响应速度较慢 ³² 。	上肢/下肢外骨骼、康复手套。
气动 - 弹性体型	通过向弹性体（如硅胶）内部的腔室充气，使其发生预设的弯曲或伸缩形变 ³² 。	高度可定制、自由度高、能与人体表面良好共形、无锚点固定问题 ³² 。	力输出相对较小、易发生结构疲劳、控制非线性、响应慢 ³² 。	软体手套、仿生抓持器。
线缆驱动	电机等动力源通过柔性线缆远端驱动关节运动 ³¹ 。	减小末端质量、结构紧凑、控制相对直接、响应快 ⁹ 。	存在摩擦损耗、线缆易缠绕、柔顺性依赖于控制而非固有 ² 。	上肢/下肢外骨骼、康复手套。
变刚度驱动器 (VSA)	通过改变系统中的弹簧预紧力、杠杆臂或结构状态，实时调节驱	可在柔顺与刚性间动态切换，兼顾安全性与性能，适应多变任	结构和控制通常更复杂，可能增加系统重量和成本 ³⁶ 。	高性能人机交互机器人、安全协作机器人。

	动器的刚度 ³⁶ 。	务 ³⁵ 。		
--	-----------------------	-------------------	--	--

4.0 智能层：灵巧机器人的控制策略

如果说柔性材料和驱动器赋予了康复机器人安全的“身体”，那么先进的控制策略则赋予其智能的“大脑”。仅仅拥有一个柔软的躯体是不足够的，机器人必须能够理解用户的意图，并以一种协同、自适应的方式提供恰到好处的辅助。本章节将探讨驱动新一代康复机器人灵巧性的两大核心智能技术：人工智能/机器学习与脑机接口。

4.1 人工智能与机器学习在自适应控制中的应用

软体机器人固有的高度非线性、时变和迟滞等复杂动态特性，使得传统的基于精确数学模型的控制方法难以适用。这恰恰为人工智能（AI）和机器学习（ML）提供了广阔的应用舞台。AI/ML 方法不依赖于精确的物理模型，而是通过从数据中学习，来建立输入与输出之间的复杂映射关系，这使其成为控制软体机器人的理想工具⁴¹。

4.1.1 实现“按需辅助”（AAN）的个性化治疗范式

“按需辅助”（Assist-as-Needed, AAN）是现代康复机器人控制核心理念之一。其精髓在于，机器人不应始终强力主导运动，而应只在患者需要时提供必要的帮助，从而最大限度地鼓励患者主动参与，这被认为是促进神经可塑性的关键⁵。AI 驱动的控制是实现 AAN 范式的关键。通过融合来自肌电（EMG）、力或运动学传感器的多模态数据，AI 系

统可以实时评估患者的运动意图和主动贡献程度。当检测到患者发力不足或运动偏离目标时，控制器会动态增加机器人的辅助力；而当患者能够自主完成动作时，则减少辅助，形成一个以患者为中心的、动态协作的闭环训练系统⁵。

4.1.2 用于步态相位与运动意图识别的机器学习模型

机器学习在解码用户意图方面扮演着至关重要的角色。例如，在下肢外骨骼的应用中，研究人员利用支持向量机（SVM）、神经网络等 ML 模型来处理来自 IMU 和足底压力传感器的数据，从而实时识别用户当前处于支撑相还是摆动相等不同的步态阶段，以便在恰当的时机施加辅助力⁴³。在软体手套的应用中，ML 算法可以学习和识别用户前臂的 EMG 信号模式，将其分类为“抓握”、“伸展”等不同手势意图，进而控制手套完成相应的动作⁴¹。此外，面对气动驱动器等难以精确建模的系统，研究者还采用回归模型（如 K 最近邻算法）来学习执行器气压、关节角度和所需辅助水平之间的非线性关系，直接预测出驱动机器人所需的控制指令，绕过了复杂的动力学建模过程⁴¹。

4.2 脑机接口（BCI）：终极人机交互通道

脑机接口（BCI）技术为康复机器人提供了一种最直接、最根本的人机交互方式。它绕过了外周神经和肌肉系统，直接从大脑皮层采集神经信号，解码用户的运动意图，并将其转化为对机器人的控制指令⁵³。BCI 与软体机器人的结合，为重度运动功能障碍（如高位截瘫、闭锁综合征）患者的康复带来了前所未有的希望。

4.2.1 构建“外周-中枢-外周”的闭环神经康复系统

BCI 控制的软体机器人构建了一个强大的闭环神经康复通路。其工作流程如下：首先，患者进行运动想象（Motor Imagery, MI），例如想象移动瘫痪的手臂。此时，放置在头皮（非侵入式）或大脑皮层（侵入式）的电极会捕捉到大脑运动皮层区的特定神经活动模式（中枢信号）⁵⁵。BCI 系统实时解码这些信号，识别出用户的运动意图，并将其转换为指令发送给软体机器人。随后，软体机器人驱动患者的肢体完成相应的运动（

外周辅助）。肢体的运动本身会产生本体感觉和视觉反馈，这些感觉信息再回传到大脑（外周反馈），进一步激活和强化相关的感觉运动神经网络⁵⁶。这个“

外周（机器人辅助运动）-中枢（感觉反馈）-外周（下一次运动意图）”的闭环被认为能够有效地促进神经可塑性，其康复效果优于被动的、无意图参与的肢体运动⁵⁵。

4.2.2 用于增强控制鲁棒性的混合 BCI 范式

尽管基于运动想象（MI）的 BCI 在理念上非常直观，但在实际应用中，其信号信噪比低，解码准确率有限，且对用户的训练要求高，并非所有患者都能熟练掌握⁵⁵。为了提高 BCI 控制的稳定性和鲁棒性，研究人员正在积极探索混合 BCI（Hybrid BCI）范式。这种范式将两种或多种不同的脑信号或脑信号与其他生物信号（如眼电 EOG、肌电 EMG）结合起来。例如，一个典型的混合 BCI 系统可以将需要用户集中注意力的运动想象（MI）信号，与一种更为稳健的、由外部视觉刺激诱发的稳态视觉诱发电位（Steady-State Visually Evoked Potentials, SSVEP）信号相结合⁵⁶。通过融合算法，系统可以综合判断两种信号的解码结果，从而做出更可靠的控制决策，降低误操作率，提升用户体验⁵⁷。

深入分析这些智能控制策略的演进，可以发现一条清晰的逻辑主线：控制的焦点正经历着从机器到交互，再到意图的深刻转变。第一代机器人的预设轨迹控制，其核心是机器的运动，人只是被动的接受者⁵。由 AI 驱动的 AAN 范式，则将焦点转移到了

人机交互的动态过程，机器人的行为由用户的实时表现所调节⁵¹。而 BCI 技术的整合，

则将这一理念推向了极致，它试图在任何物理动作或交互发生之前，直接捕捉和响应用户的

内在意图⁵⁵。这不仅是技术上的递进，更是一场康复哲学的革命。机器人正从一个强制训练的“教练”，演变为一个协同辅助的“伙伴”，并最终成为一个直接延伸用户意志的“工具”。这种演进路径对于最大化患者的参与感和激发神经可塑性潜力具有至关重要的意义。

同时，软体机器人技术与人工智能技术之间也存在一种独特的共生关系。正是因为软体机器人具有高度非线性、难以精确建模的物理特性（这在传统控制理论中被视为一个“缺陷”），才使其成为了 AI/ML 算法（尤其擅长处理此类复杂问题）的完美应用场景（一个“特性”）⁴¹。软硬件的复杂性在这里形成了互补和协同。可以说，软体机器人的物理特性“催生”了对高级 AI 控制的需求，而 AI 技术的进步又反过来“解锁”了软体机器人的全部潜力。这一内在联系预示着，软体机器人的未来发展将与人工智能的进步密不可分，任何一方的突破都将为另一方带来新的可能性。

5.0 技术瓶颈与未来研究路径分析

尽管柔性化与灵巧化的康复机器人展现出巨大的应用前景，但其从实验室走向广泛的临床和家庭应用，仍面临着一系列严峻的技术瓶颈。这些挑战分布在材料、驱动、传感和控制等多个层面，并且相互关联。清晰地识别并系统地解决这些瓶颈，是推动该领域持续发展的关键。

5.1 材料科学的挑战：耐久性、迟滞性与控制复杂性

柔性材料是软体机器人的基石，但其自身特性也带来了挑战。首先是**耐久性问题**。与金属等传统材料相比，聚合物和弹性体等软材料更容易在长期、高强度的重复使用中出现疲劳、磨损和开裂，这直接限制了康复设备的使用寿命和可靠性¹¹。其次是

材料的内在非线性与迟滞性。软材料在受力变形和恢复过程中，其应力-应变关系通常是高度非线性的，并且存在能量耗散（迟滞现象），这使得建立精确的动力学模型变得异常困难，从而给机器人的精确控制带来了巨大挑战⁶。

未来研究方向：一方面，需要大力开发更具鲁棒性的新型柔性材料，特别是具备**自愈合能力**的材料，以期在损伤发生后能自主修复，从而延长设备寿命²⁶。另一方面，需要发展更先进的软体动力学建模方法，以便更准确地预测和补偿材料的非线性行为，为高精度控制打下基础²⁶。

5.2 驱动与传感技术的障碍：小型化、功率密度与集成度

在驱动技术方面，核心挑战在于**性能与便携性的权衡**。气动驱动器虽然能提供强大的动力，但其依赖于笨重的外部气源，限制了系统的便携性和应用场景³²。而电机驱动系统虽然更易于集成，但在实现轻量化和小型化的同时，要提供足够的辅助力矩仍然是一个难题³³。变刚度驱动器虽然理念先进，但其结构往往更为复杂，增加了系统的重量和成本。

在传感技术方面，**鲁棒性和信号质量是主要障碍**。集成在柔性穿戴设备上的传感器，尤其是 sEMG 和柔性力传感器，极易受到汗液、皮肤运动、电磁干扰等因素的影响，导致信号质量下降或产生伪影，从而影响意图识别的准确性和控制的稳定性⁴⁶。如何设计出既能与人体舒适贴合，又能提供长期、稳定、高质量信号的柔性传感器系统，是当前亟待解决的问题。

未来研究方向：驱动技术需要朝着更轻量、更高能量密度、更高效的柔顺驱动器方向发展，例如探索新型电活性聚合物（EAP）等智能材料驱动技术²⁶。传感技术则需要聚焦于

开发更鲁棒、抗干扰能力更强、并能与机器人本体高度集成的多模态柔性传感系统⁴⁶。

5.3 鲁棒与通用控制算法的探寻

控制算法是机器人的“大脑”，其智能水平直接决定了机器人的性能。当前，控制算法面临的主要挑战是**鲁棒性和泛化能力**。首先，对于 AI/ML 模型，它们通常需要大量的、针对特定用户和特定任务的训练数据才能达到较好的性能。这使得设备的初始设置和校准过程非常耗时，且一个为用户 A 训练好的模型，直接应用于用户 B 时效果可能会大打折扣¹⁵。其次，对于 BCI 系统，脑电信号本身信噪比低、非平稳且存在显著的个体差异，这使得开发一个通用、即插即用的 BCI 解码器变得极为困难⁵⁵。

未来研究方向：AI/ML 领域需要探索更高效的算法，如迁移学习、元学习或离线强化学习⁴⁴，以减少对大量标注数据的依赖，并提高模型的泛化能力。BCI 领域则需要发展更强大的信号处理技术和混合 BCI 范式，以提高解码的准确性和鲁棒性，同时简化用户的校准流程⁵⁶。

5.4 临床评估标准与方案的缺失

最后一个，也是至关重要的瓶颈，是**缺乏统一的性能和临床评估标准**。目前，不同的研究团队在评估其机器人时，采用的实验方案、性能指标和临床量表各不相同¹⁸。这导致了不同设备和康复策略之间的效果难以进行横向比较，阻碍了领域内知识的有效积累和技术的迭代优化。此外，许多已发表的临床研究存在样本量小、设计异质性大等问题，这限制了其结论的可靠性和推广性²¹。

未来研究方向：学术界、产业界和临床界需要携手合作，共同建立一套公认的、标准化的机器人性能测试基准和临床疗效评价体系。同时，亟需开展更大规模、设计更严谨的多

中心随机对照试验（RCTs），以获取高级别的循证医学证据，明确这些技术在不同患者群体中的长期有效性和成本效益²¹。

深入分析这些技术瓶颈，可以发现它们并非孤立存在，而是构成了一个相互依存、相互制约的复杂系统。这揭示了一个重要的发展逻辑：**对该领域的创新必须采取一种整体性的、系统性的视角**。例如，**材料科学**的瓶颈（5.1）直接限制了**驱动和传感**硬件的性能（5.2），而硬件的局限性又反过来制约了**智能控制算法**所能达到的高度（5.3）。一个再先进的 AI 算法，如果得不到来自高质量传感器的清晰、稳定的数据输入，也无法发挥其全部潜力。同样，即使开发出一种革命性的新材料，如果不能将其有效地加工成可靠的驱动器和传感器，其价值也无法体现。最后，整个技术栈（材料、硬件、软件）的优劣，最终必须通过**统一的临床评估标准**（5.4）来衡量和验证。

因此，任何单一领域的“孤岛式”突破都难以带来全局性的进展。未来的研发策略必须是协同的：材料的创新必须与传感和驱动的集成设计相结合；硬件的进步需要为数据驱动的 AI 算法提供高质量的“燃料”；而整个技术系统的临床价值，则必须在一个公认的框架下进行科学的检验。这一认知对于指导科研经费的投向、企业研发资源的配置以及跨学科合作的组织都至关重要。

6.0 产业与市场格局

随着柔性康复机器人技术的不断成熟和临床证据的积累，一个充满活力的新兴产业正在迅速崛起。资本的涌入、初创公司的涌现以及商业模式的探索，共同描绘了这一领域的广阔市场前景。本章节将对柔性康复机器人的市场规模、竞争格局和商业化路径进行深入分析。

6.1 市场分析：规模、增长预测与关键细分

全球机器人市场正经历高速增长，柔性机器人是最引人注目的赛道之一。不同市场研究报告对具体规模的预测存在差异，这本身也反映了新兴市场的快速变化和定义边界的模糊性。综合来看，全球软体机器人市场的规模在 2024/2025 年预计在 10 亿至 600 亿美元之间，并有望在 2033/2035 年增长至超过 140 亿至 2200 亿美元，复合年增长率（CAGR）高达惊人的 24%至 49%⁶³。

聚焦于康复机器人这一垂直领域，其市场增长同样强劲。据预测，康复机器人市场规模将从 2023/2024 年的约 2.75 亿至 4.3 亿美元，增长至 2032/2034 年的约 13 亿至 17 亿美元，CAGR 约为 15%至 18%⁶⁸。

从市场细分来看：

- **按产品类型**：外骨骼和软体抓手是最大的两个细分市场。其中，医疗康复是外骨骼最主要的应用场景⁶⁵。
- **按应用领域**：医疗健康是软体机器人目前最大且最重要的应用市场，占据主导地位⁶³。
- **按区域划分**：目前，北美是全球最大的市场，这得益于其先进的医疗基础设施、高昂的研发投入和较高的技术采纳率。然而，亚太地区被视为增长最快的市场，未来需求潜力巨大⁶³。

6.2 竞争情报：关键行业参与者与创新者画像

柔性康复机器人领域的竞争格局呈现出多元化的特点，既有从刚性机器人领域转型的老牌企业，也有专注于软体技术的新兴力量。

- **传统与转型玩家**：Ekso Bionics⁷⁰ 和 Hocoma（其 Lokomat 是地面固定式康复机器人的代表）⁷⁰ 等公司是刚性外骨骼市场的传统领导者，它们拥有深厚的临床渠道和品牌积累，并开始探索更具柔性的解决

方案。

- **平台型领导者：傅利叶智能（Fourier Intelligence）**（中国）是该领域一个不容忽视的重要玩家。该公司采取了平台化和生态化的发展战略，其核心产品“RehabHub™”是一个集成的康复机器人解决方案，整合了超过 30 种不同的上下肢、平衡和协调训练机器人⁷³。通过将硬件设备与医疗信息系统连接，傅利叶智能旨在打造一个覆盖医院、社区和家庭的三级康复服务网络⁷⁵。公司不仅在全球 50 多个国家拥有广泛的业务⁷⁶，还通过收购康复服务提供商（如 RHK）来获取庞大的客户基础和数据反馈，以驱动产品迭代⁷⁷。近年来，傅利叶智能更是将技术积累拓展至通用机器人领域，发布了 GR-1 等型号，显示了其深厚的技术储备和宏大的战略布局⁷⁷。
- **专注型创新企业：**
 - **司羿智能（Syrebo Intelligence）**（中国）：这家公司精准地切入了软体康复手套这一细分市场，专注于为临床和家庭环境提供价格亲民的、高科技的康复解决方案⁷⁹。其产品结合了软体机器人外骨骼技术和神经科学，并集成了创新的镜像训练、主动游戏训练等多种模式⁸¹。值得注意的是，司羿智能也在布局脑机接口（BCI）解决方案，旨在构建更闭环的康复系统⁷⁹。公司产品已获得美国 FDA 和欧盟 CE 等多项国际认证，并销往全球 80 多个国家，服务于数千家医院和数万个家庭⁷⁹。在资本层面，司羿智能已完成由成都生物城股权投资基金领投的近 1500 万美元的 A 轮融资，显示出强大的市场吸引力⁸⁰。
 - **Imago Rehab**（美国）：作为哈佛大学 Wyss 研究所的衍生公司，Imago Rehab 代表了另一种前沿的商业模式²⁴。该公司不仅提供一款技术领先的软体康复手套，更重要的是，它将硬件设备深度整合到一个完整的远程医疗（Telehealth）平台中²⁴。患者可以在家中使用手套进行训练，而治疗师可以通过平台远程监控数据、评估进展并调整治疗方案。这种模式的核心是服务而非硬件销售，其收入主要来源于保险报销⁸⁶。Imago Rehab 已经与包括 Medicare 在内的 23 家顶级保险公司建立了合作关系，并获得了超过 680 万美元的融资，其中包括 AARP、Safar Partners 等知名风投和多项联邦政府科研经费的支持⁸⁶。
 - 其他值得关注的公司还包括：专注于轻量级膝关节外骨骼的 **Roam Robotics**⁹⁰,

以及开发步态辅助机器人的
WiRobotics⁸³ 等。

6.3 投资与商业化：融资趋势、合作模式与市场壁垒

柔性康复机器人领域正吸引着大量风险资本的关注。傅利叶智能已完成多轮融资直至 D 轮，投资方包括软银集团和沙特阿美等国际巨头⁹¹。司羿智能和 Imago Rehab 等初创公司也成功完成了 A 轮和种子轮融资，证明了投资者对这一赛道的看好⁸⁰。

在商业化路径上，**获取监管批准**是进入医疗市场的敲门砖。Syrebo 和 Imago Rehab 等公司都将获得 FDA、CE 等认证作为其核心战略的一部分⁷⁹。此外，与顶尖科研机构 and 临床中心建立

战略合作关系也是推动技术验证和市场采纳的有效途径，例如傅利叶智能与美国顶级康复中心 Brooks Rehabilitation 的合作⁹³。

然而，商业化之路并非一帆风顺。**高昂的设备成本**是阻碍其广泛普及的首要障碍⁶¹。对于大多数患者和医疗机构而言，动辄数万甚至数十万美元的设备是一笔巨大的开销。因此，如何成功

导航复杂的保险报销体系和政府资助项目，成为决定产品能否真正进入家庭和社区市场的关键⁸⁶。

对当前产业格局的深入分析揭示出，整个市场正沿着两条截然不同的商业模式路径分化：**“平台生态系统”模式与**“远程康复服务”模式****。傅利叶智能是前者的典型代表，其战略核心是构建一个硬件+软件的综合平台，目标是成为未来康复诊所的“操作系统”⁷³。这是一种以 B2B 为导向的、硬件为中心的生态战略。Imago Rehab 则是后者的先锋，其商业模式的核心是提供一种按次付费的远程康复服务，硬件（手套）只是服务的载体²⁴。这是一种以 B2C 或 B2B2C 为导向的、服务为中心的模式。这两种模式代表了对市场未来两

种不同的构想，它们的成功将取决于截然不同的核心能力：前者依赖于强大的硬件集成、研发和销售能力，而后者则更考验其在保险准入、服务运营和患者获取方面的能力。这一分化趋势为投资者和行业战略家提供了评估竞争格局和识别投资机会的关键视角。

表 3：柔性康复机器人市场竞争格局分析

公司	关键产品/解决方案	技术路径	目标市场	融资/状态
傅利叶智能 (Fourier Intelligence)	RehabHub™ 康复机器人平台、ExoMotus™ 外骨骼、GR 系列人形机器人 ⁷³	刚柔混合、平台化、生态化	临床、社区	D 轮融资，软银等投资 ⁹¹
司羿智能 (Syrebo)	Syrebo™ 软体康复手套、BCI 解决方案 ⁷⁹	软体气动、结合 BCI、价格亲民	临床、家庭	A 轮融资近 1500 万美元 ⁸⁰
Imago Rehab	软体康复手套 + 远程医疗服务平台 ²⁴	软体机器人+远程医疗+AI+保险报销	家庭、远程康复	种子轮，已获超 680 万美元融资 ⁸⁸
Ekso Bionics	EksoNR, Ekso Indego 等刚性外骨骼 ⁷⁰	刚性外骨骼	临床、工业	上市公司
Hocoma	Lokomat, Armeo 等刚性康复机器人 ⁷⁰	固定式/末端牵引式刚性机器人	临床	DIH International 旗下公司
Roam Robotics	Forge 膝关节外骨骼 ⁹⁰	轻量化、气动柔顺驱动	军事、骨关节炎患者	私人公司

7.0 临床应用与循证进展

一项康复技术的最终价值，必须通过严谨的临床试验证据来衡量。近年来，随着柔性康复机器人技术的成熟，越来越多的高质量临床研究涌现出来，为评估其在真实世界中的疗效提供了坚实的基础。本章节将系统性地梳理和综合分析这些临床证据，重点关注上肢和下肢康复，并结合用户反馈，全面评估该技术的临床应用进展。

7.1 上肢康复：软体康复手套的影响

手部功能的恢复是许多神经损伤患者（尤其是脑卒中患者）康复过程中的重点和难点。软体康复手套因其轻便、安全、适合高强度重复训练的特点，已成为该领域的研究热点。

7.1.1 临床试验结果的综合与荟萃分析（FMA、ARAT 评分）

荟萃分析（Meta-analysis）作为循证医学中证据等级最高的研究方法之一，为我们提供了关于软体手套疗效的总体性结论。多项近期的系统综述和荟萃分析一致表明，与传统的康复治疗相比，使用软体康复手套（Soft Robotic Gloves, SRGs）进行干预，能够显著改善脑卒中患者的上肢运动功能²¹。

具体来看关键的临床评估指标：

- **Fugl-Meyer 上肢评定量表（FMA-UE）**：这是一项广泛用于评估脑卒中后运动功能恢复的金标准。一项包含 8 个随机对照试验（RCTs）、309 名参与者的荟萃分析发现，使用 SRGs 的治疗组比常规治疗组的 FMA-UE 评分平均提高了 6.52 分（95%置信区间：3.65-9.39）⁹⁶。另一项研究也得出了类似结论，即机器人辅助的任务导向训

训练能显著提高 FMA-UE 分数（标准化均数差 $SMD = 1.01$ ）⁶²。这一改善幅度具有重要的临床意义。

- **Action Research Arm Test (ARAT)**：该量表用于评估患者执行抓、握、捏等日常功能性任务的能力。多项研究证实，SRG 训练能显著提升 ARAT 总分⁹⁸。
- **与其他先进疗法的比较**：一项重要的 RCT 研究将软体手套与重复经颅磁刺激（rTMS，一种中枢神经调控技术）进行了直接比较。结果发现，对于重度上肢功能障碍的患者，软体手套的疗效与 rTMS 相当，且无显著差异¹⁰¹。这一发现意义重大，因为它表明，作为一种更安全、更便携、成本更低的周边干预手段，软体手套在疗效上可以媲美复杂的中枢干预技术，尤其适合作为家庭康复的选择¹⁰¹。

此外，研究还发现，**任务导向的训练**（即让患者在机器人的辅助下操作真实物体）比非任务导向的、单纯的重复运动训练效果更佳⁶²。同时，患者的

痉挛程度也会影响疗效，对于痉挛程度较轻的患者，软体手套的康复效果更为显著⁹⁹。

7.1.2 产品案例与特定试验结果

许多商业化或研究性的软体手套都在临床试验中得到了验证。例如，**Syrebo** 公司的康复手套，其设计中包含了创新的**镜像疗法**模式，即患者佩戴传感手套的健侧手做出动作，驱动患侧手的机器人手套同步运动，利用视觉反馈和镜像神经元原理促进大脑功能重组⁸¹。其他一些研究也验证了不同设计（如气动、线驱动）和控制策略（如肌电控制）的软体手套在提升抓握力、扩大关节活动度等方面的积极作用¹⁰⁴。

7.2 下肢康复：柔性外骨骼与外骨骼衣的功效

对于下肢功能障碍的患者，柔性外骨骼（Soft Exoskeletons）和外骨骼衣（Exosuits）旨

在辅助或增强其行走能力，其轻量化和柔顺的设计相比传统刚性外骨骼，更能促进自然的步态模式。

7.2.1 步态训练试验的综合与荟萃分析（步行速度、耐力、平衡）

同样，荟萃分析的结果也支持了柔性/可穿戴外骨骼在步态康复中的有效性。

- **步行速度与耐力**：一项对 13 项研究（492 名参与者）的荟萃分析发现，与剂量匹配的常规步态训练相比，外骨骼辅助训练能显著提升患者的步行速度（平均差异 MD = 0.13 m/s）和步行耐力（以 6 分钟步行测试距离衡量，MD = 46.23 米）¹⁰⁸。另一项荟萃分析也得出了相似的结论，并报告了更大的效应量（步行速度的 SMD = 1.15）¹¹⁰。
- **平衡能力**：上述研究同样证实，外骨骼辅助训练能显著改善患者的平衡功能（SMD = 0.3）¹⁰⁸。
- **与固定式机器人的比较**：一项针对脊髓损伤（SCI）患者的网络荟萃分析比较了可穿戴外骨骼与大型固定式机器人（如 Lokomat）的疗效。结果显示，在提升步行速度方面，可穿戴外骨骼可能优于 Lokomat，这凸显了在真实环境中进行过地面行走训练的重要性⁷²。

7.2.2 在不同患者群体中的应用：脑卒中与脑瘫

柔性外骨骼的应用已扩展到多种患者群体。

- **脑卒中**：由哈佛大学 Wyss 研究所开发并由 ReWalk Robotics 商业化的 ReStore™ Soft Exo-Suit 是一款典型的柔性外骨骼衣，它通过线缆驱动为踝关节的跖屈和背屈提供辅助。临床试验证明，使用 ReStore™进行训练能显著改善脑卒中偏瘫患者的步行速度和距离¹¹³。

- **脑性瘫痪 (Cerebral Palsy, CP)**：柔性外骨骼在儿童康复领域也展现出巨大潜力。一项针对痉挛型脑瘫患儿的 RCT 研究发现，在常规康复训练的基础上，增加柔性外骨骼辅助的过地面行走训练，能够比单纯的常规训练更有效地提升患儿的下肢运动功能、步行速度和耐力¹¹⁴。此外，针对脑瘫儿童上肢手功能障碍的软体康复手套也已进入可行性研究阶段¹¹⁷。

7.3 用户视角：患者与治疗师的反馈

技术的成功不仅取决于其临床疗效，还取决于用户的接受度和使用体验。

- **可用性与满意度**：针对软体手套的可用性研究普遍获得了积极的反馈。患者和治疗师均认为这类设备是可行、可接受且易于使用的¹⁹。许多研究报告称，使用机器人设备能够提升患者参与康复的积极性和投入度¹⁹。
- **设计要素**：用户反馈强调了一些关键的设计要素，包括设备应易于清洁、佩戴舒适、易于单手穿脱¹⁹。这些看似细节的问题，直接关系到设备能否在无人协助的家庭环境中使用。
- **对比刚性设备**：在对下肢外骨骼的评估中，治疗师和患者明确指出了刚性设备在安全性、普适性、易用性、重量和成本方面的局限性，而这些恰恰是软体机器人旨在解决的核心痛点⁸。

综合所有临床证据，一个核心的结论浮出水面：这些先进的康复机器人，其最重要的价值并非简单地“替代”或“辅助”某个动作，而是作为一种**“治疗倍增器”（Therapy Multiplier）**。神经康复的本质是基于神经可塑性的主动学习，这需要成百上千次的任务重复才能见效²¹。在传统的康复模式下，由于治疗师时间和精力限制，患者很难达到如此高的训练剂量¹⁹。康复机器人，特别是适合居家使用的软体机器人，通过自动化、游戏化和个性化的训练，使得实现这种高强度的治疗方案成为可能¹⁷。因此，机器人并非要取代康复的基本原则，而是为这些原则的有效实施提供了前所未有的强大工具。

此外，临床研究的趋势也揭示了康复理念的演进，即从单一干预走向**“中枢”与“外周”的协同干预**”。一项研究将作用于肢体的软体手套（外周干预）与作用于大脑的 rTMS（中枢干预）进行对比，发现两者效果相当，且都优于常规治疗¹⁰¹。而 BCI 控制的软体机器人则从设计之初就旨在构建一个整合中枢与外周的闭环系统⁵⁶。这预示着未来的康复治疗将不再是孤立的物理治疗或神经调控，而是一个系统性的工程。最有效的治疗方案很可能是一种组合拳：通过 BCI 或 rTMS 等技术直接调控大脑，同时利用安全、柔顺、智能的软体机器人作为与身体交互的理想外周接口，实现中枢与外周的协同恢复。

表 4：上肢软体康复手套临床疗效荟萃分析总结

研究/荟萃分析	关键评估指标	主要结果	患者群体	核心结论
Wang et al., 2023 ⁹⁶	FMA-UE	MD = 6.52 (95% CI: 3.65-9.39)	脑卒中	与常规康复相比，软体手套显著改善上肢运动功能。
Wang et al., 2023 ⁹⁶	FMA-distal UE	MD = 3.27 (95% CI: 1.50-5.04)	脑卒中	软体手套对远端（手腕/手）功能恢复效果显著。
Li et al., 2025 ⁶²	FMA-UE	SMD = 1.01 (95% CI: 0.57-1.45)	脑卒中	机器人辅助的任务导向训练能显著提升上肢功能。
Li et al., 2023 ¹⁰¹	FMA-UE	中位数差异 = 2 分 (vs. 常规治疗)	重度上肢功能障碍	软体手套疗效与 rTMS 相当，是有效的居家康复选择。
Tse et al., 2021 ⁹⁹	ARAT	平均增加 2.44 分 (P = 0.032)	慢性脑卒中	EMG 驱动的软体手套训练可有效改善上肢功能。

表 5：下肢柔性/可穿戴外骨骼临床疗效荟萃分析总结

研究/荟萃分析	关键评估指标	主要结果	患者群体	核心结论
Chen et al., 2022 ¹⁰⁸	步行速度	MD = 0.13 m/s (95% CI: 0.05-0.21)	脑卒中	外骨骼辅助训练在提升步行速度方面优于常规训练。
Chen et al., 2022 ¹⁰⁸	平衡能力 (BBS)	SMD = 0.3 (95% CI: 0.07-0.54)	脑卒中	能显著改善患者的平衡能力。
Kim et al., 2022 ¹¹⁰	步行速度	SMD = 1.15 (95% CI: 0.52-1.78)	脑卒中	可穿戴外骨骼比常规步态训练更有效地提高步行速度。
Guan et al., 2022 ⁷²	步行速度 (10MWT)	概率排名第一 (89%)	脊髓损伤	在步行速度方面，可穿戴外骨骼可能优于固定式机器人。
Han et al., 2024 ¹¹⁸	平衡能力 (BBS)	显著提升 (vs. 常规治疗)	脑卒中	柔性外骨骼辅助训练能显著改善平衡、步行能力和步态参数。

8.0 结论与战略建议

本报告对康复机器人领域的柔性化与灵巧化趋势进行了系统性的、多维度的剖析。通过技术基础、产业格局、临床证据和未来瓶颈的深入研究，我们可以得出一系列结论，并为该领域的关键利益相关方提供具有前瞻性的战略建议。

8.1 跨技术、产业与临床领域的关键发现综合

报告的核心结论是，康复机器人领域正在经历一场从**刚性到柔性、从被动到主动、从通用到个性化的深刻变革**。这场变革并非孤立的技术现象，而是由临床需求、技术进步和市场力量共同作用的结果，其内在逻辑紧密相连。

- **技术层面**，这场变革由材料科学、驱动技术、传感技术和智能控制的协同发展所驱动。柔性材料与柔顺驱动器从根本上解决了传统刚性机器人的人机交互安全问题，而智能传感与 AI/BCI 控制则赋予了机器人感知用户意图和自适应辅助的能力。这些技术的融合，使得构建真正以人为本的康复系统成为可能。
- **临床层面**，日益增多的高等级循证医学证据证实了新一代柔性康复机器人的有效性。荟萃分析结果一致表明，无论是上肢的软体手套还是下肢的柔性外骨骼，其在改善患者运动功能、步行能力和日常生活活动能力方面，均显著优于或至少等同于传统康复疗法。其核心价值在于，这些设备能够作为一种“治疗倍增器”，让患者得以实现神经可塑性原理所要求的高强度、高重复性训练，这是传统康复模式难以企及的。
- **产业层面**，明确的临床价值和巨大的市场需求正在催生一个充满活力的商业生态。全球市场正以惊人的速度增长，吸引了大量风险投资。竞争格局呈现多元化，既有傅利叶智能等公司构建的平台生态系统，也有 Imago Rehab 等初创企业探索的远程康复服务新模式。商业化的成功将取决于技术创新、临床验证、监管审批和保险准入等多重因素的综合作用。

8.2 未来展望：迈向共生、智能与普适的康复新纪元

展望未来，康复机器人的发展将超越现有形态，朝着更加无缝、智能和普及化的方向演进。未来的康复系统将不再是笨重的、仅在特定时间使用的“设备”，而是可能演变成为一种

可全天候穿戴的、如衣物般舒适无感的“第二皮肤”。

- **共生化**：机器人与人体的界限将更加模糊。通过更先进的生物相容性材料和更微创的传感技术，机器人将能更深入、更自然地与人体融合，成为身体的有机延伸。
- **智能化**：AI 和 BCI 技术将更加成熟。控制系统将能够更精准地预测用户意图，甚至解码复杂的情感和认知状态，从而提供不仅是物理上，更是情感和认知上的支持。自适应算法将使机器人能够与用户共同学习、共同进化，实现真正的个性化康复。
- **普适化**：随着成本的降低和可用性的提高，康复将从医院的“专属服务”转变为融入日常生活的“持续过程”。机器人将走出康复中心，进入家庭、社区和工作场所，为患者提供无处不在的康复支持，帮助他们最大限度地恢复功能、重返社会。

8.3 对关键利益相关方的战略建议

为了实现上述愿景，并加速这一变革性技术的健康发展，本报告向各方提出以下战略建议：

- **对科研人员**：
 1. **聚焦核心瓶颈**：将研究资源集中于攻克当前最关键的技术难题，即柔性材料的长期耐久性与自愈合能力、驱动系统的小型化与能量密度、以及柔性传感器的鲁棒性与抗干扰能力。
 2. **推动跨学科深度融合**：加强材料、机械、电子、计算机科学与神经科学、临床医学之间的深度合作。未来的突破将更多地来自于学科交叉的边缘地带。
 3. **建立并采纳标准化评估协议**：积极参与并推动建立行业公认的机器人性能与临床疗效评估标准，开展更大规模的多中心 RCT，为技术的有效性和安全性提供更高级别的证据。
- **对临床医生与治疗师**：
 1. **拥抱技术辅助疗法**：将康复机器人视为提升治疗剂量、强度和趣味性的有力工

具，而非竞争者。利用机器人来完成重复性的训练任务，将宝贵的专业精力更多地投入到评估、方案制定和人文关怀等核心环节。

2. **深度参与研发过程**：主动与工程师和产品设计师合作，将一线的临床需求和用户体验反馈融入到产品的早期设计和迭代过程中，确保新技术能真正解决临床痛点。

- **对产业领袖与投资者：**

1. **洞察商业模式演进**：清醒认识到市场正分化为“平台生态”和“远程服务”两种模式，并根据自身的资源禀赋和战略目标进行定位和投资。
2. **坚持以用户为中心的设计**：将可用性、舒适性和易用性置于与技术性能同等重要的位置，因为这些因素直接决定了产品，特别是家用产品的用户采纳率和依从性。
3. **战略性布局监管与准入**：将导航复杂的全球医疗器械监管（如 FDA, CE）和保险报销体系作为企业核心战略的一部分，早期投入资源进行规划和执行，这是决定商业成败的关键。

- **对政策制定者：**

1. **支持跨学科基础研究**：通过设立专项基金等方式，鼓励在柔性材料、人机交互和神经工程等前沿交叉领域的长期基础研究。
2. **优化创新医疗器械监管路径**：针对康复机器人这类快速发展的创新设备，探索更灵活、更高效的审评审批路径，在确保安全的前提下，加速其上市进程。
3. **制定清晰的医保报销政策**：与产业界和临床界合作，基于循证医学证据，尽快将有效的机器人康复治疗纳入医保覆盖范围，解决患者的支付难题，确保技术的普惠性。

总之，康复机器人的柔性化与灵巧化浪潮已然到来。抓住这一历史机遇，需要所有利益相关方的远见、合作与持续努力。通过协同创新，我们有理由相信，一个更加高效、更加人性化、更加充满希望的神经康复新时代正在向我们走来。

引用的著作

1. Soft pneumatic muscles for post-stroke lower limb ankle rehabilitation:

- leveraging the potential of soft robotics to optimize functional outcomes - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2023.1251879/full>
2. A Survey on Flexible Exoskeleton Robot - Sci-Hub, 6. 14, 2025, <https://www.sci-hub.se/downloads/2020-05-23/2d/xing2020.pdf>
3. Soft Rehabilitation and Nursing-Care Robots: A Review and Future Outlook - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/15/3102>
4. Soft pneumatic muscles for post-stroke lower limb ankle rehabilitation: leveraging the potential of soft robotics to optimize functional outcomes, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10539589/>
5. Hierarchical Compliance Control of a Soft Ankle Rehabilitation Robot Actuated by Pneumatic Muscles - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5722812/>
6. Neural Network Adaptive Control of Hand Rehabilitation Robot Driven by Flexible Pneumatic Muscles - White Rose Research Online, 6. 14, 2025, <https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/176185/1/Neural%20Network%20Adaptive%20Control%20of%20Hand%20Rehabilitation%20Robot%20Driven%20by%20Flexible%20Pneumatic%20Muscles.pdf>
7. Hierarchical Compliance Control of a Soft Ankle Rehabilitation Robot Actuated by Pneumatic Muscles - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/neurobotics/articles/10.3389/fnbot.2017.00064/full>
8. The-state-of-the-art of soft robotics to assist mobility: a review of physiotherapist and patient identified limitations of current lower-limb exoskeletons and the potential soft-robotic solutions - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36717869/>
9. Soft and Hard Robotics for Movement Rehabilitation, Analysis and Modelling | Request PDF, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/340890773_Soft_and_Hard_Robotics_for_Movement_Rehabilitation_Analysis_and_Modelling
10. A review of soft wearable robots that provide active assistance: Trends, common actuation methods, fabrication, and applications - Cambridge University Press, 6. 14, 2025, <https://www.cambridge.org/core/journals/wearable-technologies/article/review-of-soft-wearable-robots-that-provide-active-assistance-trends-common-actuation-methods-fabrication-and-applications/A79E0C1EFE0153811F6EC494EAE40E2E>
11. A Comprehensive Review Focused on the Whole Systems of the Soft Robotics, its Design Strategies and Outlook on the Future Considerations for the Soft Robots - International Journal of Pharmaceutical Investigation, 6. 14, 2025, <https://jpionline.org/10.5530/ijpi.20250239>
12. Soft Robotics in Rehabilitation: Jafari, Amir, Ebrahimi, Nafiseh - Amazon.com, 6. 14, 2025, <https://www.amazon.com/Soft-Robotics-Rehabilitation-Amir->

[Jafari/dp/0128185384](#)

13. Design of Soft Robots: A Review of Methods and Future Opportunities for Research - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2075-1702/12/8/527>
14. Robotic Devices used in Rehabilitation - Physiopedia, 6. 14, 2025, https://www.physio-pedia.com/Robotic_Devices_used_in_Rehabilitation
15. Soft exoskeletons | Soft Robotics Class Notes - Fiveable, 6. 14, 2025, <https://library.fiveable.me/soft-robotics/unit-9/soft-exoskeletons/study-guide/wHgeFmFMCUAxisKi>
16. The-state-of-the-art of soft robotics to assist mobility: a review of physiotherapist and patient identified limitations of current lower-limb exoskeletons and the potential soft-robotic solutions - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9885398/>
17. A Brief Review of Rehabilitation Wearable Robots for the Upper and Lower Limbs, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/377557459_A_Brief_Review_of_Rehabilitation_Wearable_Robots_for_the_Upper_and_Lower_Limbs
18. Review on Patient-Cooperative Control Strategies for Upper-Limb Rehabilitation Exoskeletons - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2021.745018/full>
19. Effects of Soft Robotic Gloves on Rehabilitation Outcomes in Individuals With Sensorimotor Hand Impairments: A Systematic Review - RESNA, 6. 14, 2025, <https://www.resna.org/sites/default/files/conference/2019/outcomes/Proulx.html>
20. Soft robotic glove gets thumbs-up from rehab experts - Wyss Institute, 6. 14, 2025, <https://wyss.harvard.edu/news/soft-robotic-glove-gets-thumbs-up-from-rehab-experts/>
21. Review of the effects of soft robotic gloves for activity-based rehabilitation in individuals with reduced hand function and manual dexterity following a neurological event, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7223210/>
22. (PDF) Review of the effects of soft robotic gloves for activity-based rehabilitation in individuals with reduced hand function and manual dexterity following a neurological event - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/341367030_Review_of_the_effects_of_soft_robotic_gloves_for_activity-based_rehabilitation_in_individuals_with_reduced_hand_function_and_manual_dexterity_following_a_neurological_event
23. Wearable Robotics in the Rehabilitation Continuum of Care: Assessment, Treatment and Home Assistance | Frontiers Research Topic, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/research-topics/44465/wearable-robotics-in-the-rehabilitation-continuum-of-care-assessment-treatment-and-home-assistance/magazine>

24. Soft Robotic Glove for Neuromuscular Rehabilitation - Wyss Institute, 6. 14, 2025, <https://wyss.harvard.edu/technology/soft-robotic-glove/>
25. (PDF) Compliant actuation of rehabilitation robots - ResearchGate, 6. 14, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/3344973 Compliant actuation of rehabilitation robots](https://www.researchgate.net/publication/3344973_Compliant_actuation_of_rehabilitation_robots)
26. A review on self-healing featured soft robotics - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2023.1202584/full>
27. A review on self-healing featured soft robotics - ResearchGate, 6. 14, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/374160657 A review on self-healing featured soft robotics](https://www.researchgate.net/publication/374160657_A_review_on_self-healing_featured_soft_robotics)
28. Soft robots built for extreme environments - OAE Publishing Inc., 6. 14, 2025, <https://www.oaepublish.com/articles/ss.2023.51>
29. A Review of Soft Robotic Actuators and Their Applications in Bioengineering, with an Emphasis on HASEL Actuators' Future Potential - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-0825/13/12/524>
30. Advancements in materials, manufacturing, propulsion and localization: propelling soft robotics for medical applications - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2023.1327441/epub>
31. Upper limb soft robotic wearable devices: a systematic review, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35948915/>
32. A review of soft wearable robots that provide active assistance: Trends, common actuation methods, fabrication, and applications - PMC - PubMed Central, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11265391/>
33. Novel bio-inspired soft actuators for upper-limb exoskeletons: design, fabrication and feasibility study - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2024.1451231/full>
34. Research Perspective in Flexible Hand Exoskeleton, 6. 14, 2025, <https://drpress.org/ojs/index.php/HSET/article/download/6550/6345/6368>
35. A Soft Variable Stiffness Actuator with a Chain Mail Structure as a Particle Jamming Interface, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-0825/14/5/247>
36. (PDF) Compliant actuator designs - ResearchGate, 6. 14, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/224587361 Compliant actuator designs](https://www.researchgate.net/publication/224587361_Compliant_actuator_designs)
37. arXiv:2504.13800v1 [cs.RO] 18 Apr 2025, 6. 14, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2504.13800>
38. Full article: Review of robotic grippers for high-speed handling of fragile foods, 6. 14, 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01691864.2025.2508785?src=>
39. Monolithic electrostatic actuators with independent stiffness modulation - PMC,

6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11782490/>
40. Design and Dimension Optimization of Rigid-Soft Hand Function Rehabilitation Robots, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/390726529_Design_and_Dimension_Optimization_of_Rigid-Soft_Hand_Function_Rehabilitation_Robots
41. Machine Learning Models for Assistance from Soft Robotic Elbow Exoskeleton to Reduce Musculoskeletal Disorders - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-0825/14/2/44>
42. Comparison of three soft robotic glove actuation methods and... - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-three-soft-robotic-glove-actuation-methods-and-application-of-new-method-to_fig1_378612873
43. Flexible lower limb exoskeleton rehabilitation robot: A review - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/382382722_Flexible_lower_limb_exoskeleton_rehabilitation_robot_A_review
44. Investigating Adaptive Tuning of Assistive Exoskeletons using Offline Reinforcement Learning: Challenges and Insights - arXiv, 6. 14, 2025, <https://arxiv.org/html/2505.00201v1>
45. Wearable Movement Sensors for Rehabilitation: A Focused Review of Technological and Clinical Advances - PubMed Central, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6700726/>
46. Elastic Actuators and Flexible Sensors for Exoskeleton ... - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/research-topics/66874/elastic-actuators-and-flexible-sensors-for-exoskeleton-robots>
47. Soft and stretchy fabric-based sensors for wearable robots - Wyss Institute, 6. 14, 2025, <https://wyss.harvard.edu/news/soft-and-stretchy-fabric-based-sensors-for-wearable-robots/>
48. Flexible Electronics and Devices as Human-Machine Interfaces for Medical Robotics - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9035141/>
49. Sweat-Resistant Wearable Robotic Sensors for Rehabilitation - Intelligent Living, 6. 14, 2025, <https://www.intelligentliving.co/sweat-resistant-wearable-robotic-sensors-for-rehabilitation/>
50. Review of Soft Robots using Artificial Intelligence (AI) - IJERT, 6. 14, 2025, <https://www.ijert.org/review-of-soft-robots-using-artificial-intelligence-ai>
51. Advances in Control Techniques for Rehabilitation Exoskeleton Robots: A Systematic Review - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-0825/14/3/108>
52. Machine-learned Adaptive Switching in Voluntary Lower-limb Exoskeleton Control: Preliminary Results - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/363933922_Machine-learned_Adaptive_Switching_in_Voluntary_Lower-



limb Exoskeleton Control Preliminary Results

53. 脑机接口：拓展人脑疆界的革命性技术与神经外科学的未来, 6. 14, 2025, <https://xhyxzz.pumch.cn/cn/article/doi/10.12290/xhyxzz.2025-0152>
54. 脑机接口技术在医疗健康领域应用白皮书 - 中国信息通信研究院, 6. 14, 2025, <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202107/P020210715603240201817.pdf>
55. Brain-Computer Interface Robotics for Hand Rehabilitation After Stroke: A Systematic Review | medRxiv, 6. 14, 2025, <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2019.12.11.19014571v1.full-text>
56. Hybrid Brain-Computer Interface Controlled Soft Robotic Glove for Stroke Rehabilitation, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38648145/>
57. An EEG/EMG/EOG-Based Multimodal Human-Machine Interface to Real-Time Control of a Soft Robot Hand - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/neurorobotics/articles/10.3389/fnbot.2019.00007/full>
58. SSVEP-Based Brain Computer Interface Controlled Soft Robotic Glove for Post-Stroke Hand Function Rehabilitation - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/361481528_SSVEP-Based_Brain_Computer_Interface_Controlled_Soft_Robotic_Glove_for_Post-Stroke_Hand_Function_Rehabilitation
59. The New Generation of Compliant Actuators for Use in Controllable Bio-Inspired Wearable Robots | Request PDF - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/308985068_The_New_Generation_of_Compliant_Actuators_for_Use_in_Controllable_Bio-Inspired_Wearable_Robots
60. The usefulness of assistive soft robotics in the rehabilitation of patients with hand impairment: A systematic review - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38876658/>
61. Robotics in Physical Rehabilitation: Systematic Review - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11395122/>
62. Effectiveness of robot-assisted task-oriented training intervention for upper limb and daily living skills in stroke patients: A meta-analysis | PLOS One, 6. 14, 2025, <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0316633>
63. Soft Robotics Market Size, Share, Trends, & Insights Report, 2035 - Roots Analysis, 6. 14, 2025, <https://www.rootsanalysis.com/soft-robotics-market>
64. Soft Robotics Market - Size, Growth Analysis & Trends 2033 - Business Research Insights, 6. 14, 2025, <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/soft-robotics-market-111671>
65. Soft Robotics Market Trends, Growth, and Future Outlook | Industry Insights 2033, 6. 14, 2025, <https://straitsresearch.com/report/soft-robotics-market>
66. Soft Robotics Global Market Report 2025 - The Business Research Company, 6. 14, 2025, <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/soft-robotics-global-market-report>



67. Soft Robotics Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025 - 2030), 6. 14, 2025, <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/soft-robotics-market>
68. Rehabilitation Robots Market to Hit USD 1.33 Billion by 2032, Growing at 18.76% CAGR – SNS Insider Report - GlobeNewswire, 6. 14, 2025, <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/04/25/3068282/0/en/Rehabilitation-Robots-Market-to-Hit-USD-1-33-Billion-by-2032-Growing-at-18-76-CAGR-SNS-Insider-Report.html>
69. Rehabilitation Robots Market Size Expected to Reach USD 1776.24 Mn by 2034, 6. 14, 2025, <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/02/21/3030522/0/en/Rehabilitation-Robots-Market-Size-Expected-to-Reach-USD-1776-24-Mn-by-2034.html>
70. Top 15 Rehabilitation Robotics Companies - Technavio, 6. 14, 2025, <https://blog.technavio.org/blog/top-15-rehabilitation-robotics-companies>
71. Wearable Robots and Exoskeletons Companies - Mordor Intelligence, 6. 14, 2025, <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/wearable-robots-and-exoskeletons-market/companies>
72. Comparison of Efficacy of Lokomat and Wearable Exoskeleton-Assisted Gait Training in People With Spinal Cord Injury: A Systematic Review and Network Meta-Analysis - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35493806/>
73. The_Most_Advanced_Rehabilita, 6. 14, 2025, <https://www.fftai.com/products-fourier-rehabilitation>
74. About Us - FOURIER-Robotics, 6. 14, 2025, <https://www.fftai.com/about-us>
75. Fourier Intelligence RehabHub™ - YouTube, 6. 14, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=Zx3UezdJYZU>
76. Buy Fourier Intelligence stock and other Pre-IPO shares on UpMarket, 6. 14, 2025, <https://www.upmarket.co/private-markets/pre-ipo/fourier-intelligence/>
77. Fourier (company) - Wikipedia, 6. 14, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_\(company\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_(company))
78. On its 10th anniversary, Fourier aims to introduce humanoid robots into the health and rehabilitation care scenario | The Frontline, 6. 14, 2025, <https://eu.36kr.com/en/p/3287569366459272>
79. About Us - Shanghai Siyi Intelligent Technology Co., Ltd, 6. 14, 2025, <https://www.syrebo.com/about-us>
80. SiYi Intelligence Raises Nearly \$15 Million in Series A Financing - News - Syrebo, 6. 14, 2025, <https://www.syrebo.com/news/siyi-intelligence-raises-nearly-15-million-in-65292315.html>
81. Hand Rehab Gloves for Home Use - SIYI INTELLIGENCE - Syrebo, 6. 14, 2025, <https://www.syrebo.com/rehabilitation-system-for-clinic/hand-rehab-gloves.html>
82. Rehabilitation Glove & Hand Exercise Tool | SyreboCare, 6. 14, 2025,



- <https://syrebocare.com/collections/rehabilitation-robot-gloves>
83. East Asian rehab robotics take US, Australia and more briefs | MobiHealthNews, 6. 14, 2025, <https://www.mobihealthnews.com/news/asia/east-asian-rehab-robotics-take-us-australia-and-more-briefs>
 84. One More Certificate: Syrebo Hand Rehabilitation Robot Achieves TGA Certification in Australia - PR Newswire APAC, 6. 14, 2025, <https://enmobile.prnasia.com/releases/apac/one-more-certificate-syrebo-hand-rehabilitation-robot-achieves-tga-certification-in-australia-474087.shtml>
 85. Imago Rehab Co-Founder and Chief Clinical Officer Honored with 2024 Innovation Award, 6. 14, 2025, <https://imagorehab.com/nuchols-nbcot-2024-innovator-of-the-year/>
 86. Invest in Imago Rehab: AI & robotics for the \$210B rehab industry - Wefunder, 6. 14, 2025, https://wefunder.com/imago?trk=public_post_main-feed-card_reshare-text
 87. Imago Rehab Profile - HigherGov, 6. 14, 2025, <https://www.highergov.com/awardee/imago-rehab-inc-104254226/>
 88. Imago Rehab 2025 Company Profile: Valuation, Funding & Investors | PitchBook, 6. 14, 2025, <https://pitchbook.com/profiles/company/489242-71>
 89. Imago Rehab on Wefunder 2024 - Kingscrowd, 6. 14, 2025, <https://kingscrowd.com/imago-rehab-on-wefunder-2024/>
 90. Roam Robotics, 6. 14, 2025, <https://www.roamrobotics.com/>
 91. Fourier Intelligence 2025 Company Profile: Valuation, Funding & Investors | PitchBook, 6. 14, 2025, <https://pitchbook.com/profiles/company/229975-48>
 92. Fourier Intelligence Inks Strategic Alliance Partnership with MyndTec Inc. - Nasdaq, 6. 14, 2025, <https://www.nasdaq.com/press-release/fourier-intelligence-inks-strategic-alliance-partnership-with-myndtec-inc.-2022-03-22>
 93. Fourier Rehab and Brooks Rehabilitation Sign Strategic MOU to Advance Research in Robotic Neurorehabilitation, 6. 14, 2025, <https://brooksrehab.org/resources/fourier-rehab-and-brooks-rehabilitation-to-advance-research-in-robotic-neurorehabilitation/>
 94. Portable robots for upper-limb rehabilitation after stroke: a systematic review and meta-analysis, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11034452/>
 95. Funding - Rebotics, 6. 14, 2025, <https://rebotics.co.uk/funding>
 96. The Application of Soft Robotic Gloves in Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-3425/13/6/900>
 97. The Application of Soft Robotic Gloves in Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37371378/>
 98. Effectiveness of a Soft Robotic Glove to Assist Hand Function in Stroke Patients: A Cross-Sectional Pilot Study - ResearchGate, 6. 14, 2025,

- [https://www.researchgate.net/publication/360202139 Effectiveness of a Soft Robotic Glove to Assist Hand Function in Stroke Patients A Cross-Sectional Pilot Study](https://www.researchgate.net/publication/360202139_Effectiveness_of_a_Soft_Robotic_Glove_to_Assist_Hand_Function_in_Stroke_Patients_A_Cross-Sectional_Pilot_Study)
99. Effects of a Soft Robotic Hand for Hand Rehabilitation in Chronic Stroke Survivors - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33895427/>
 100. Task-Oriented Training by a Personalized Electromyography-Driven Soft Robotic Hand in Chronic Stroke: A Randomized Controlled Trial - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38812378/>
 101. Effectiveness of soft robotic glove versus repetitive transcranial magnetic stimulation in post-stroke patients with severe upper limb dysfunction: A randomised controlled trial - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/neurology/articles/10.3389/fneur.2022.887205/full>
 102. Effectiveness of soft robotic glove versus repetitive transcranial magnetic stimulation in post-stroke patients with severe upper limb dysfunction: A randomised controlled trial - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36712422/>
 103. Efficacy of robotic training gloves in improving hand function and movement in stroke patients - Revistas UM, 6. 14, 2025, <https://revistas.um.es/sportk/article/download/660321/380621/2548311>
 104. Rehabilitation Robot Gloves - Upgraded Hand Stroke Recovery & Single Finger Rehab Trainer - Amazon.com, 6. 14, 2025, <https://www.amazon.com/PLANT-NUTRITION-Rehabilitation-Robot-Gloves/dp/BOCTZMFTCB>
 105. Soft Robotic Glove for Neuromuscular Rehabilitation, 6. 14, 2025, <https://www.roboct-health.com/product/13592/>
 106. Comparison between left and right hand after using of soft robot and rubber ball in patients with stroke: A Randomized control trail | Journal of Neonatal Surgery, 6. 14, 2025, <https://www.jneonatsurg.com/index.php/jns/article/view/4433>
 107. An interactive soft robotic hand-task training system with wireless task boards and daily objects on post-stroke rehabilitation | Wearable Technologies - Cambridge University Press, 6. 14, 2025, <https://www.cambridge.org/core/journals/wearable-technologies/article/an-interactive-soft-robotic-handtask-training-system-with-wireless-task-boards-and-daily-objects-on-poststroke-rehabilitation/B531A820CA5453A6534DFF86EA6E5D59>
 108. Effect of wearable exoskeleton on post-stroke gait: A systematic review and meta-analysis, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35525427/>
 109. Effect of wearable exoskeleton on post-stroke gait: A systematic review and meta-analysis, 6. 14, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/360457247 Effect of wearable exoskeleton on post-stroke gait a systematic review and meta-analysis](https://www.researchgate.net/publication/360457247_Effect_of_wearable_exoskeleton_on_post-stroke_gait_a_systematic_review_and_meta-analysis)

110. Effect of Robot-Assisted Wearable Exoskeleton on Gait Speed of Post-Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis of a Randomized Controlled Trials - Physical Therapy Rehabilitation Science, 6. 14, 2025,
<https://www.jptrs.org/journal/view.html?doi=10.14474/ptrs.2022.11.4.471>
111. Effect of Robot-Assisted Wearable Exoskeleton on Gait Speed of Post-Stroke Patients - Physical Therapy Rehabilitation Science, 6. 14, 2025,
https://www.jptrs.org/journal/download_pdf.php?doi=10.14474/ptrs.2022.11.4.471
112. Comparison of Efficacy of Lokomat and Wearable Exoskeleton-Assisted Gait Training in People With Spinal Cord Injury: A Systematic Review and Network Meta-Analysis - Frontiers, 6. 14, 2025,
<https://www.frontiersin.org/journals/neurology/articles/10.3389/fneur.2022.772660/full>
113. Investigation of the Effectiveness of the Robotic ReStore Soft Exoskeleton in the Development of Early Mobilization, Walking, and Coordination of Stroke Patients: A Randomized Clinical Trial - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2218-6581/13/3/44>
114. Efficacy of a Soft Robotic Exoskeleton to Improve Lower Limb Motor Function in Children with Spastic Cerebral Palsy: A Single-Blinded Randomized Controlled Trial - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38790405/>
115. Efficacy of a Soft Robotic Exoskeleton to Improve Lower Limb Motor Function in Children with Spastic Cerebral Palsy: A Single-Blinded Randomized Controlled Trial - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-3425/14/5/425>
116. (PDF) Efficacy of a Soft Robotic Exoskeleton to Improve Lower Limb Motor Function in Children with Spastic Cerebral Palsy: A Single-Blinded Randomized Controlled Trial - ResearchGate, 6. 14, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/380138698_Efficacy_of_a_Soft_Robotic_Exoskeleton_to_Improve_Lower_Limb_Motor_Function_in_Children_with_Spastic_Cerebral_Palsy_A_Single-Blinded_Randomized_Controlled_Trial
117. Soft Robotic Exoskeleton for Cerebral Palsy Rehabilitation - UNTHSC Scholar, 6. 14, 2025, <https://unthsc-ir.tdl.org/items/1bd20643-5903-41b8-89df-6acdb7ad2d21>
118. Flexible exoskeleton-assisted training enhances lower limb motor function after stroke: a systematic review and meta-analysis - PubMed, 6. 14, 2025,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40106023/>