

面向自动化生产的柔性面料抓取技术研究进展

薛利娟, 王 燕

北京印刷学院机电工程学院, 北京

收稿日期: 2026年9月12日; 录用日期: 2026年10月5日; 发布日期: 2026年10月12日

摘 要

随着服装产业智能制造和机器人技术的发展, 柔性面料的自动抓取与转运已成为实现服装生产自动化的重要环节。与传统刚性物体相比, 面料具有低刚度、高柔顺性、易变形、易褶皱以及材料表面特性差异明显等特点, 使其在抓取过程中容易出现滑移、变形、损伤及多层连带等问题, 对抓取机构的适应性和稳定性提出了较高要求。针对柔性面料自动抓取问题, 本文从抓取作用机制出发, 对现有面料抓取技术进行分类综述, 主要包括机械夹持、针刺式抓取、软体抓取、真空负压吸附、静电吸附以及非接触气动吸附等技术。分别介绍各类抓取技术的基本原理、典型研究进展及适用对象, 并从抓取稳定性、面料适应性、无损性、定位精度以及制造与运行成本等方面对不同技术进行综合比较。在此基础上, 分析当前柔性面料抓取技术面临的材料适应性、抓取状态感知及复杂环境下稳定控制等瓶颈问题, 并对多机制融合及复杂工况下的自适应抓取等发展方向进行展望。本文可为柔性面料自动抓取机构的设计及服装自动化制造系统的构建提供参考。

关键词

柔性面料, 自动抓取, 机器人抓取, 软体抓手, 非接触吸附

Review of Flexible Fabric Grasping Technologies for Automated Production

Lijuan Xue, Yan Wang

School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

Received: September 12, 2026; accepted: October 5, 2026; published: October 12, 2026

Abstract

With the development of intelligent manufacturing in the apparel industry and robotics technology, the automated grasping and transfer of flexible fabrics have become a crucial link in realizing garment production automation. Compared to traditional rigid objects, fabrics are characterized by low

stiffness, high compliance, susceptibility to deformation and wrinkling, and significant differences in surface properties. These characteristics make them prone to slipping, deformation, damage, and multi-layer entanglement during the grasping process, thus imposing higher requirements on the adaptability and stability of grasping mechanisms. Addressing the challenges of automated flexible fabric grasping, this paper classifies and reviews existing fabric grasping technologies based on their grasping mechanisms. These primarily include mechanical clamping, needle-based grasping, soft grasping, vacuum negative pressure adhesion, electrostatic adhesion, and non-contact pneumatic adhesion. The basic principles, typical research progress, and applicable materials for each grasping technology are introduced. Furthermore, a comprehensive comparison of these technologies is conducted regarding grasping stability, fabric adaptability, non-destructiveness, positioning accuracy, and manufacturing and operational costs. On this basis, the paper analyzes the current challenges faced by flexible fabric grasping technologies, such as material adaptability, grasping state perception, and stable control in complex environments. It also envisions future development trends, including multi-mechanism fusion and adaptive grasping under complex working conditions. This paper aims to provide a reference for the design of automated flexible fabric grasping mechanisms and the construction of automated garment manufacturing systems.

Keywords

Flexible Fabrics, Automated Grasping, Robotic Grasping, Soft Gripper, Non-Contact Adhesion

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

纺织服装行业是典型的劳动密集型产业, 物料搬运与流转贯穿生产全过程, 其效率直接影响生产和制造成本[1]。近年来, 随着劳动力成本持续上升以及市场对小批量、个性化生产需求不断增加, 实现织物自动抓取与高效转运已成为推动服装产业智能制造发展的关键环节。

实际生产中, 织物通常以多层堆叠形式存放, 如何实现顶层织物的精准分离与稳定抓取, 直接影响后续加工过程的连续性和自动化水平。织物具有低弯曲刚度、高透气性及明显的力学各向异性, 在受力过程中易产生褶皱和不可预测的形变[2][3]。此外, 多层堆叠状态进一步增加了抓取难度。层间摩擦会产生法向黏附和切向阻力, 高透气性织物易发生负压穿透, 导致多层连带抓取; 同时, 料堆厚度波动及边缘自然下垂使抓取深度难以准确控制, 易造成机械夹爪误抓或抓取失败[4]。

针对织物复杂的材料特性及抓取难题, 研究者提出了多种自动化抓取方法。目前, 织物自动抓取方法主要包括机械夹持、软体抓取、真空负压吸附、静电吸附及非接触气动吸附等技术路线[5]-[10]。本文围绕不同织物抓取机理, 对各类抓取技术的工作原理、研究进展、适用对象及性能特点进行系统综述, 并对其发展趋势进行分析, 为织物自动化抓取系统设计提供参考。

2. 柔性面料抓取技术的发展研究现状

柔性面料抓取技术经历了由传统机械夹持向非接触吸附、柔顺化及智能化演进的过程。早期机械夹爪结构简单成熟, 但易造成面料滑移与褶皱; 随后发展的真空负压与静电吸附等非接触技术虽具无损优势, 却受制于织物透气性。近年来, 软体抓手与仿生自适应机构的兴起显著增强了对复杂织物的适应能力。未来, 该领域将由单一机构优化转向状态感知与自适应控制的协同发展。

为了系统梳理现有研究, 下面将以执行机构与面料表面是否存在直接物理作用, 将柔性面料抓取技术划分为非接触式抓取方式与接触式抓取方式并深入剖析其基本原理、典型研究进展及性能特点。

2.1. 非接触式抓取方式

非接触式抓取主要依靠气动力或静电场产生吸附作用, 其抓取力来源于流体压力场或电场作用, 而非传统机械夹持。

2.1.1. 静电吸附抓取

静电吸附通过高压直流电在介电材料表面建立强电场, 使织物在电场作用下产生库仑力或极化力, 从而实现吸附。电极表面通常覆盖一层薄绝缘介质, 以避免电荷直接注入织物, 如图 1 所示。当施加数千伏高压电时, 电场线穿透介电层及空气间隙作用于下方织物。对于导电材料, 静电场会引起织物内部自由电荷重新分布, 产生直接的库仑力; 而对于化纤、棉布等绝缘织物, 强电场会使高分子内部发生极化, 诱导正负电荷中心发生偏移, 进而通过极化电场力实现吸附[11][12]。

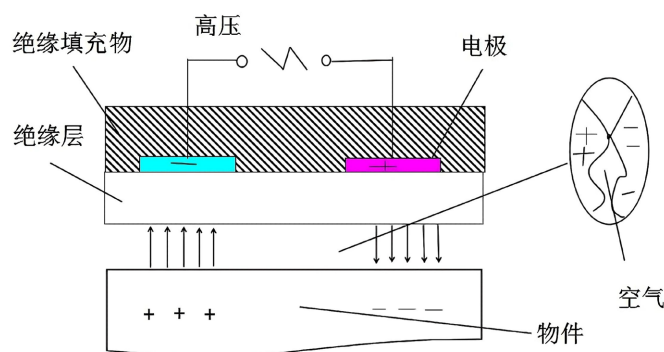


Figure 1. Principle of electrostatic adhesion

图 1. 静电吸附原理图

近年来, 研究主要围绕静电场建模、电极结构优化及抓手设计等方面展开。在静电场建模方面, 有学者结合纬编针织物的微观三维线圈结构与介电特性, 构建了精细的静电吸附力数学模型, 为布料的自动抓取提供了理论计算依据[13]。针对传统机械夹持易造成织物损伤的问题, 相关研究提出了刚性与柔性静电抓手, 提高了低致密性织物的抓取适应性[14]。此外, 微型电粘附抓手实现了对远大于自身尺寸织物碎片的稳定抓取, 进一步拓展了静电吸附在微尺度操作中的应用[15]。近年来, 还出现了滚轮式静电夹持结构, 通过夹持织物边缘实现大尺寸布片搬运, 提高了对不同尺寸织物的适应能力[16]。总体来看, 静电吸附具有受力均匀、接触柔和及无机械压痕等优势。因此, 静电吸附更适用于轻薄、易损织物的无损搬运, 但从当前研究来看, 其抓取性能受织物介电特性及环境条件影响较大, 例如电极的距离, 耐久性问题, 复杂工况下的稳定性仍有待提高。

2.1.2. 非接触吸盘抓取

非接触气动吸附利用高速气流形成局部负压实现织物抓取, 主要包括伯努利吸附和科恩达效应吸附两种形式。

伯努利吸附基于伯努利原理, 通过压缩空气经喷嘴高速喷射, 在吸盘与织物之间形成高速流场, 使局部静压降低, 从而利用上下表面的压差实现对织物的吸附[17], 如图 2 所示。科恩达效应吸附则利用高速射流沿曲面附壁流动, 在吸盘表面诱导形成负压区并卷吸周围空气, 实现对目标织物的非接触夹持, 原理如图 3 所示。

近年来, 国内外学者围绕气动非接触吸附的流场优化、结构设计及织物抓取性能开展了大量研究。针对皮革等柔性材料, 已有研究验证了伯努利抓取器在无接触搬运中的可行性[17]。Mykhailyshyn 团队研究表明, 通过优化喷嘴结构及工作间隙, 可改善压力分布并提高抓取稳定性[18]-[20]。然而, 该研究方法的局限性在于, 其当前的仿真建模与理论计算均将操作对象理想化为平整且非多孔的刚性表面, 因此, 在面向真实服装生产中高透气、易变形的柔性面料时, 未充分耦合面料透气漏风与表面形变效应应的流体仿真方法, 在实际抓取稳定性评估中存在一定的理论局限。科恩达吸附(或康达吸附)方面, T.K. Lien 和 P.G.G. Davis 提出了基于侧向科恩达吸附喷射器的非接触式抓取器, 验证了其对柔性、易变形材料稳定抓取的有效性[21]。刘汉邦等人进一步结合理论分析、数值仿真和实验研究, 对面向服装面料的科恩达吸附夹持器进行了系统分析, 证实了其在多种服装面料无损抓取及自动化输送中的应用潜力[22]。

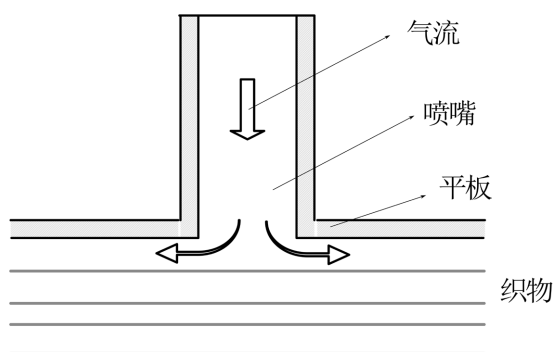


Figure 2. Principle of Bernoulli gripping
图 2. 伯努利吸附原理

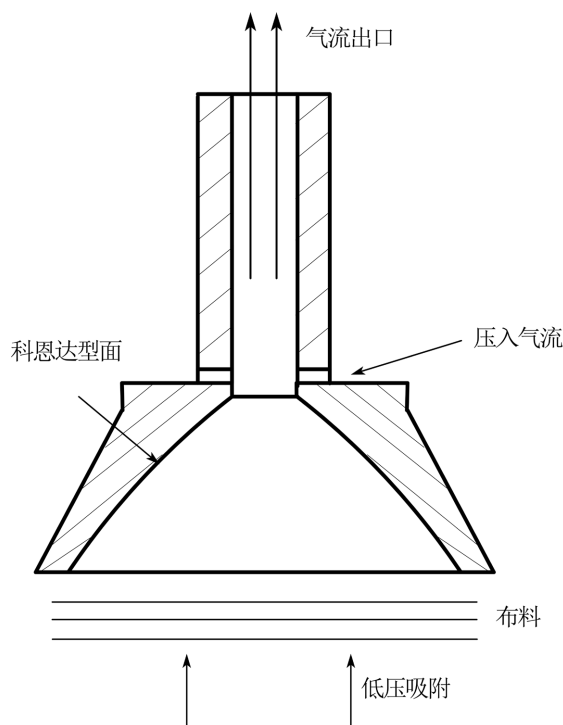


Figure 3. Principle of Coanda-effect gripping
图 3. 科恩达吸附原理图

从研究方法来看, 伯努利式抓取器主要通过优化喷嘴结构和气流参数调控吸附区域压力分布, 其优点是结构原理较为明确, 便于进行流场数值分析和参数优化; 但抓取性能对工作间隙变化较为敏感。相比之下, 科恩达效应抓取器通过利用附壁射流形成稳定负压区域, 对柔性织物具有较好的非接触适应能力, 但其内部流场结构更加复杂, 对喷射器结构设计及气流控制提出了更高要求。

气动非接触吸附技术能够避免抓取过程中与织物直接接触, 具有无机械压痕、无表面损伤等优势。但该类技术的吸附性能高度依赖于流场参数和气流控制精度。当喷射压力、喷嘴结构或工作间隙匹配不合理时, 容易出现吸附力不足或高速气流将织物吹离工作区域的问题, 影响抓取稳定性。未来仍需进一步优化流场设计及气流控制策略, 以提高不同织物工况下的抓取稳定性和环境适应能力。

2.1.3. 真空负压吸附

真空负压吸附通过真空发生器或气泵在吸盘内部形成低于环境大气压的负压区域, 利用内外压差产生法向吸附力, 实现织物抓取[23][24], 原理如图 4 所示。由于其结构简单、响应速度快、承载能力强且控制技术成熟, 真空负压吸附已成为工业自动化领域应用最广泛的抓取方式之一。

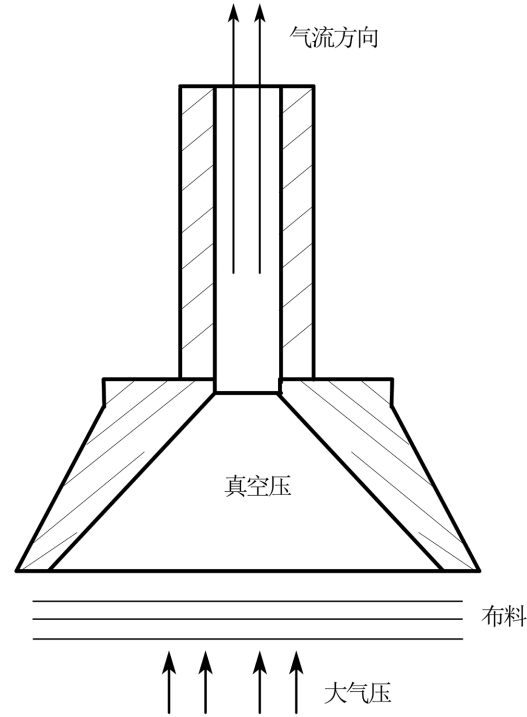


Figure 4. Principle of vacuum suction
图 4. 真空负压吸附原理

近年来, 针对柔性材料自动化搬运需求, 国内外学者围绕真空吸附装置的结构优化及抓取性能开展了大量研究。Ray Wai 等人设计了适用于柔软、不透气织物的真空吸附抓取系统, 首先利用伯努利方程推导所需的理论负压与管路损耗, 随后提出真空抓取压力理论圆(VGTC)概念, 最后针对不同材质的机织口袋布进行自动化抓取实验验证实现了织物的稳定抓取与精确放置, 然而, 对于高透气布料存在一定的局限性[25][26]。Kaige Shi 等人提出了一种基于零压差原理的新型真空吸附装置, 该装置通过在真空区外围生成高速旋转的水层, 利用流体惯性力构建陡峭的压力梯度, 使吸盘边界压力与大气压完全相等, 从而阻断空气泄漏。有效改善了传统真空吸盘在粗糙或不平整表面因密封性不足导致的真空泄漏问题, 提高了吸附可靠性[27]。Kobayashi 等人设计了一种集成滚筒单元与真空吸附槽的搬运机构, 通过真空吸附

与卷绕协同作用减小大尺寸布料的自由变形区域, 提升了织物搬运过程中的稳定性和可控性[28]。

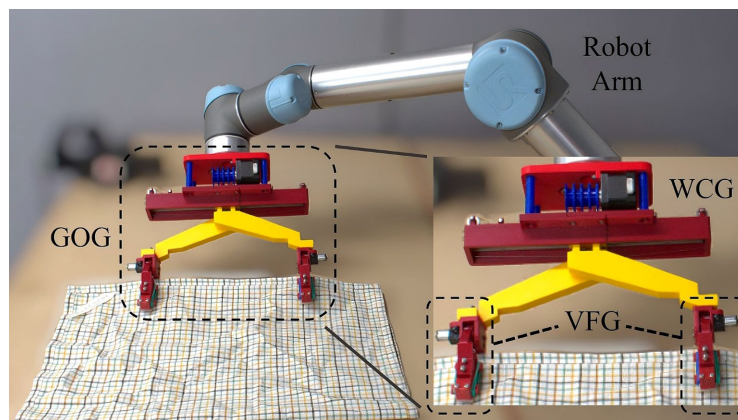
真空负压吸附技术在皮革、涂层织物、人造革等致密、低透气性材料的抓取中具有良好的适用性, 能够形成稳定的真空密封, 从而提供较大的吸附力, 具有抓取可靠、承载能力强等优点。对于棉纺、针织及蕾丝等高透气性织物, 由于纤维间存在大量微观孔隙, 负压难以局限于单层织物表面, 容易穿透至下层材料, 导致真空泄漏及多层连带吸附现象, 降低单层分离和抓取精度。此外, 吸附效果对织物表面平整度及密封性能具有较高依赖性, 使其在复杂织物和堆叠工况下的适应能力受到一定限制。因此, 提升真空吸附对高透气性织物的单层分离能力和复杂工况下的抓取稳定性, 仍是真空负压吸附技术的重要研究方向。

2.2. 接触式抓取

接触式抓取主要依靠执行机构与织物表面之间产生直接物理作用力(包括机械夹持力、摩擦力、纤维互锁力以及微结构黏附力等)实现织物的提取与转移。根据接触作用机制的不同, 目前研究主要集中于机械手抓取、针刺式抓取以及仿生与软体抓手三种类型。

2.2.1. 机械手抓取

机械手抓取是织物自动化操作中应用较早且研究较为成熟的一类接触式抓取方式, 其基本原理是利用末端执行器与织物之间的机械接触及摩擦作用实现夹持。由于织物具有柔软、易变形和层间耦合等特性, 传统刚性夹爪通常需要结合工作台等外部约束, 通过施加垂向压力使织物产生局部变形, 再利用侧向夹紧力完成单层织物的提取[29]。



注: WCG——宽度控制机构; VFG——变摩擦机构。

Figure 5. G.O.G. gripper

图 5. G.O.G. 夹爪

目前, 两指和三指刚性夹爪仍是织物抓取领域应用较广的结构形式。Garcia-Camacho 等人建立了双机械臂织物操作性能评测体系, 为不同抓取策略的性能评价提供了统一标准[30]。在此基础上, 研究者针对传统夹爪在柔性织物操作中的适应性问题, 从结构设计、环境辅助以及力控制等方面进行了改进。例如, Gripper-on-Gripper (G.O.G) 双层夹持结构通过优化接触形式提高了织物分离能力[31], 其中 WCG 用于调节开口以适应不同尺寸的布料; 手指上的 VFG 则通过切换摩擦模式, 来实现稳固抓取或滑动抓取, 如图 5 所示; 无源自适应夹爪利用机构柔顺性增强了对不同厚度织物的适应能力[10]; 推压辅助单层分离策略通过引入环境交互降低了多层误抓概率[32]; 集成力反馈控制的三指夹爪则通过实时感知接触状态提升了抓取过程的稳定性[33]。这类传统的二指、三指抓取机构主要依靠摩擦力进行抓取, 结构简单、定

位精度高, 但结构也使得布料容易被压伤, 对摩擦条件敏感等缺点。除传统指式夹持结构外, 滚轮式抓取机构也逐渐应用于织物分离任务。这种滚轮式抓取依靠两个并排滚轮向内旋转, 推起褶皱并拾取。Yamazaki 等人提出了一种基于定向毛刷滚轮的机械抓手, 通过滚动摩擦作用带动最上层织物卷起并实现分离, 避免了传统夹爪依靠垂向压紧实现抓取的方式[34]。随后, 研究者进一步提出了集成滚卷释放机构[35]和被动自适应滚轮夹具[36]等结构, 滚轮式抓取如图 6 所示, 并针对滚轮分离过程中的接触机理和运动控制方法进行了优化[37]。相较于传统夹爪, 滚轮式机构在降低多层连带抓取方面具有一定优势, 适用于大尺寸柔性织物的自动化搬运。



Figure 6. Roller gripper
图 6. 滚轮式抓夹

总体而言, 机械手抓取具有结构简单、控制方法成熟以及定位精度较高等特点, 是当前织物自动化操作系统的重要组成部分。然而, 该类方法对接触状态和摩擦条件具有较强依赖, 在处理超薄、柔软或多层堆叠织物时, 仍可能出现褶皱、滑移以及多层误抓等问题。未来需要进一步结合柔顺机构设计、接触状态感知以及智能控制方法, 提高机械夹爪对复杂织物环境的适应能力。

2.2.2. 针刺式抓取

针刺式抓取通过针体刺入织物纤维间隙, 并利用纤维间机械互锁作用实现稳定夹持。相比主要依赖表面摩擦作用的机械夹爪, 针刺式抓取能够提供更高的抓取可靠性, 在疏松、柔软以及难以通过非接触方式操作的织物处理中具有一定优势。

现有研究主要围绕针体结构设计、刺入方式优化以及损伤控制等方面展开。SAS Automation 开发了一种弧形针抓手, 通过控制弯针旋入轨迹实现织物锚定, 在提高抓取稳定性的同时降低了对纤维结构的破坏[38]。针对非刚性织物, Auguste 提出了一种交叉式针刺式抓取机构, 如图 7 所示, 利用两排针的角度差异在面料内部产生张力, 实现了对面料的稳固抓取和极佳控制。通过不断地制作原型和测试找出最为合适的角度[39]。此外, 相关研究进一步结合结构优化与运动控制方法提升针刺抓取性能。Choi 等[40]通过优化针体布局和运动策略, 提高了复杂工况下的抓取稳定性。

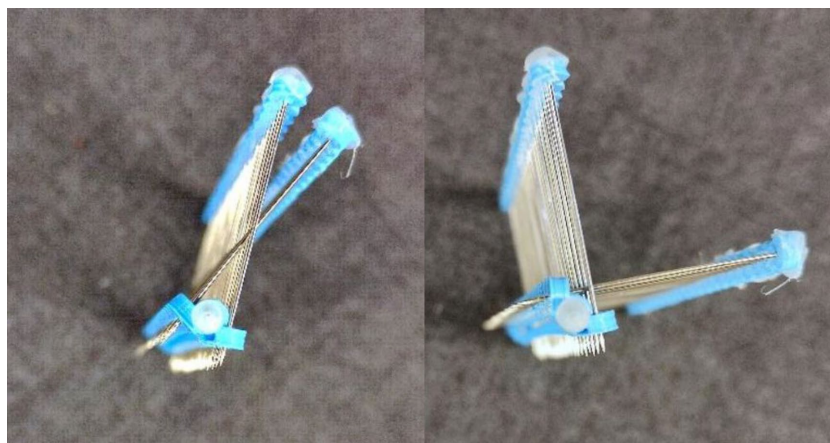


Figure 7. Closed (left) and open (right) states of the crossed-needle gripper
图 7. 交叉针排夹爪的闭合(左)与展开状态(右)

针刺式抓取具有较强的单层分离能力和较高的抗滑移性能,但由于其依赖针体与纤维之间的机械嵌合作用,对于丝绸等高价值或易损织物仍存在潜在损伤风险。因此,如何通过针体结构优化、柔顺控制以及损伤感知技术实现可靠抓取与织物保护之间的平衡,是该类方法进一步发展的关键。

2.2.3. 仿生与软体抓手

仿生与软体抓手利用柔性材料或仿生微结构实现与织物表面的自适应接触,是近年来织物抓取领域的重要研究方向。相比传统刚性机构,软体夹持器能够通过连续形变适应织物表面形貌,在降低局部接触压力的同时提升抓取稳定性。

受自然界生物黏附与捕获机制启发,研究者提出了多种仿生抓取结构。例如,受寄生鱼吸附结构启发,有研究将微针阵列与气动软体手指相结合,形成侵入式锚定与柔顺夹持协同作用的混合抓取方式。实验结果表明,该结构具有较快响应速度和较高循环稳定性,单层织物分离成功率可达到 90%以上,如图 8 所示[41]。然而该设计方法仍存在一定的局限性,抓取机制对织物特性的依赖度较高,面对极高透气性或编织极其疏松的面料时,容易因严重漏气导致软体捏合壁发生屈曲变形失效或多层误抓。在软体抓手研究上,国内苏军强团队[7] [8] [42]也研究较为深入,在设计软体抓手、提高准确性方面做出贡献。

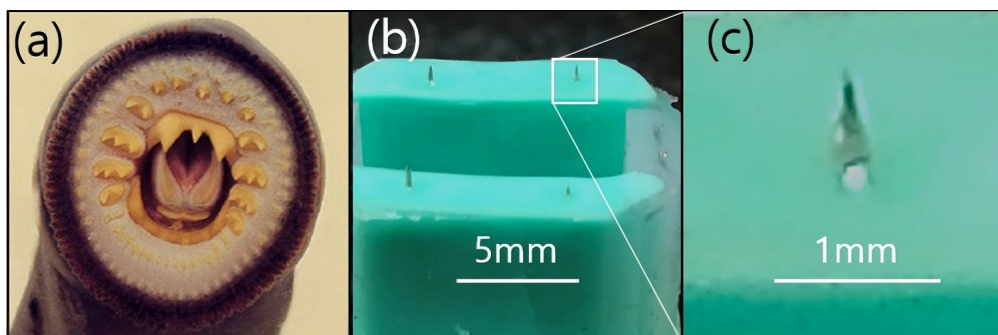


Figure 8. Pacific lamprey-inspired soft gripper with microneedles
图 8. 受太平洋七鳃鳗启发的微针软体抓手

总体来看,仿生与软体抓手能够有效提升抓取过程中的柔顺性和环境适应能力,为柔性织物自动化操作提供了新的技术路径。然而,其在实际应用中仍面临材料耐久性、抓取力可控性以及复杂织物环境适应性等问题,需要结合柔性材料设计、智能感知和自适应控制方法进一步优化。

3. 布料抓取与转移方法的技术性能综合对比

为全面反映各抓取技术在复杂工业场景中的综合表现，指导实际自动化产线的设计，本节构建了技术性能对比及适用场景匹配。

Table 1. Performance comparison of different flexible fabric grasping technologies
表 1. 不同柔性面料抓取技术的性能对比

评价类型	真空负压吸附	静电吸附	非接触吸盘抓取	机械手	针刺式抓取	软体手抓取
单层剥离能力	良好	优	优	良好	良好	中等
转移过程定位精度	良好	中等	优	良好	良好	中等
面料表面形变与无损性	优	优	良好	较差	较差	良好
制造成本与运行能耗	成本中等 能耗中等	成本中等 能耗低	成本高 能耗高	成本中等 能耗低	成本低 能耗低	成本高 能耗中等
车间复杂环境鲁棒性	中等	良好	良好	优	良好	良好

注：表中“优、良好、中等”等等级为基于代表性文献报道结果进行的综合定性评价，并非在统一实验条件下获得的绝对性能排序。评价主要综合考虑单层抓取成功率、适用织物厚度、定位误差、面料变形与损伤、驱动方式及环境适应性等因素。由于不同研究在面料材质、厚度、尺寸、透气性、堆叠层数、抓取器结构及测试条件等方面存在差异，因此文献中的量化数据主要用于辅助判断各类技术的典型性能，不直接进行跨文献数值比较。

表 1 表明，各类织物抓取技术在性能上具有明显的互补性。静电吸附和非接触吸盘在织物无损抓取方面优势突出，机械手和针刺式抓取具有较高的抓取稳定性和定位精度，而软体抓手兼具良好的柔顺性和环境适应能力。然而，单一抓取方式难以兼顾单层分离、无损抓取及复杂工况适应性等多方面需求，因此融合多种抓取机制与智能感知技术，实现不同抓取方式优势互补，已成为织物自动化抓取的重要发展方向。

Table 2. Applicable scenarios of different flexible fabric grasping technologies
表 2. 不同柔性面料抓取技术的适用场景

抓取方式	典型适用面料	主要特点
真空负压吸附	皮革、涂层布、人造革等低透气材料	吸附力大，但不适用于高透气织物
静电吸附	丝绸、棉布、化纤及复合材料	无损、均匀吸附，但受材料介电性能影响
非接触吸盘	薄型、柔软及易损织物	无接触抓取，可减少褶皱和损伤
机械手	牛仔布、厚织物、结构稳定材料	承载能力强，但柔顺性不足
针刺式抓取	针织物、无纺布、多孔织物	单层分离能力强，但存在穿刺损伤
软体手抓取	柔性服装、复杂曲面织物	顺应性好，可实现柔性无损抓取

由表 2 可知，不同织物抓取方式均具有特定的适用范围，但单一抓取机制难以同时满足织物抓取过程中对稳定性、柔顺性和无损性的综合需求。例如，真空负压吸附适用于致密低透气材料，但对多孔织物易产生漏气及多层连带；静电吸附和非接触吸附能够降低接触损伤，但受材料特性和环境因素影响较大；机械手和针刺式抓取具有较高的抓取可靠性，但存在接触损伤或侵入风险。因此，融合多种作用机制的复合式抓取方式逐渐成为织物自动化处理的重要发展方向。近年来，研究者通过结合机械夹持、静电吸附、软体结构及微针锁定等多种技术，实现了不同抓取方式之间的优势互补。例如，机械结构可提供稳定承载能力，静电或微针结构可增强柔性织物的固定效果，而软体结构能够提高与织物表面的顺应

性。相关研究表明,多模态融合抓取能够有效提升复杂织物条件下的适应能力和抓取可靠性,为柔性材料智能操作提供了新的技术路径[43]-[45]。总体而言,面向不同织物特性的自适应、多机制融合抓取将成为未来织物自动化操作的重要发展趋势。

4. 结论与展望

织物抓取是服装智能制造中的关键环节。目前已发展出真空负压、静电吸附、非接触气动、机械夹持、针刺及软体等多种技术路线,并在单层分离和无损伤性上取得了显著进展。但单一方式难以兼顾不同工况,尚缺乏通用的抓取方案。

随着机器人技术与柔性材料科学的发展,织物抓取技术正朝着高适应性和多模态融合方向迈进。一方面,融合机械夹持、静电、微针锁定及软体驱动的复合式结构有望打破单一物理机制的局限,实现优势互补;另一方面,提升系统在非结构化环境下的感知与自适应调节能力也是未来的重要突破口。面对复杂褶皱和多层堆叠状态,未来可通过引入更为灵敏的传感反馈(如先进的力/触觉感知与基础机器视觉识别)结合自动化控制策略,动态调整夹爪的抓取力与姿态,以增强系统的环境鲁棒性。

未来,应重点围绕多模态抓取机构的设计与优化、多传感信息融合及闭环自适应控制开展研究,进一步实现高效率、高精度和低损伤的自动化抓取,为柔性服装生产提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] Taylor, P.M., Pollett, D.M. and Grießer, M.T. (1996) Pinching Grippers for the Secure Handling of Fabric Panels. *Assembly Automation*, **16**, 16-21. <https://doi.org/10.1108/01445159610126357>
- [2] 王建萍, 沈津竹, 姚晓凤, 等. 服装裁片自动抓取技术及其布局方法的研究进展[J]. 纺织学报, 2024, 45(6): 227-234.
- [3] 刘汉邦, 李新荣, 刘立东. 服装面料自动抓取转移方法的研究进展[J]. 纺织学报, 2021, 42(1): 190-196.
- [4] Zacharia, P., Zoumpouros, G., Koustoumpardis, P., et al. (2007) Robot Handling of Non-Rigid Materials for the Sewing Process. https://www.researchgate.net/publication/256195340_Robot_handling_of_non-rigid_materials_for_the_sewing_process
- [5] 张楠, 何玉成, 王南. 操作机器人机械手爪的设计研究及应用[J]. 机械设计, 2013, 30(3): 17-20+61.
- [6] Borrás, J., Alenya, G. and Torras, C. (2020) A Grasping-Centered Analysis for Cloth Manipulation. *IEEE Transactions on Robotics*, **36**, 924-936. <https://doi.org/10.1109/tro.2020.2986921>
- [7] 王楠. 基于软体机械手的织物逐层抓取与落料研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [8] 沈津竹. 基于软体手指的服装裁片堆垛抓取模型研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [9] Efendi, A. and Huang, C. (2025) Robot Arm Technology in Detection and Manipulation in Smart Pharmacies: A Review. *International Journal of Humanoid Robotics*, **22**, Article 2530001. <https://doi.org/10.1142/s0219843625300016>
- [10] Seino, A., Tokuda, F., Kobayashi, A. and Kosuge, K. (2025) Passive Actuator-Less Gripper for Pick-and-Place of a Piece of Fabric. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **30**, 5856-5866. <https://doi.org/10.1109/tmech.2025.3543557>
- [11] 王黎明, 胡青春. 基于静电吸附原理的双履带爬壁机器人设计[J]. 机械设计, 2012, 29(4): 22-25.
- [12] 李小丽, 李朝治. 静电吸附机械手技术开发与应用展望[J]. 机电工程技术, 2026, 55(7): 1-7+90.
- [13] 刘立东, 李新荣, 刘汉邦, 等. 基于纬编针织物特性的静电吸附力模型[J]. 纺织学报, 2021, 42(3): 161-168.
- [14] 陈辉云. 基于静电吸附机理的机械抓手研究及设计[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- [15] Digumarti, K.M., Cacucciolo, V. and Shea, H. (2021) Dexterous Textile Manipulation Using Electroadhesive Fingers. 2021 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Prague, 27 September-1 October 2021, 6104-6109. <https://doi.org/10.1109/iros51168.2021.9636095>
- [16] Compact Electro-Adhesion Gripper for Fabric Handling. <https://www.hkita.com/en/our-innovation-tech/projects/compact-electro-adhesion-gripper-fabric-handling>
- [17] Dini, G., Fantoni, G. and Failli, F. (2009) Grasping Leather Plies by Bernoulli Grippers. *CIRP Annals*, **58**, 21-24. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.076>

- [18] Mykhailyshyn, R., Duchoň, F., Virgala, I., Sinčák, P.J. and Majewicz Fey, A. (2023) Optimization of Outer Diameter Bernoulli Gripper with Cylindrical Nozzle. *Machines*, **11**, Article 667. <https://doi.org/10.3390/machines11060667>
- [19] Mykhailyshyn, R. and Xiao, J. (2022) Influence of Inlet Parameters on Power Characteristics of Bernoulli Gripping Devices for Industrial Robots. *Applied Sciences*, **12**, Article 7074. <https://doi.org/10.3390/app12147074>
- [20] Mykhailyshyn, R., Savkiv, V., Fey, A.M. and Xiao, J. (2023) Gripping Device for Textile Materials. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **20**, 2397-2408. <https://doi.org/10.1109/tase.2022.3208796>
- [21] Lien, T.K. and Davis, P.G.G. (2008) A Novel Gripper for Limp Materials Based on Lateral Coanda Ejectors. *CIRP Annals*, **57**, 33-36. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.119>
- [22] 刘汉邦, 李新荣, 冯文倩, 等. 面向服装面料的柯恩达效应式非接触夹持器吸附性能[J]. 纺织学报, 2022, 43(2): 208-213.
- [23] 司震鹏, 曹西京, 姜小放. 真空吸附式机械手系统设计[J]. 包装与食品机械, 2009, 27(6): 26-30.
- [24] 汤晓涛. 负压吸附式气动软体机械手研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江科技大学, 2024.
- [25] Kong, R.W.M., Liu, M. and Kong, T.H.T. (2024) Design and Experimental Study of Vacuum Suction Grabbing Technology to Grasp Fabric Piece. *Open Access Library*, **11**, 1-17. <https://doi.org/10.4236/oalib.1112292>
- [26] Kong, R.W.M., Ning, D. and Kong, T.H.T. (2025) Innovative Vacuum Suction-Grabbing Technology for Garment Automation. In: *Science and Technology: Developments and Applications Vol. 6*, BP International, 148-170. <https://doi.org/10.9734/bpi/stda/v6/4600>
- [27] Shi, K. and Li, X. (2020) Vacuum Suction Unit Based on the Zero Pressure Difference Method. *Physics of Fluids*, **32**, Article 017104. <https://doi.org/10.1063/1.5129958>
- [28] Kobayashi, A., Dong, W., Seino, A., Tokuda, F. and Kosuge, K. (2025) Rollup: Rolling-Up End-Effector for Fabric Handling. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **10**, 11204-11211. <https://doi.org/10.1109/lra.2025.3609086>
- [29] Shibata, M. and Hirai, S. (2016) A Pinching Strategy for Fabrics Using Wiping Deformation. *Robotics*, **5**, Article 10. <https://doi.org/10.3390/robotics5020010>
- [30] Garcia-Camacho, I., Lippi, M., Welle, M.C., Yin, H., Antonova, R., Varava, A., et al. (2020) Benchmarking Bimanual Cloth Manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **5**, 1111-1118. <https://doi.org/10.1109/lra.2020.2965891>
- [31] Lee, D., Chen, W., Chen, X. and Rojas, N. (2024) G.O.G: A Versatile Gripper-on-Gripper Design for Bimanual Cloth Manipulation with a Single Robotic Arm. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **9**, 2415-2422. <https://doi.org/10.1109/lra.2024.3357028>
- [32] Ono, E. and Kunikatsu Takase, (2007) On Better Pushing for Picking a Piece of Fabric from Layers. 2007 *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Sanya, 15-18 December 2007, 589-594. <https://doi.org/10.1109/robio.2007.4522228>
- [33] Matos, A., Caballa, S., Zagarra, D., Guzman, M.A.A., Lizano, D., Encinas, D.F.G., et al. (2020) Three-Fingered Gripper for Multiform Object Grasping with Force Feedback Sensing Control. 2020 *IEEE ANDESCON*, Quito, 13-16 October 2020, 1-5. <https://doi.org/10.1109/andescon50619.2020.9271990>
- [34] Yamazaki, K. and Abe, T. (2021) A Versatile End-Effector for Pick-and-Release of Fabric Parts. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **6**, 1431-1438. <https://doi.org/10.1109/lra.2021.3057053>
- [35] Abe, T., Kawasaki, Y. and Yamazaki, K. (2020) A Robotic End-Effector with Rolling up Mechanism for Pick-and-Release of a Cotton Sheet. *ROBOMECH Journal*, **7**, Article No. 37. <https://doi.org/10.1186/s40648-020-00186-x>
- [36] Unde, J., Colan, J. and Hasegawa, Y. (2024) Design, Modeling, and Experimental Verification of Passively Adaptable Roller Gripper for Separating Stacked Fabric. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **9**, 9335-9342. <https://doi.org/10.1109/lra.2024.3461550>
- [37] Jiang, H., Jiang, X., Zhou, Y., Chen, H., Li, P. and Liu, Y. (2022) Variable-Friction-Based In-Hand Manipulation of Fabrics Applied to Unfolding Operations. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **7**, 12259-12266. <https://doi.org/10.1109/lra.2022.3216230>
- [38] SAS Automation Expands Needle Gripper Line. <https://www.automation.com/article/sas-automation-expands-needle-gripper-line>
- [39] Auguste, C. (2023) Robotic Gripper for the Handling of Non-Stiffened Fabric. Mälardalen University.
- [40] Choi, Y.W., Lee, J., Lee, Y., Lee, S., Jeong, W., Lim, D.Y., et al. (2025) A Vision-Guided Adaptive and Optimized Robotic Fabric Gripping System for Garment Manufacturing Automation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **92**, Article 102874. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102874>
- [41] Ku, S., Myeong, J., Kim, H. and Park, Y. (2020) Delicate Fabric Handling Using a Soft Robotic Gripper with Embedded Microneedles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **5**, 4852-4858. <https://doi.org/10.1109/lra.2020.3004327>
- [42] 王楠, 苏军强. 平纹织物逐层分离过程中的屈曲模拟与分析[J]. 丝绸, 2022, 59(9): 36-44.

- [43] Hwang, G.T., Park, J., Cortes, D.S.D., *et al.* (2022) Electroadhesion-Based High-Payload Soft Gripper with Mechanically Strengthened Structure. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **69**, 642-651. <https://doi.org/10.1109/tie.2021.3053887>
- [44] 王潇漫. 基于视觉的布料抓取规划与操作研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [45] Song, B., Seo, Y., Yoon, J., Kim, B. and Yun, D. (2024) A Hybrid Gripper with Electro-Adhesive Film for Variable Friction. *Sensors and Actuators A: Physical*, **380**, Article 116001. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.116001>