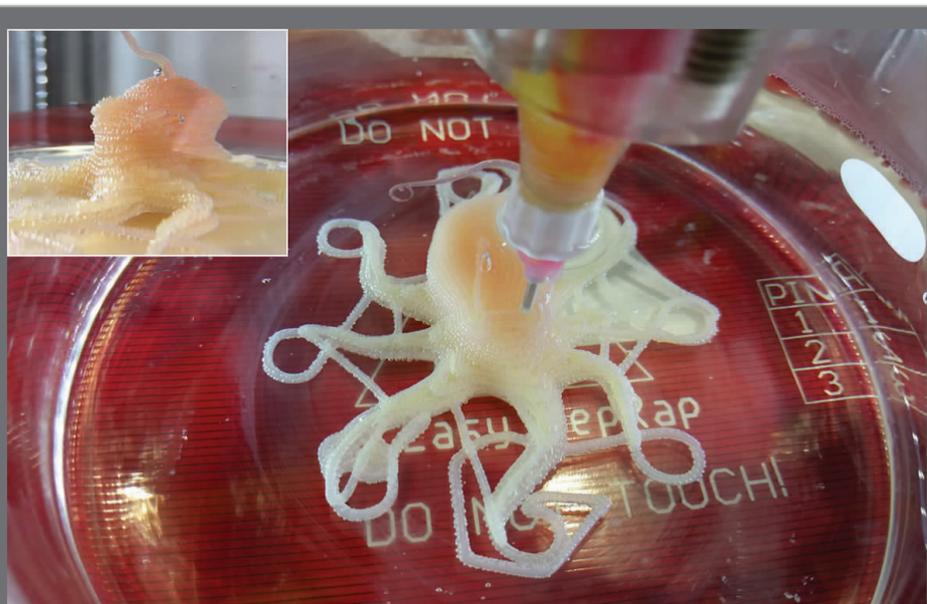


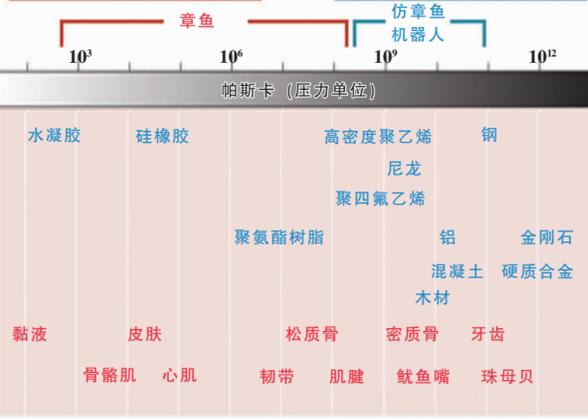
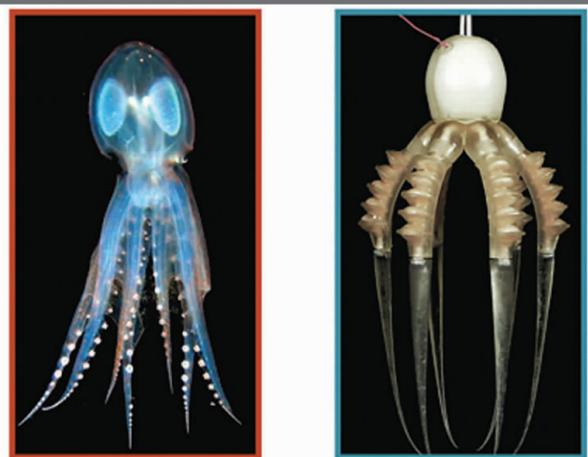
# 走出“僵硬”外壳的软体机器人

俞芊静 编译

人工智能正在往越来越高级的方向发展。与智能化程度更高的手机，以及网络搜索速度提升很快的电子产品不同的是，高度智能化的机器人应该像人类一样，不仅会思考，还要能够通过智力、身体和外部世界三者之间的交互作用，变得越来越聪明。让机器人从“僵硬”的躯壳中走出来，融入一个更为庞大和错综复杂的世界，是软体机器人专家雄心勃勃的终极梦想。



通过3D叠层打印制造出来的形似章鱼的软体机器人原型。用流体对两个互相接触的微通道充气阀门进行加压和控制，一个通道充气膨胀导致第二个通道压缩关闭，其间的延时导致章鱼机器人手臂做出抬起放下的动作。



章鱼(左上)的肌肉排列和周围神经系统的分布为研究人员控制仿生软体机器人(右上)提供了灵感。软体机器人研究旨在缩小机器人和动物内在构成材料之间的差别。图表显示了这些人工材料的近似拉伸和弹性模量。



软体机器人模仿人类手动操作

催化分解过程则缓慢而持续。这两种燃料系统都需要额外的机械结构(阀门、调节器、油箱等)，在为软体机器人设计新的可嵌入软体的专用泵方面，有着巨大的应用潜力。

质子交换膜是一种可从电能中产生气动动力的新系统。这种由含离子聚合物构成的半透膜称为“离子泵”，即离子交换聚合物，可逆水解过程产生氢和氧，或通过氢和氧产生水，从而有选择性地增加或减少气动压力。该系统提供了诱人的前景，最终有可能产生一种不需要移动部件的压力传感器。

以阀门来模仿电子晶体管的信息控制行为，其方法是使用电流变液。这些“聪明”的液体在强电场作用下，可从液体变为固体，由此可在微通道内实现没有移动部件的阀门开关控制。

**液态金属合金** 如果要让整个逻辑电路保持柔软且有弹性，提供较大电场的电极也必须是柔性的。为解决这一问题，研究人员使用了另一种智能材料：液态金属合金。在原有镓合金的基础上，偶尔添加一点锡，再添加微量的铜，这类合金在零下10℃时仍可保持液相，与其他可延伸复合材料相比导电性能很不错(但其导电率只有铜的约二十分之一)，这种由电

**打印“软肌肉”植入“假关节”**

除了需要动力之外，软体机器人还需要对软流体的控制。

阀门控制流体流动最显而易见的方式，是通过机械阀以物理形式关闭某个开放通道。最普遍应用的软流体控制机械是阀门，第一个通道充气膨胀引起第二个通道压缩关闭，通过互相接触两个通道的交互作用而延时作用，产生像软体动物章鱼那样的变形，引导机器人手臂有节奏地提升或下降。

流变液、液态金属和橡胶微通道组合而成的电子控制阀，将成为软逻辑电路的心脏。令人兴奋的是，如果给机器人注入这种由智能流体组合的“软肌肉”，获得的就不仅仅是一种作为控制开关的阀门，而是一种将机器人的刚性“肌肉”改变为像真正肌肉一样伸缩自如的系统。

**人工肌肉** 为寻找产生流体压力传感器的替代方法，研究人员正在研究如何将化学能或电能直接转化为机械运动。人工肌肉本身就是一个独立于软体机器人的专门的研究领域，所采用的材料分好几种类型，开发最成功的是电活性聚合物——因其柔软性和大规模变形的潜力而具有广阔的前景，但这类材料制造困难、材质脆弱，且需要规模浩大的基础设施。

另外几种奇特新材料中最为诱人的，是那些可将生物肌肉直接植入到软支架上的材料。还有一种技术，是通过最基本的构造块来重建肌肉，如以蛋白质为核心合成一束束肌球蛋白。肌球蛋白是一种可沿肌动蛋白微

纤维移动的聚合物分子，早期研究结果表明，它可以模拟合成一些关键的聚合物分子，但需要极端的温度、压力和酸度条件。

**多材料3D打印技术** 为满足软体器件制造的挑战，需要改进软体材料直接3D打印的能力。打印硅橡胶束成人造蛛网、软传感器以及有限变形能力致动器的研究，目前已取得了初步成功。

多材料3D打印技术作为一种制造模式，是最接近生物制备叠层生长的人工技术。到目前为止，对多介质3D打印技术的研究主要集中在新的制造工艺，如同轴挤压(使用同心嵌套的多个打印头喷嘴)和多打印头。通过使用添加剂或颗粒灌注复合材料生产的组成成分不同的油墨，可让打印出来的材料拥有新的能力，或获得更大的强度。通过对油墨额外物理性能分布的控制，使打印对象获得有选择性的局部属性成为可能。

生物学例子表明，不改变材料的成分但改变其物理形态，可改变其硬度、韧性和延展性等特性。不同的材料之间表现为不同的模式。人体内连接骨骼与肌腱的组织代表着跨越两个数量级的较大的硬度梯度，这种梯度是通过胶原纤维的结构排列和矿化密度来实现的。同样，在章鱼和鱿鱼中，刚性嘴和柔软的身体之间跨越的三个数量级的硬度梯度，是通过壳质纤维的结构排列和蛋白结合密度来实现的。大多数研究人员对这种模式化材料的模拟主要集中在微小变形元素上，或取得与生物实例连续梯度相接近的结果。哺乳动物的皮肤既有弹性且耐撕裂，主要得益于胶原蛋白纤维的卷曲和编排模式。所有这些不同例子中，纤维材料的结构起着阻止裂纹扩散的作用，大大增加了断裂发生所需的总能量，从而提高了韧性。

利用多材料3D打印等新技术，通过控制材料结构和材料性能，在提高韧性的同时降低脆性。例如，多孔固体仿生材料通过显微结构模式的变化，可基本控制弹性。然而，要实现精确的三维打印模式，还需要在微观尺度上控制制造工艺的误差。

**模拟章鱼的动态移动** 章鱼形态学和行为学研究为软体机器人的驱动和控制提供了灵感。在一些仿章鱼机器人中，软质材料与流体动力学的相互作用产生了令人信服的模仿行为，如动力臂的“抖动”动作。同样，在软体机器人手臂中引入硬质钢丝，可让“假关节”以章鱼的步态行走。

从生物学的角度来看，理解章鱼运动是一个挑战，阻力系数或浮力系数的微小参数变化，可极大地改变模型中章鱼臂动力学的模拟行为，因此需要精确的实验来实现真实手臂的特性。对章鱼臂延伸行为动作的观察表明，章鱼似乎也是通过这一对参数来控制其柔软触手的。有趣的是，研究表明，章鱼是通过分布在触手上的末梢神经网络控制触手伸缩运动的。可将章鱼触手的运动位置分解为“运动基元”，例如，通过观察一个复杂的扭转运动，可让机器人实现拧开瓶盖的动作。最新的生物实验结果表明，章鱼在任何特定时刻都会选择最方便的方向，来实现向任意方向的运动。或通过直接模仿章鱼的动态移动，或通过机械学预编程应用程序，章鱼的运动基元已被运用于软体机器人运动学，但研究人员的最终梦想，是通过简单的控制手段，来构建类似于章鱼的动态移动。

**核心问题是，软体机器人必须证明自己的价值，必须充分展示其明显的竞争优势。只有这样，才能让科幻成为现实。**

**“软”“硬”竞争的未来**

软体机器人的研究与开发目前在很大程度上依赖于手工制作，技能和经验水平的不同会导致很大差异，进而影响软体机器人的机械特性。另外还需要对机器人和机器人子系统性能作直接比较的标准，目前已确定了一组致动器性能通用指标，生物学家提出，软质致动器的性能参数要与生物肌肉的性能参数相媲美。一个直观的度量标准是机器人系统的弹性模量，即软体机器人所要达到的柔韧度的值。

但是，软体机器人开发的核心问题，是软体机器人必须证明自己的价值。尽管在工业环境中使用软体机器人的理由有很多，但最近在机器人比赛中获胜的仍然是传统的动作僵硬的刚性机器人手臂。一家工业软体机器人初创公司在早期曾取得很大成功，并受到了媒体的广泛报道，但最近宣布即将破产。尽管如此，研究人员仍然坚信软体机器人技术有着广阔的发展空间，但创业的经验表明，只有充分展示软体机器人的竞争优势，才能成功地将研究成果转化为人们接受的社会实践。

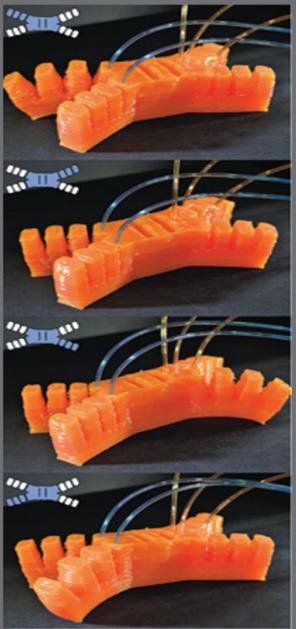
在不久的将来，恰佩克科幻小说中的场景将成为现实，面团样的湿软物质最终将变成柔软灵活的机器人，给人类带来一个全新的自动化世界。



可穿戴机器人



可在高温中工作



3D打印软体机器人可通过选择性的气动压力来延伸肢体(图中蓝色所示)



接受运动指令



## 浪漫想象中的艺术与科学

武夷山

《美国科学家》杂志近期刊登了纸质雕塑家洛根·布朗的文章，介绍了他力图将科学与艺术融为一体的纸质雕塑作品。

中国剪纸是平面艺术，纸质雕塑则是立体艺术。

布朗认为，从卫星图像到电子显微镜图片，从量子物理学到黑洞，科学已经从根本上改变了我们感知世界的方式。因此，我们现在很难欣赏18世纪末19世纪初那一大批浪漫派诗人和艺术家的眼光了。可是，我们应看到，浪漫派不仅告诉我们要看到大自然之美、庄严与神秘，还教导我们要珍视和保护大自然，后一认识对于地球人来说，具有前所未有的重要性。于是，他希望自己的作品能将浪漫与科学、事实与诗意融为一体。

以其作品《核》为例(见上图)，该作品的创作灵感有多重来源。当创作草图的时候，他正住在法国南部的一个森林里，住所附近都是栗树。他被栗子迷住了：绿色的栗子壳上有锐刺，让人不敢碰，但壳里面藏着红褐色的光滑果实，两者在质地与形态上形成了强烈的对比。他又注意到，其他一些生命体也有类似的质地与形态之强烈对比，比如捕蝇草、某些花粉、感冒病毒等。在那段时间，他也正在研读16世纪的比利时医生、“解剖学之父”安德雷亚斯·维萨里的著作《人体构造》，他书中插图之美深深打动了。插图中，肌肉的内部与外部仿佛有动态的交互作用，光滑的皮肤被剖开，以揭示人体内部的错综复杂和形态多样性。

不同灵感源(栗子、病毒、心脏与肺的内部结构等等)的交融，产生了《核》这部作品。它完全是手工雕刻出来的，费时近四个月。作品的每一层都是先画出线条，再用手术刀千辛万苦地刻出来，或者说是从一层又一层的纸中“解剖”出来的。

在这类作品中，时间是很重要的要素。可以说，雕刻下去的每一刀的第四维便是时间。与其他艺术形态相比，纸质艺术更能吸引观众注意到作品中凝聚的时间与功夫。布朗认为，一件艺术品的创造，归根结蒂不仅是工艺行为，也是沉思默想的行为。

在我们这个人都忙忙碌碌的时代，在这个图像为王、无数影像不断轰炸视网膜的时代，鼓励人们片刻的沉思都是极其困难的。那么，艺术家就必须付出更艰难的努力去诱使受众停顿片刻，放慢节奏，睁大眼睛。他之所以选择做三维雕塑而不是平面艺术，原因之一就在这里。欣赏雕塑是必须看实物的，只看屏幕上的雕塑是无法充分领略其美的。而且，雕塑自身就是一个物体，而不像有些艺术形式是物体之表象。因此，雕塑是宣称自己的自主性的，它能产生出更强烈的视觉体验。

布朗之所以能创作出科学与艺术融为一体的作品，是因为他很注意与科学家的合作。前些年，为了做“正常菌群”主题的一个永久性展览，他与一些微生物学家开展了合作，是他与科学家的初次合作。那次，他创作了一个表现单个细菌的大型纸雕作品。他不追求作品与真实的细菌逼真相像，而主要诉诸自己对细菌的想象力。作品有1.12米长，大约有真实细菌的50万倍那么大，费时五个月才完成。这几个数据都起着隐喻作用：细菌世界之宏大也是难以想象的。

(作者系中国科学技术发展战略研究院研究员)

纤维移动的聚合物分子，早期研究结果表明，它可以模拟合成一些关键的聚合物分子，但需要极端的温度、压力和酸度条件。

**多材料3D打印技术** 为满足软体器件制造的挑战，需要改进软体材料直接3D打印的能力。打印硅橡胶束成人造蛛网、软传感器以及有限变形能力致动器的研究，目前已取得了初步成功。

多材料3D打印技术作为一种制造模式，是最接近生物制备叠层生长的人工技术。到目前为止，对多介质3D打印技术的研究主要集中在新的制造工艺，如同轴挤压(使用同心嵌套的多个打印头喷嘴)和多打印头。通过使用添加剂或颗粒灌注复合材料生产的组成成分不同的油墨，可让打印出来的材料拥有新的能力，或获得更大的强度。通过对油墨额外物理性能分布的控制，使打印对象获得有选择性的局部属性成为可能。

生物学例子表明，不改变材料的成分但改变其物理形态，可改变其硬度、韧性和延展性等特性。不同的材料之间表现为不同的模式。人体内连接骨骼与肌腱的组织代表着跨越两个数量级的较大的硬度梯度，这种梯度是通过胶原纤维的结构排列和矿化密度来实现的。同样，在章鱼和鱿鱼中，刚性嘴和柔软的身体之间跨越的三个数量级的硬度梯度，是通过壳质纤维的结构排列和蛋白结合密度来实现的。大多数研究人员对这种模式化材料的模拟主要集中在微小变形元素上，或取得与生物实例连续梯度相接近的结果。哺乳动物的皮肤既有弹性且耐撕裂，主要得益于胶原蛋白纤维的卷曲和编排模式。所有这些不同例子中，纤维材料的结构起着阻止裂纹扩散的作用，大大增加了断裂发生所需的总能量，从而提高了韧性。

利用多材料3D打印等新技术，通过控制材料结构和材料性能，在提高韧性的同时降低脆性。例如，多孔固体仿生材料通过显微结构模式的变化，可基本控制弹性。然而，要实现精确的三维打印模式，还需要在微观尺度上控制制造工艺的误差。

**模拟章鱼的动态移动** 章鱼形态学和行为学研究为软体机器人的驱动和控制提供了灵感。在一些仿章鱼机器人中，软质材料与流体动力学的相互作用产生了令人信服的模仿行为，如动力臂的“抖动”动作。同样，在软体机器人手臂中引入硬质钢丝，可让“假关节”以章鱼的步态行走。

从生物学的角度来看，理解章鱼运动是一个挑战，阻力系数或浮力系数的微小参数变化，可极大地改变模型中章鱼臂动力学的模拟行为，因此需要精确的实验来实现真实手臂的特性。对章鱼臂延伸行为动作的观察表明，章鱼似乎也是通过这一对参数来控制其柔软触手的。有趣的是，研究表明，章鱼是通过分布在触手上的末梢神经网络控制触手伸缩运动的。可将章鱼触手的运动位置分解为“运动基元”，例如，通过观察一个复杂的扭转运动，可让机器人实现拧开瓶盖的动作。最新的生物实验结果表明，章鱼在任何特定时刻都会选择最方便的方向，来实现向任意方向的运动。或通过直接模仿章鱼的动态移动，或通过机械学预编程应用程序，章鱼的运动基元已被运用于软体机器人运动学，但研究人员的最终梦想，是通过简单的控制手段，来构建类似于章鱼的动态移动。

核心问题是，软体机器人必须证明自己的价值，必须充分展示其明显的竞争优势。只有这样，才能让科幻成为现实。

**“软”“硬”竞争的未来**

软体机器人的研究与开发目前在很大程度上依赖于手工制作，技能和经验水平的不同会导致很大差异，进而影响软体机器人的机械特性。另外还需要对机器人和机器人子系统性能作直接比较的标准，目前已确定了一组致动器性能通用指标，生物学家提出，软质致动器的性能参数要与生物肌肉的性能参数相媲美。一个直观的度量标准是机器人系统的弹性模量，即软体机器人所要达到的柔韧度的值。

但是，软体机器人开发的核心问题，是软体机器人必须证明自己的价值。尽管在工业环境中使用软体机器人的理由有很多，但最近在机器人比赛中获胜的仍然是传统的动作僵硬的刚性机器人手臂。一家工业软体机器人初创公司在早期曾取得很大成功，并受到了媒体的广泛报道，但最近宣布即将破产。尽管如此，研究人员仍然坚信软体机器人技术有着广阔的发展空间，但创业的经验表明，只有充分展示软体机器人的竞争优势，才能成功地将研究成果转化为人们接受的社会实践。

在不久的将来，恰佩克科幻小说中的场景将成为现实，面团样的湿软物质最终将变成柔软灵活的机器人，给人类带来一个全新的自动化世界。

纤维移动的聚合物分子，早期研究结果表明，它可以模拟合成一些关键的聚合物分子，但需要极端的温度、压力和酸度条件。

**多材料3D打印技术** 为满足软体器件制造的挑战，需要改进软体材料直接3D打印的能力。打印硅橡胶束成人造蛛网、软传感器以及有限变形能力致动器的研究，目前已取得了初步成功。

多材料3D打印技术作为一种制造模式，是最接近生物制备叠层生长的人工技术。到目前为止，对多介质3D打印技术的研究主要集中在新的制造工艺，如同轴挤压(使用同心嵌套的多个打印头喷嘴)和多打印头。通过使用添加剂或颗粒灌注复合材料生产的组成成分不同的油墨，可让打印出来的材料拥有新的能力，或获得更大的强度。通过对油墨额外物理性能分布的控制，使打印对象获得有选择性的局部属性成为可能。

生物学例子表明，不改变材料的成分但改变其物理形态，可改变其硬度、韧性和延展性等特性。不同的材料之间表现为不同的模式。人体内连接骨骼与肌腱的组织代表着跨越两个数量级的较大的硬度梯度，这种梯度是通过胶原纤维的结构排列和矿化密度来实现的。同样，在章鱼和鱿鱼中，刚性嘴和柔软的身体之间跨越的三个数量级的硬度梯度，是通过壳质纤维的结构排列和蛋白结合密度来实现的。大多数研究人员对这种模式化材料的模拟主要集中在微小变形元素上，或取得与生物实例连续梯度相接近的结果。哺乳动物的皮肤既有弹性且耐撕裂，主要得益于胶原蛋白纤维的卷曲和编排模式。所有这些不同例子中，纤维材料的结构起着阻止裂纹扩散的作用，大大增加了断裂发生所需的总能量，从而提高了韧性。

利用多材料3D打印等新技术，通过控制材料结构和材料性能，在提高韧性的同时降低脆性。例如，多孔固体仿生材料通过显微结构模式的变化，可基本控制弹性。然而，要实现精确的三维打印模式，还需要在微观尺度上控制制造工艺的误差。

**模拟章鱼的动态移动** 章鱼形态学和行为学研究为软体机器人的驱动和控制提供了灵感。在一些仿章鱼机器人中，软质材料与流体动力学的相互作用产生了令人信服的模仿行为，如动力臂的“抖动”动作。同样，在软体机器人手臂中引入硬质钢丝，可让“假关节”以章鱼的步态行走。

从生物学的角度来看，理解章鱼运动是一个挑战，阻力系数或浮力系数的微小参数变化，可极大地改变模型中章鱼臂动力学的模拟行为，因此需要精确的实验来实现真实手臂的特性。对章鱼臂延伸行为动作的观察表明，章鱼似乎也是通过这一对参数来控制其柔软触手的。有趣的是，研究表明，章鱼是通过分布在触手上的末梢神经网络控制触手伸缩运动的。可将章鱼触手的运动位置分解为“运动基元”，例如，通过观察一个复杂的扭转运动，可让机器人实现拧开瓶盖的动作。最新的生物实验结果表明，章鱼在任何特定时刻都会选择最方便的方向，来实现向任意方向的运动。或通过直接模仿章鱼的动态移动，或通过机械学预编程应用程序，章鱼的运动基元已被运用于软体机器人运动学，但研究人员的最终梦想，是通过简单的控制手段，来构建类似于章鱼的动态移动。

核心问题是，软体机器人必须证明自己的价值，必须充分展示其明显的竞争优势。只有这样，才能让科幻成为现实。

**“软”“硬”竞争的未来**

软体机器人的研究与开发目前在很大程度上依赖于手工制作，技能和经验水平的不同会导致很大差异，进而影响软体机器人的机械特性。另外还需要对机器人和机器人子系统性能作直接比较的标准，目前已确定了一组致动器性能通用指标，生物学家提出，软质致动器的性能参数要与生物肌肉的性能参数相媲美。一个直观的度量标准是机器人系统的弹性模量，即软体机器人所要达到的柔韧度的值。

但是，软体机器人开发的核心问题，是软体机器人必须证明自己的价值。尽管在工业环境中使用软体机器人的理由有很多，但最近在机器人比赛中获胜的仍然是传统的动作僵硬的刚性机器人手臂。一家工业软体机器人初创公司在早期曾取得很大成功，并受到了媒体的广泛报道，但最近宣布即将破产。尽管如此，研究人员仍然坚信软体机器人技术有着广阔的发展空间，但创业的经验表明，只有充分展示软体机器人的竞争优势，才能成功地将研究成果转化为人们接受的社会实践。

在不久的将来，恰佩克科幻小说中的场景将成为现实，面团样的湿软物质最终将变成柔软灵活的机器人，给人类带来一个全新的自动化世界。

