

# 评估预穿衣步骤：通过模仿学习展开医用服装

David Blanco-Mulero, Julia Borrás, Carme Torras

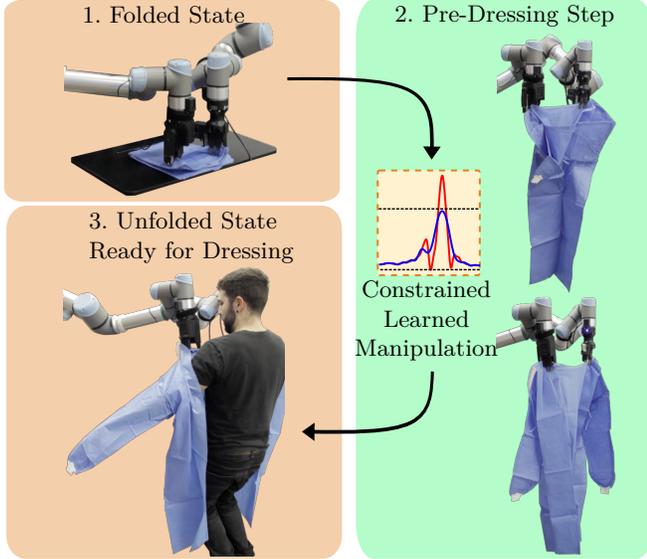


Fig. 1: 预穿衣步骤是将最初折叠的衣物过渡到准备好辅助穿衣的未折叠衣物。在这里，我们利用模仿学习来学习完成衣物展开的操作原语，同时遵守机器人硬件的限制。

**Abstract**—机器人辅助穿衣有可能显著帮助患者和医护人员，减少工作负担并提高临床环境中的效率。虽然机器人穿衣辅助技术已经取得了相当大的进展，但之前的工作通常假设衣物已经被展开并准备好使用。然而，在医疗应用中，长袍和围裙通常存储为折叠状态，需要一个额外的展开步骤。在本文中，我们引入了预穿衣步骤，即在辅助穿衣之前展开衣物的过程。我们利用模仿学习来学习三种操作原语，包括高加速度和低加速度的运动。此外，我们使用一个视觉分类器将衣物状态分类为闭合、部分打开和完全打开。我们进行了学习的操作原语及其组合的经验评估。我们的结果显示，高动态运动对于展开新拆封的衣物效果不佳，而运动的组合可以有效地提高展开配置的效率。

## I. 介绍

穿衣辅助是护理人员在护理设施或医院中为个人提供的重要任务。除了患者护理之外，在手术前的准备室和重症监护病房中，穿衣也是关键步骤，在那里护士会互相帮助穿上防护服。机器人辅助穿衣 [1] 已成为解决医护人员短缺的有希望的解决方案，同时还减少了护理人员 and 护士在重复任务上的负担。

机器人辅助穿衣面临几个挑战。首先，穿衣是一项需要操控可变形物体的任务，因此需要处理衣物的无限自

This work was financially supported by the European Union's Horizon Europe programme project SoftEnable (grant agreement No. 101070600).

The authors are with the Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, CSIC-UPC, 08028, Barcelona, Spain. (e-mail: david.blanco.mulero@upc.edu)

由度以及自遮挡现象 [2], [3]。其次，穿衣辅助需要在靠近人体的地方进行操控，与其他可变形物体的操控任务相比，这对所使用运动的加速度力施加了更严格的限制 [4]。尽管最近的研究在辅助穿衣方面取得了很大进展 [5], [6]，但它们通常假设衣物已经展开，可以直接进行穿衣。然而，实际上，像医用长袍和围裙这样的衣物通常以折叠状态存放，需要在使用前进行额外的展开步骤。因此，在这项工作中，我们明确解决我们称为预穿衣步骤的问题：展开初始折叠的衣物并为辅助穿衣做好准备，见图 1。

尽管最近关于可变形物体操控的研究解决了衣物展开的问题 [4], [7]–[9]，但这些研究考虑的是起始于皱褶状态的织物。据我们所知，这项工作第一个解决从初始折叠状态开始展开衣物的问题。在这项工作中，我们调查了不同操控原语在展开医疗长袍方面的有效性。为了操控衣物，我们利用了 Dynamic Movement Primitives (DMPs) [10] 的模仿学习框架。然后，为了评估任务的成功，我们提议使用可视分类器来判断衣物的打开状态。附件材料，以及 DMP 和可视分类器的详细信息，均可在我们的网站<sup>1</sup>上找到。

总之，我们的贡献包括：

- 介绍预穿衣问题，重点关注在穿衣辅助前对服装的展开。
- 提出了一种基于 DMPs 的预穿衣解决方案，并使用视觉分类器识别服装的开合状态。
- 进行不同操作基本动作的实证评估，比较高加速度和低加速度的操作动作，以评估它们在展开衣物中的有效性。

## II. 相关工作

### A. 展开可变形物体

展平可变形物体的问题在文献中已经被研究过，这些物体包括布料 [9]、服装 [4] 和袋子 [11]，仅举几例。先前关于布料和服装展开的研究主要集中在展平任务上 [4], [7]–[9], [12]。在这一任务中，给定一件皱巴巴的服装，机器人操纵器需要找到使物体展平的必要动作，以最大化其覆盖的面积。同样，最近关于袋子展开的研究解决了最大化初始皱褶袋子体积的问题 [11], [13], [14]。这些方法共有的目标是将可变形物体从最初的非结构化状态移动到更有结构的配置。相比之下，这项工作处理相反的问题，即从初始结构化的折叠配置展开服装。

近年来，辅助穿衣受到了广泛关注 [1], [5], [6], [15], [16]。在这里，我们主要关注与人体上半身着装相关的最新进展，这是职业治疗中的一个重要方面。之前的工作已经开发了基于学习的方法，将衣物袖子插入人的手臂中 [5], [6]，假设衣物已经被抓住并准备好穿着。或者其他研究也将抓取衣物纳入他们的辅助穿衣流程中 [1]，

<sup>1</sup><https://sites.google.com/view/pre-dressing>



Fig. 2: 医用罩衣的示例: (a) 折叠状态, 以及 (b) 从平面提起后袖子缠绕在一起的封闭状态。用于识别罩衣状态和训练视觉分类器的类别为: (c) 封闭, (d) 部分打开, (e) 袖子向前打开, 以及 (f) 双袖隐藏的打开状态。

[17]。例如, Zhang 等人 [17] 提出了在穿衣之前为衣物做准备的边缘跟踪方法。然而, 上述工作假设衣物已经展开, 从而简化了穿衣步骤。在这项工作中, 我们解决了在辅助穿衣步骤之前所需的这个关键步骤, 通过评估不同操作原语展开衣物的有效性。

预处理任务的目的是为穿衣辅助准备一件折叠衣物。因此, 给定一件放置在平面上的折叠衣物, 机器人需要执行必要的操作来展开衣物 (见图 1)。具体而言, 本文着重于展开医疗袍的任务。与 T 恤等其他衣物不同, 折叠的袍子可能会出现袖子交错, 这增加了展开过程的复杂性。如图 2b 所示, 当袍子从平面抓起并接触消除时, 重叠的织物层会妨碍衣物的完全打开。基于先前关于机器人辅助穿衣的工作 [5], [17], [18], 我们考虑的是一个双臂机器人设置场景。此外, 我们假设抓取位置的检测问题已解决, 并在衣物衣领处对单层衣物进行顶部抓取。

### B. 评估展开成功的指标

根据 [19] 中的分类法中提出的弯曲水平定义, 预整理任务需要从一个结构化 (折叠) 配置移动到一个非结构化 (打开) 弯曲配置, 增加衣物的非结构化程度。非结构化配置由可访问的关键点数量定义。这里, 一旦衣物被提起并且袖子解开, 则显示袖子不可见表示开启状态有所改善。因此, 我们将袖子的位置用作关键点。

为了识别衣物的状态, 我们不是通过手动工程化袖子的位置来设计奖励, 而是训练一个视觉分类器来识别开口状态。我们定义了三类, 如图 2 所示, 具体如下:

- 封闭: 长袍的袖子要么缠绕不见, 要么完全露在长袍的背部, 见图 2b 和图 2c。此外, 长袍的左右后侧是缠绕的。
- 部分打开: 至少有一个袖子向前。此外, 长袍的背面是整理好的, 并且稍微打开, 如图 2d 所示。
- 打开: 一个或两个袖子部分可见或不可见。在这里, 长袍的后侧没有缠绕并大幅打开, 参见图 2e 和图 2f。

请注意, 部分打开和完全打开类别之间的主要区别在于袖子的位置以及长袍背面开口更宽。

使用视觉分类器识别状态的方法绕过了动作捕捉系统中自遮挡的问题。与诸如袋子 [13] 这样的其他可变形物体不同, 其中的位置标记保持可见, 放置在长袍袖子上的标记在展开过程中可能会被遮挡。另一个选择是使用 Chamfer 距离法, 该方法先前用于识别布料展开任务的

成功性 [7], [8]。然而, 这需要获取一个典型的形状。在这个任务中, 对着装前可能有数千种有效配置, 这将需要大量的典型形状进行对比, 削弱了此类度量的潜在使用。

为了全面研究准备穿衣步骤的复杂性, 我们设计了三种双手操作的基本动作, 这些动作针对长袍的不同展开动态。这些操作基本动作如下:

一种学习这些基本动作的解决方案是利用强化学习并在模拟中训练策略 [4], [9]。然而, 由于服装模拟中的虚实差距 [20], 以及在动态展开可变形物体时模拟空气动力学的挑战 [13], 我们决定应用仿效学习框架 DMPs [10] 来规避这些挑战。

这三种运动由一个人演示, 并使用动作捕捉系统进行捕捉。然后, 对这些演示进行预处理, 以减少捕捉系统的噪声, 并滤除在非必要轴上的运动。此外, 限制末端执行器之间的最大距离, 以防止过度拉伸造成衣物撕裂。考虑到学习的动态运动可能超过机械臂的硬件限制, 我们遵循与 [13] 相同的方法, 使用 DMP 公式来限制机器人的位置、速度和加速度, 以适应机器人系统 [10]。

除了学习的三个操作基元外, 我们还引入了一个受 [13] 启发的准静态基元, 旨在进一步优化服装的开启状态。此动作缓慢地向前移动衣物, 保持末端执行器之间的距离, 最后将长袍定位以便移交给人类进行穿衣步骤。

## III. 实验

我们实验的目标是评估在初步穿衣步骤中成功的需求。为此, 我们的实验调查: 1) 哪些操作原始动作更适合初步穿衣, 2) 动作原始动作结合的表现, 3) 在之前打开和最近拆包的手术衣中的表现。

### A. 实验装置

我们的装置由一个双臂系统组成, 该系统包括两个具有 6 自由度的 UR5e 机器人手臂, 它们被安装在一个类似于人类姿势的平台上。机器人手臂配备了为欧盟项目 SoftEnable [21] 设计的夹持器, 该夹持器可以自动抓取衣物的单层。我们的装置还包括一个 RealSense D435i 相机, 用于捕捉长袍的配置并对其状态进行分类。此外, 在机器人下方放置了一张桌子, 用于抓取平整的长袍。桌子的高度设置确保衣物提起后悬挂在空中。我们的实验评估两种配置的长袍: 1) 已经打开过的医用长袍, 和 2) 最近拆封的医用长袍。对于已经打开过的长袍, 我们使用同一件长袍, 按照相同的顺序折叠, 其袖子缠绕, 最

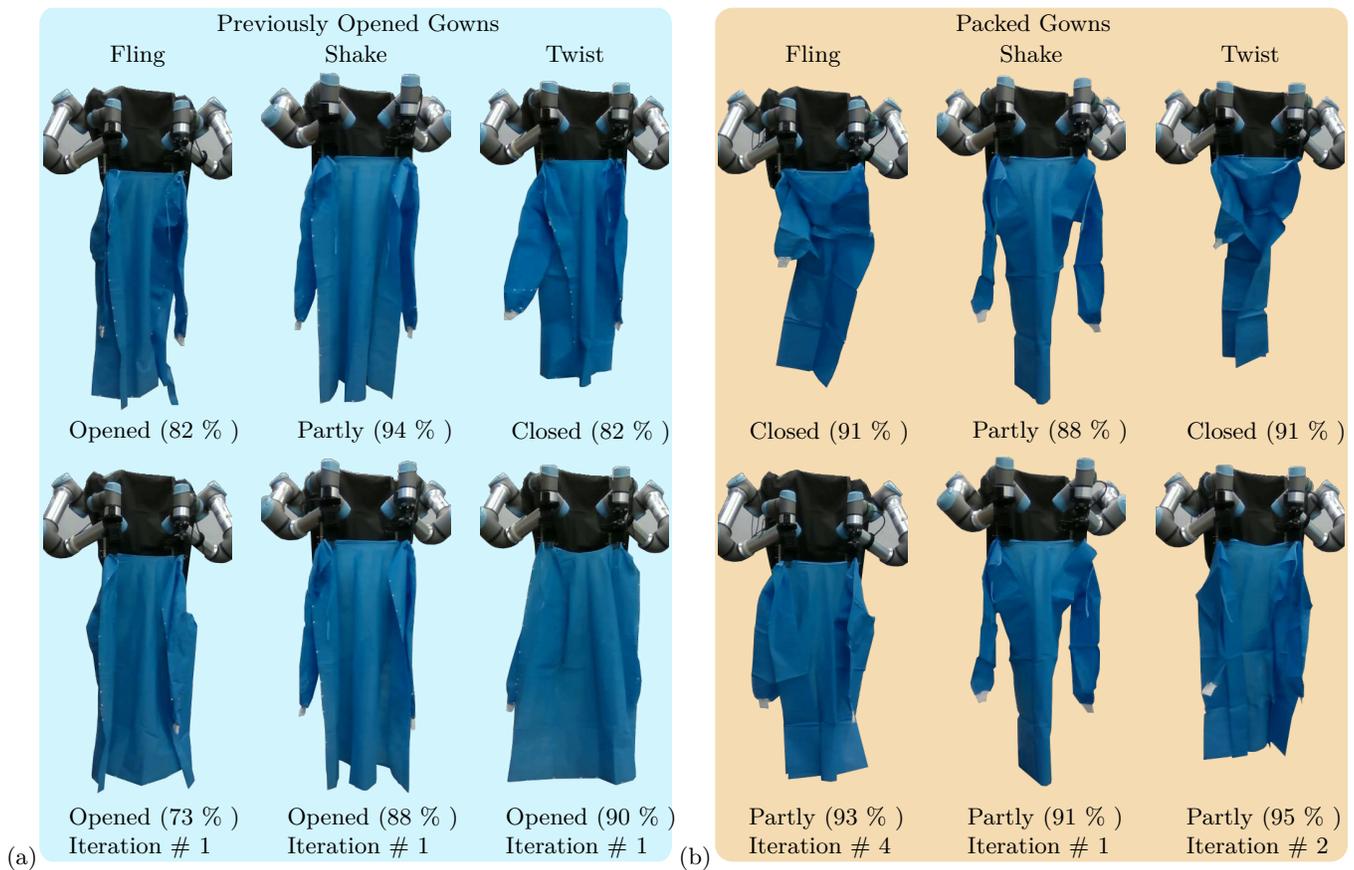


Fig. 3: 针对 (a) 先前已打开的长袍和 (b) 未拆封的长袍的三种操作原语的定性结果。第一行显示了执行前的长袍，第二行显示了到达完全打开或部分打开状态后的长袍。我们指出视觉分类器预测的类别及其置信度，以及到达打开状态所需的迭代次数，或者如果没有进一步改进，则到达部分状态的首次迭代次数。

终经过多次折叠呈正方形折叠配置。拆封后的长袍从一个随机折叠配置开始，因为它们从密封袋中取出。因此，这些衣物中有些可能表现出更复杂的折叠，需要更多的努力来展开。在实验中，长袍从平面抬起后的初始配置是随机的。每个实验最多进行 5 次迭代，以评估长袍打开的改进。对于先前打开过的长袍，我们每种基本操作执行三次试验。对于打包的长袍，由于时间和资源限制，我们对每种基本操作或组合执行一次试验，但对于基本和准静态组合，我们执行了两次试验。

对于受约束的学习 DMPs，我们设置了与 [13] 中相同的约束，即关节位置、速度和加速度限制的 98%。最后，对于视觉分类器，我们使用 YOLOv11 [22]，并用从第 II-B 节中展示三类样本创建的数据集进行训练，数据来自于人类执行的操作。更多详细信息可以在我们的网站<sup>1</sup>上找到。

### B. 操控原语比较

我们首先评估三种学习到的基本动作，而不考虑准静态运动。结果如表 I 和图 3 所示。表 I 中的百分比表示实验中长袍被分类为“打开”或“部分打开”的比例。首先，我们分析之前已打开的长袍的结果。我们可以注意到所有基本动作都取得了较高的成功率，其中扭转动作表现最佳。此外，所有动作都能成功地将袖子移到长袍的前面位置。然而，观察图 3，唯一一个导致袖子在相

机中不可见的动作是扭转动作。这是由于在扭转动作中的机器人手臂的最终位置，其旋转夹持器以利于打开状态。此外，所有动作平均只需要一次迭代即可实现完全打开状态。总体而言，这表明准静态和动态基本动作都是展开先前已打开的衣物的良好候选项。

现在，观察包装好的医用长袍的结果，我们发现性能急剧下降。没有一个基本动作能够达到完全打开的状态。此外，尽管所有基本动作都能部分打开长袍，但迭代次数有所增加。需要注意的是，尽管摇动动作能够在一次迭代中部分打开长袍，但其打开效果显著差于扭动动作所达到的效果，如图 3 所示。相比之下，经过甩或扭动后的长袍宽度显著增加，但需要更多迭代。这些结果表明需要一种能够进一步改善长袍状态的动作。

### C. 结合动态与准静态运动

接下来，我们研究在未包装长袍情境下结合不同动作的效果。在这里，我们评估两种方法：1) 组合两个学习到的操作基元，以及 2) 在执行一个学习到的操作基元之后，执行 Section ?? 中描述的准静态动作。结果如表 II 和图 4 所示。

首先，我们分析了学习到的基本动作组合的结果。我们选择扭转和抛掷的基本动作作为起始操作，其中扭转被选择是因为其在先前结果中的优越表现，而抛掷被选择是为了评估其动态运动表现，随后是较低加速度的基

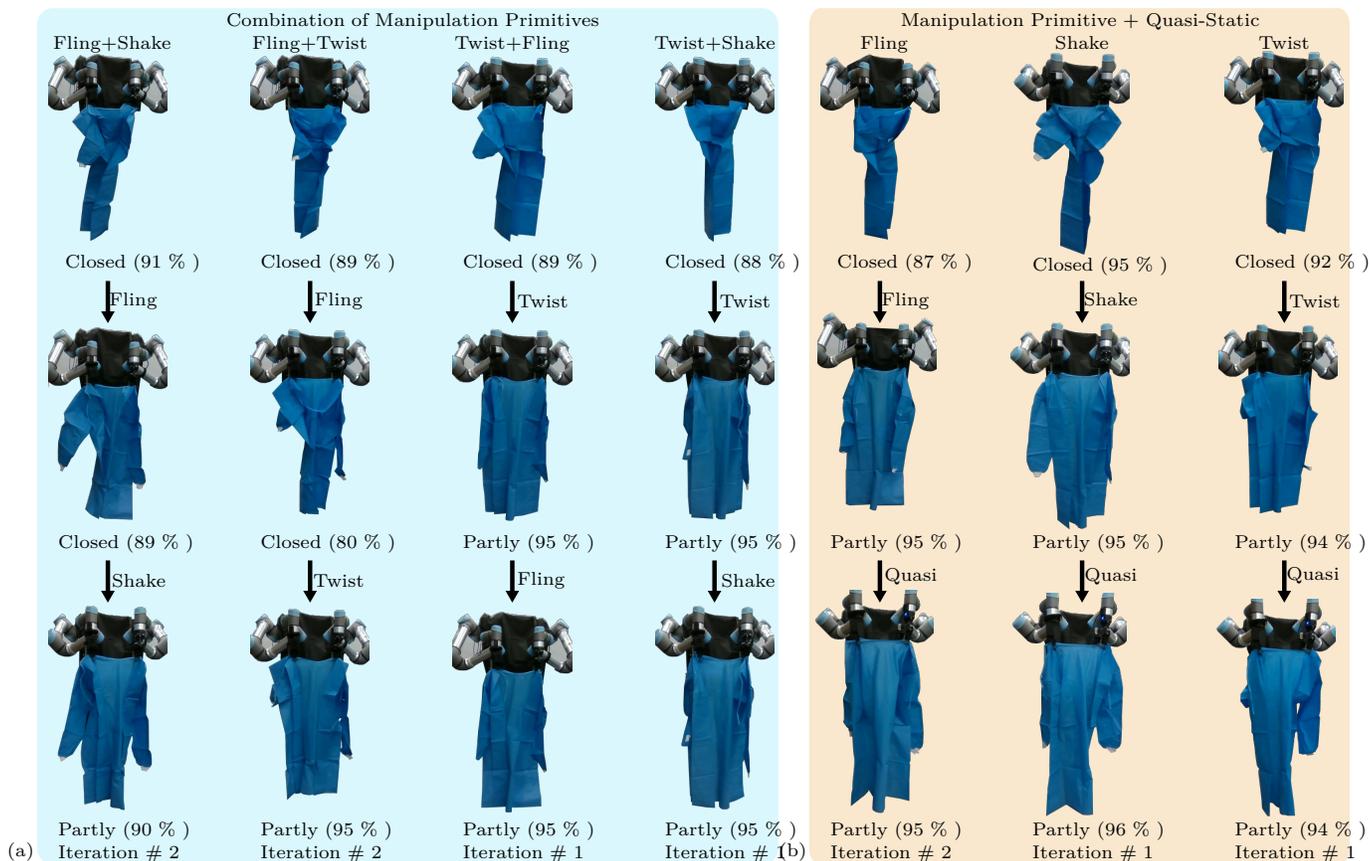


Fig. 4: 对展开未折叠的手术衣的定性结果结合了三种操作基本动作 (a) 彼此之间以及 (b) 与准静态运动相结合。第一行显示了执行之前的手术衣形状，而第二行和第三行则显示了箭头旁边所指示的相应操作后的手术衣状态。我们标示了视觉分类器预测的类别及其置信度，以及在第几次迭代中达到部分打开状态。

本动作。在这个实验中，一次迭代涉及执行两个基本动作。抛掷与摇动或扭转动作的组合平均需要两次迭代。这产生了与单独的抛掷动作相同数量的动作，总共有四种。其次，我们分析了将学习到的基本动作与准静态运动相结合的结果。与表 I 中的结果相比，准静态运动有助于减少部分打开长袍所需的迭代次数。这些结果展示了结

TABLE I: 使用三个学习原语对先前打开并展开的手术衣的定量结果。结果显示手术衣根据训练分类器被分类为打开或部分打开的百分比，以及手术衣的袖子如果位于向前（前置）的位置，这表明手术衣完全打开。结果还显示了达到手术衣打开或部分打开状态所需的平均迭代次数。

		Opened	Partly Opened	Arms Fwd.	# It.
Prev. Opened	Fling	33.33 %	66.67 %	100 %	1
	Shake	66.67 %	33.33 %	100 %	1
	Twist	100 %	0 %	100 %	1
Unpacked	Fling	0 %	100 %	0 %	4
	Shake	0 %	100 %	0 %	1
	Twist	0 %	100 %	0 %	2

合不同的运动基本动作比单一基本动作更有助于展开未包装的长袍。

更普遍地，查看表 II 我们可以注意到，没有一种组合方法能够实现完全展开状态。这是因为未展开衣物层之间的静电力非常大，即使在使用动态操作基本动作后，操作也无法分开这些层。然而，查看图 4，部分展开状态足以使手术服的后面开放到足以让人手臂插进去的程度。此外，袖子被定位在前面，所有操作都达到 100 % 的成功率，从而使后续穿衣步骤的进一步操作成为可能。

#### IV. 讨论

我们的结果突出了展开密封医疗罩衣的挑战，静电力和紧密折叠的层使得完全打开衣物变得困难。虽然动态运动有助于分离一些层，但没有一种运动能够完全展开衣物。尽管理论上更高速度的运动可以克服静电力，但在医疗环境中，这种高速运动是不受欢迎的，因为人机交互的安全性起着关键作用。尽管如此，所学的动作原语能够成功打开之前已经打开的罩衣。这表明，这些动作足以展开其他种类的衣物，如 T 恤或裤子，这些衣物没有长袖，不会在折叠时纠缠在一起。

我们的实验表明，多重运动的组合对于实现部分打开状态至关重要。在某些环境下，例如在帮助护士穿衣时，部分打开的状态足以方便地放置长袍并减少护士在重复

任务中的负担。替代策略如基于空气的操作 [23] 可以通过气流动作分离织物层。然而，这种类型的动作在医疗环境中引入了一个显著的问题，因为气流动作可能干扰无菌条件。因此，尽管诸如扭转与准静态运动的较低加速度运动的组合不足以达到长袍完全打开的配置，但它们是医疗环境中有效且安全的方法。

## V. 结论

在这项工作中，我们引入了预穿衣任务，这是在辅助穿衣前从折叠状态展开医疗服的步骤。我们评估了三种用于预穿衣的操作原语：甩动、摇动和扭动，它们是通过 DMP 框架从人类演示中学习到的。为了评估衣物的打开状态，我们引入了三类：关闭、部分打开和打开，并训练了一个视觉分类器来识别这些状态。

我们的实验评估了学习到的基元在展开医用袍时的有效性，这些基元可以单独使用，也可以彼此组合，或者与准静态动作结合使用。我们的结果显示，单个基元可以在少数迭代中有效展开之前打开过的袍子，而对于未拆开的袍子，则需要更多尝试才能部分打开。在这里，不同基元的组合在达到部分打开状态方面更为高效。虽然我们的结果表明，无论是高加速度还是低加速度的动作均无法打破静电力以展开未拆开的袍子，但它们的结合在达到足以辅助穿衣的部分打开状态方面更为有效。

未来的工作可以探索将这里提出的动态和准静态运动与视觉-触觉方法或重新抓握策略相结合，以提高展开的成功率。在此基础上，我们的目标是将预穿衣步骤整合到一个机器人辅助穿衣流程中，其更广泛的目标是在医院环境中支持护士的工作。

## REFERENCES

- [1] F. Zhang and Y. Demiris, "Learning garment manipulation policies toward robot-assisted dressing," *Science Robotics*, vol. 7, no. 65, 2022.
- [2] J. Zhu, A. Cherubini, C. Dune, D. Navarro-Alarcon, F. Alambeigi, D. Berenson, F. Ficuciello, K. Harada, J. Kober, X. Li, J. Pan, W. Yuan, and M. Gienger, "Challenges and outlook in robotic manipulation of deformable objects," *IEEE Robot. & Automat. Mag.*, vol. 29, no. 3, pp. 67–77, 2022.
- [3] A. Longhini, Y. Wang, I. Garcia-Camacho, D. Blanco-Mulero, M. Moletta, M. Welle, G. Alenyà, H. Yin, Z. Erickson, D. Held, J. Borràs, and D. Kragic, "Unfolding the literature: A review of robotic cloth manipulation," *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2024.

TABLE II: 使用三个学习的基本结构组合和准静态运动对未包装礼服的定量结果。这些结果显示训练分类器对礼服分类为打开或部分打开状态的百分比，以及手臂是否向前定位 (Fwd.)。结果还表示达到打开或部分打开状态所需的平均迭代次数 (It.)。

	Opened	Partly Opened	Arms Fwd.	# It.
Fling + Shake	0 %	100 %	100 %	2
Fling + Twist	0 %	100 %	100 %	2
Twist + Fling	0 %	100 %	100 %	1
Twist + Shake	0 %	100 %	100 %	1
Fling + Quasi	0 %	100 %	100 %	1.5
Shake + Quasi	0 %	100 %	100 %	1
Twist + Quasi	0 %	100 %	100 %	1

- [4] H. Ha and S. Song, "Flingbot: The unreasonable effectiveness of dynamic manipulation for cloth unfolding," in *Proc. of the 5th Conf. Robot Learn.*, vol. 164. PMLR, 08–11 Nov 2022, pp. 24–33.
- [5] Z. Sun, Y. Wang, D. Held, and Z. Erickson, "Force-constrained visual policy: Safe robot-assisted dressing via multi-modal sensing," *IEEE Robot. Automat. Lett.*, vol. 9, no. 5, pp. 4178–4185, 2024.
- [6] S. Kotsovolis and Y. Demiris, "Garment diffusion models for robot-assisted dressing," *IEEE Robot. Automat. Lett.*, vol. 10, no. 2, pp. 1217–1224, 2025.
- [7] X. Lin, Y. Wang, Z. Huang, and D. Held, "Learning visible connectivity dynamics for cloth smoothing," in *Proc. of the 5th Conf. Robot Learn.*, ser. PMLR, vol. 164. PMLR, 08–11 Nov 2022, pp. 256–266.
- [8] Z. Huang, X. Lin, and D. Held, "Mesh-based Dynamics with Occlusion Reasoning for Cloth Manipulation," in *Proc. of Robots: Sci. Syst. (RSS)*, New York City, NY, USA, June 2022.
- [9] D. Blanco-Mulero, G. Alcan, F. J. Abu-Dakka, and V. Kyrki, "QDP: Learning to sequentially optimise quasi-static and dynamic manipulation primitives for robotic cloth manipulation," in *2023 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, 2023.
- [10] A. Sidiropoulos, D. Papageorgiou, and Z. Doulgeri, "A novel framework for generalizing dynamic movement primitives under kinematic constraints," *Autonomous Robots*, vol. 47, no. 1, pp. 37–50, 2023.
- [11] L. Y. Chen, B. Shi, D. Seita, R. Cheng, T. Kollar, D. Held, and K. Goldberg, "Autobag: Learning to open plastic bags and insert objects," in *2023 IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, 2023.
- [12] N. Gu, R. He, and L. Yu, "Learning to unfold garment effectively into oriented direction," *IEEE Robot. Automat. Lett.*, vol. 9, no. 2, pp. 1051–1058, 2024.
- [13] E. Hannus, T. N. Le, D. Blanco-Mulero, and V. Kyrki, "Dynamic manipulation of deformable objects using imitation learning with adaptation to hardware constraints," in *2024 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, 2024.
- [14] L. Y. Chen, B. Shi, R. Lin, D. Seita, A. Ahmad, R. Cheng, T. Kollar, D. Held, and K. Goldberg, "Bagging by learning to singularize layers using interactive perception," in *2023 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, 2023.
- [15] Y. Wang, Z. Sun, Z. Erickson, and D. Held, "One Policy to Dress Them All: Learning to Dress People with Diverse Poses and Garments," in *Proc. of Robots: Sci. Syst.*, 2023.
- [16] J. Zhu, M. Gienger, G. Franzese, and J. Kober, "Do you need a hand? – a bimanual robotic dressing assistance scheme," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 40, pp. 1906–1919, 2024.
- [17] F. Zhang and Y. Demiris, "Visual-tactile learning of garment unfolding for robot-assisted dressing," *IEEE Robot. Automat. Lett.*, vol. 8, no. 9, pp. 5512–5519, 2023.
- [18] H. Zhang, J. Ichnowski, D. Seita, J. Wang, H. Huang, and K. Goldberg, "Robots of the lost arc: Self-supervised learning to dynamically manipulate fixed-endpoint cables," in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2021, pp. 4560–4567.
- [19] D. Blanco-Mulero, Y. Dong, J. Borràs, F. T. Pokorny, and C. Torras, "T-DOM: A taxonomy for robotic manipulation of deformable objects," *arXiv preprint arXiv:2412.20998*, 2024.
- [20] D. Blanco-Mulero, O. Barbany, G. Alcan, A. Colomé, C. Torras, and V. Kyrki, "Benchmarking the sim-to-real gap in cloth manipulation," *IEEE Robot. Automat. Lett.*, pp. 1–8, 2024.
- [21] S. Foix, J. Oriol, J. Borràs, and P. Grosch, "Gripper and procedure for the separation of layers," 2024, filled EU patent ref EP24382974.4.
- [22] G. Jocher, J. Qiu, and A. Chaurasia, "Ultralytics YOLOv11," Jan. 2023.
- [23] Z. Xu, C. Chi, B. Burchfiel, E. Cousineau, S. Feng, and S. Song, "Dextairity: Deformable manipulation can be a breeze," in *Proc. of Robots: Sci. Syst. (RSS)*, 2022.