赋予机器人皮肤生命

Ahmad Rafsanjani[1a]，Fergal B. Coulter[2b]，André R. Studart[2c]

[1] 南丹麦大学生物机器人实验室，南丹麦大学软体机器人中心，丹麦欧登塞[2] 苏黎世联邦理工学院材料系复杂材料组，瑞士苏黎世

通讯作者：[a] ahra@mmmi.sdu.dk[b]
fergal.coulter@mat.ethz.ch[c]
andre.studart@mat.ethz.ch

摘要

人形机器人的皮肤往往缺乏人类触觉，也不具备生物组织固有的自我修复能力。近期，研究人员通过先后培养人类真皮细胞和表皮细胞，在机器人手指上培育出一层活体自修复皮肤。本文重点介绍这项研究的意义，以及开发配备感知能力的自适应活体机器人皮肤的生物混合机器人的挑战。

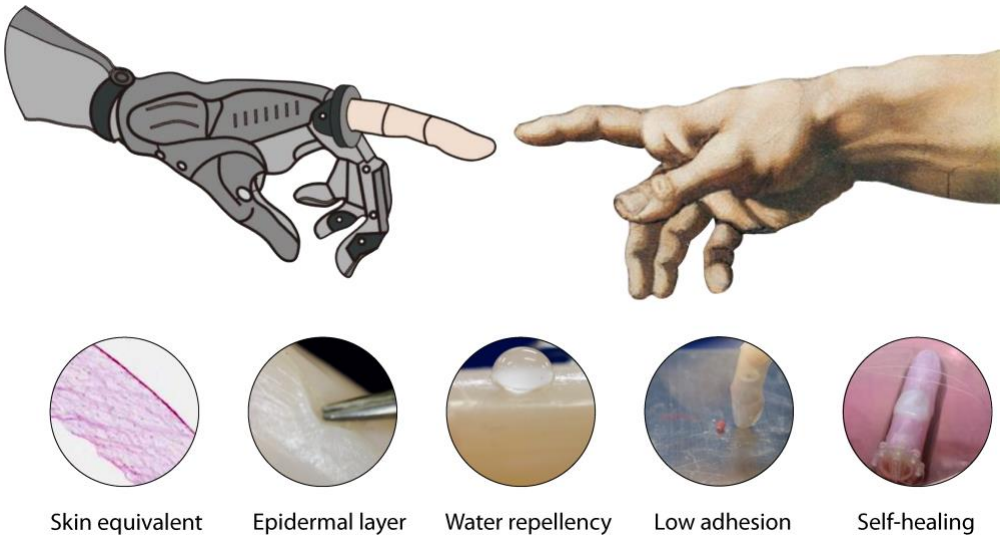


图 1. 生长于机器人手指上的活体皮肤等效物，具有真皮层和表皮层，并具备拒水性、低黏附性和自修复特性。

人形机器人与人类及环境之间的互动几乎完全聚焦于面部和声音，忽视了皮肤的重要性——皮肤是我们身体最大的器官。相较之下，触觉能在人与人之间传达不同的情绪，例如愤怒、恐惧、厌恶、爱、感激和同情[1]。我们的皮肤是一种活跃的感觉器官，是表达社会情感的媒介、可渗透的调节过滤层，也是一层能够自我修复的保护层[2]。相比之下，现有人形机器人的皮肤只是一层被动覆盖物，其唯一功能是保护机器人的内部结构不受外界影响。机器人技术在实现极其复杂的人类步态方面取得了长足进步，最新的 Atlas机器人（波士顿动力）便是一个例子：它能像真正的高手一样，通过跳跃和腾越完成跑酷动作。然而，现有人形机器人僵硬且没有感觉的皮肤，在与人类互动或适应动态环境方面存在明显局限。近年来，机器人皮肤这一尚未得到充分探索的领域吸引了来自多个学科的研究人员，他们致力于提升机器人的互动能力。

机器人皮肤的研究——覆盖范围从指尖到整个机器人身体——主要聚焦于将电子皮肤（即 E-skins）集成到机器人的外表面，使其拥有触觉 [3]。例如，研究人员在机器人指尖上开发了一种多层电子真皮，由导电织物和压阻织物组成，并包覆在硅橡胶中。这种人工皮肤可以将抓取物体时获得的触觉信息转化为神经形态信号，并将其传递给截肢者的周围神经，从而引发触觉和疼痛感知 [4]。与依靠电子进行触觉信息传感和传输的电子皮肤不同，人类皮肤传感器依赖离子电流。离子皮肤使机器人皮肤等效体更接近其生物对应物；最简单的构造方式是在两层可拉伸的离子导电层之间夹入一层可拉伸介电层，而离子导电层通常由含盐水凝胶制成 [5]。将带电的聚丙烯酸与中性的聚丙烯酰胺水凝胶组合后，制成了一种压电离子传感皮肤，其内置电势差通过压力驱动的离子通量发挥作用，可应用于神经假体机器人 [6]。尽管这些技术在多种应用中至关重要，但要将它们及其他触觉传感技术扩展至覆盖整个身体，仍更具挑战性，因为这需要对多个分布于不同空间位置的离散传感器进行组织和校准，并处理海量数据。机器人学家展示了用一千多个可自校准的多模态传感单元覆盖一款人形机器人大部分表面的可行性，使其能够感知温度、压力、加速度和邻近程度 [7]。

除了触觉之外，自修复和损伤韧性也是为机器人应用开发软材料和人工皮肤时备受关注的特性 [8]。其理念是赋予电子皮肤恢复传感功能的能力，方法是使用能够在受损后重新连接断裂的互连线或填补裂纹的材料。例如，电子皮肤通过采用液态金属作为流体导电元件，以及采用动态超分子聚合物和水凝胶作为结构材料，实现了自修复能力。尽管取得了这些显著成果，自修复人工材料仍存在过度蠕变、修复依赖外部刺激以及随着修复次数增加而趋于劣化等问题。

虽然以往对机器人皮肤的研究主要集中于复现感知功能，但要让机器人得到更广泛的应用并为人类所接受，使其拥有逼真的外观、类人的触感以及自修复能力至关重要，尤其是在医疗护理、护理中心和服务业领域。近期，Takeuchi及其同事研发出一种生长在机器人手指上的活体人造皮肤 [9]。这种皮肤具有自愈能力，能够承受手指关节运动引起的形变。这项研究的创新之处在于，研究人员通过体外细胞培养，制成了均匀覆盖三维三关节手指的皮肤，展示了如何在人形机器人手的基本构件上实现类人皮肤。研究人员利用人类皮肤结缔组织中的活成纤维细胞构建真皮层，并在其上覆盖含有活角质形成细胞的表皮层；这些角质形成细胞负责发挥人类皮肤的屏障功能。研究重点在于将新生的双层皮肤固定到基底上，并设置锚定点，以防止涂层滑移或发生错误位移。制造皮肤时，首先将裸露的机器人手指插入圆柱形橡胶模具中，两者之间留有一道狭窄的间隙。随后，将含有活成纤维细胞的胶原蛋白溶液倒入模具并进行培养。三天后，手指不规则的三维

表面上形成了成熟的真皮，并在根部设置锚定固定结构，以尽量减少组织收缩。最后，从模具的不同侧面接种并培养活角质形成细胞，在真皮组织上生长出表皮层，再经过两周，完成皮肤等效体的构建。对染色皮肤等效体冷冻切片进行组织学分析，证实表皮与真皮组织无缝黏附，并形成了均匀的层状结构。

由真皮层和表皮层组成的皮肤等效体，与仅含真皮层的控制样本相比，电容显著更低，电阻则更高。这证实了表皮作为机器人皮肤电屏障的有效性。保水测试表明，与纯真皮等效体相比，表皮组织的存在使皮肤等效体几乎不透水。此外，表皮层具有足够的拒水性和非黏附性，能够在其表面形成水滴，并高效处理带静电的物体（例如聚苯乙烯泡沫珠）。除表皮外，研究还评估了真皮层作为所制备皮肤承重部件的性能。对真皮等效体的力学表征显示，其具有类似于人类皮肤的应变硬化阶段。然而，测得的人工活体皮肤拉伸强度比生物对应组织所报告的数值低数个数量级。尽管这种较低的机械强度仍是一项尚待解决的挑战，但该皮肤表现出细胞介导的自我修复能力，且足够坚韧，能够承受手指运动过程中产生的应力。通过将无细胞胶原片敷于机器人手指背侧真皮上的人为伤口，展示了活体机器人皮肤的自愈能力。移植的胶原片成功封闭伤口，并在一周后与真皮等效体无缝贴合。

过去，我们见过许多人形机器人采用皮肤等效体的案例，这些等效体由硅橡胶或发泡乳胶等人工聚合物制成。虽然可以通过精细的上色、雕塑以及化妆修饰，让人形机器人看起来更像人，但它们往往仍不够逼真，难以令人信服；更糟的是，它们会落入所谓的恐怖谷——人们会因可见的动作与预期动作之间存在细微差异而感到不安。通过调整聚合物本身的延展性和柔顺性，可以提升其外观与人类的相似度。戏剧假体中使用的技术，例如加入扩链剂或消光剂，可以改变弹性体皮肤的运动特性，使其在运动时产生更自然的褶皱或折叠。尽管如此，这些技术仍无法替代真正的人类皮肤，而 Takeuchi 及其同事开发的这些新型共形细胞培养技术，将有助于提升未来人们与人形机器人互动时的体验。

要在机器人身上制造并维持真正的活体皮肤，仍有一些问题需要考虑：必须具备血管和毛细血管，以输送含有氧气和营养物质的人工血液，维持细胞生存。此外，还应建立干细胞分布网络，以替换并清除凋亡皮肤细胞；考虑到未分化细胞十分脆弱，这项任务尤其具有挑战性。还需要在相当于真皮的部分中整合传感器网络（可能以离子电流为基础），为活体机器人皮肤增添感知功能。最后，若要从机器人手指扩展到人形机器人大小，现有的传统浇铸方法无法胜任，因此需要采用数字制造技术，例如对复杂软材料进行多轴、多材料和多功能生物打印 [10]。尽管存在这些不足，Takeuchi及其同事展示了赋予机器人皮肤生命，能够实现富有表现力、具有防护性且可自修复的生物混合机器人。

致谢 A.R 获得了支持

Villum青年研究者资助37499以及丹麦独立研究理事会通过DFF Sapere Aude资助1051-00075B提供支持。A.R.S.和F.B.C.感谢瑞士国家科学基金会（资助编号200020_204614）以及瑞士ETH领域先进制造战略重点领域（SFA-AM）通过Manufhaptics项目提供的资金支持。

参考文献：[1] Hertenste

in, M.J., Keltner, D., App, B., Bulleit, B.A. and Jaskolka, A.R., 2006. 触摸传达不同的情绪。《情绪》, 6(3), p.528.[2] Hu, Y. and Hoffman, G., 2022. 机器人的皮肤可以是什么样？为人机社会互动设计纹理可变皮肤。ACM《人机交互汇刊》.[3] Shih, B., Shah, D., Li, J., Thuruthel, T.G., Park, Y.L., Iida, F., Bao, Z., Kramer-Bottiglio, R. and Tolley, M.T., 2020. 用于智能软体机器人的电子皮肤和机器学习。《科学·机器人》, 5(41), p.eaaz9239.[4] Osborn, L.E., Dragomir, A., Betthauser, J.L., Hunt, C.L., Nguyen, H.H., Kaliki, R.R. and Thakor, N.V., 2018. 配备神经形态多层电子真皮的假肢可感知触觉和疼痛。《科学·机器人》, 3(19), p.eaat3818.[5] Sun, J.Y., Keplinger, C., Whitesides, G.M. and Suo, Z., 2014. 离子皮肤。《先进材料》, 26(45), pp.7608-7614.[6] Dobashi, Y., Yao, D., Petel, Y., Nguyen, T.N., Sarwar, M.S., Thabet, Y., Ng, C.L., Scabeni Glitz, E., Nguyen, G.T.M., Plesse, C. and Vidal, F., 2022. 压电离子机械感受器：水凝胶中的力诱导电流生成。《科学》, 376(6592), pp.502-507.[7] Cheng, G., Dean-Leon, E., Bergner, F., Olvera, J.R.G., Leboutet, Q. and Mittendorfer, P., 2019. 机器人皮肤的全面实现：传感器、传感、控制与应用。《IEEE会刊》, 107(10), pp.2034-2051.[8] Bilodeau, R.A. and Kramer, R.K., 2017. 软体机器人的自修复与损伤韧性：综述。《机器人与人工智能前沿》, 4, p.48.[9] Kawai, M., Nie, M., Oda, H., Morimoto, Y., Takeuchi, S., 2022. 机器人上的活体皮肤。《物质》, 5(7), pp.2190-2208.[10] Schaffner, M., Rühs, P.A., Coulter, F., Kilcher, S. and Studart, A.R., 2017. 将细菌3D打印成具有功能的复杂材料。《科学进展》, 3(12), p.eaao6804.