arXiv:2303.00619v1 [cs.RO] 1 Mar 2023

# 基于聚合物的自校准光纤触觉传感器

Wentao Chen[1], Youcan Yan[2],Zeqing Zhang[1],Lei Yang[3,1] 和 Jia Pan[1]

**摘要—人类皮肤在接触不同尺寸的物体时，能够准确感知已解耦的法向力和剪切力。尽管机器人应用中已有许多柔软、贴合性良好的触觉传感器能够解耦法向力和剪切力，但接触物体的尺寸对力校准模型的影响通常被忽略。基于可通过软光纤纤芯中的光功率损耗推导接触力这一原理，我们通过在软弹性体中嵌入双层编织聚合物基光纤各向异性结构，设计了一种软触觉传感器，能够解耦法向力和剪切力，并依据物体尺寸校准测量结果。利用光纤的各向异性响应，我们开发了一种线性校准算法，可同时测量接触物体的尺寸以及经过物体尺寸校准的解耦法向力和剪切力。在机械臂末端对传感器进行校准后，我们表明，在所有方向的感测范围均为0-2N时，机器人重建力矢量的平均精度为：法向力0.15N、X轴剪切力0.17N、Y轴剪切力0.18N；在测试压头直径为5-12mm的范围内，物体尺寸测量的平均精度为0.4mm。**

## I. 引言

人类皮肤能够感知由外部接触力旋量引起的变形场，并同时从变形场中提取施加的力和物体尺寸信息 [1]。这是使人手能够执行广泛操作任务的关键因素之一。因此，为了达到人类水平的操作灵巧性，为现代机器人夹爪配备能够感知丰富接触信息的人工触觉传感器，对于实现这些操作任务至关重要。

近年来，人们提出了许多能够测量表面变形场（包含力和物体尺寸信息）的人工触觉传感器。一类主要方案采用基于视觉的传感器，捕捉嵌入弹性体表面下方的标记点的法向和切向运动 [2]–[9]。利用光度立体视觉算法，可以重建或推断感测表面的表面变形深度图 [2]。在感测表面的连续图像帧中，标记点的运动使人们能够计算表面各个子区域的法向和切向位移，随后可利用逆有限元方法（iFEM）[4], [5], [7]或机器学习方法 [3], [6]推断接触力。除基于摄像头的传感器外，还有其他非摄像头式传感器也能测量变形场，例如采用流体通道电极的 BioTac [10], 、基于电阻抗断层成像（EIT）的触觉传感器 [11] 以及磁性薄膜传感器 [12]。这些传感器也使用深度学习（ [10], 中的变分自编码器、[11]中的深度神经网络）和 iFEM 来重建变形场。

然而，上述传感器存在若干局限性。首先，标记点运动与接触力之间的关系并不总是线性的，并且很容易受到接触物体几何形状的影响，因此需要包含不同形状压痕轮廓的大型数据集 [3]。此外，该机制的精度对相机参数高度敏感，并且在不同条件下需要进行图像适配 [5], [6]。另一方面，位移场与力场的测量高度耦合，因此在 iFEM 中从位移场估计力场时，需要进行图像处理或假设材料属性 [7], [9]。最后，上述研究均依赖笨重且复杂的硬件，这限制了其在需要贴合性和结构紧凑性的场景中的应用。

为应对触觉变形场测量中现存的挑战，我们提出了一种基于交织聚合物基光纤的触觉传感器。受 [13]和 [14]的启发，这些方法将多根光纤按不同方向排列以解耦法向力和剪切力；我们将光纤分为两层排列，从而同时解耦法向力、剪切力和压头尺寸。与以往的传感器不同，我们的触觉传感器采用不同形状的光纤，使弹性体在不同方向上产生各向异性响应。借助传感体积内交织光纤的组合，我们能够直接建立光纤信号与触觉力及接触物体尺寸之间的映射，无需依赖大量数据或后处理。此外，通过自校准算法，力测量结果不再受接触物体尺寸影响；以往的软式光纤触觉传感器并不具备这一功能。基于光纤内光强损耗与光纤变形长度之间的线性关系 [15], [16],，我们提出一种线性自校准算法，先求解接触物体尺寸，再根据光纤网络的读数和物体尺寸校准解耦后的法向力和剪切力。我们将测量结果与真实值数据进行比较，结果表明测量精度良好。

总而言之，我们的主要贡献如下：1）基于两层编织光纤的触觉传感器设计，能够对不同方向的形变产生

[1]香港大学计算机科学系，香港薄扶林，香港[2]法国国家科学研究中心-蒙彼利埃大学，LIRMM，交互式数字人研究组，法国蒙彼利埃[3]香港变革性服装生产中心，香港

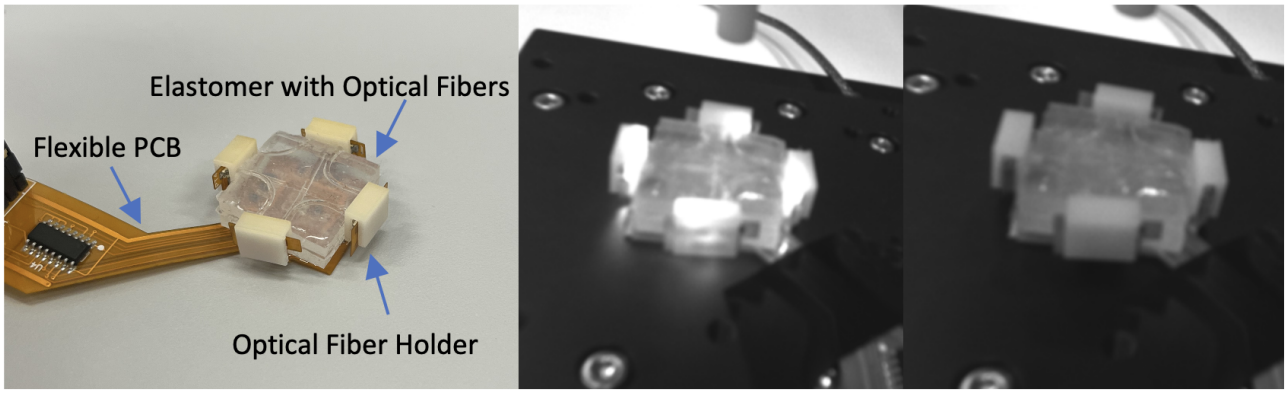



图 1. 传感器的整体构型。该传感器由弹性体包层构成，其中嵌入了两层光纤纤芯。带有集成红外辐射（IR）光源（发光二极管）和接收器（光电二极管）的柔性印刷电路板缠绕在弹性体周围，并通过四个光纤固定器连接（左图）。中间和右侧的图像由 Intel RealSense 红外摄像机拍摄，分别对应光纤内红外光开启和关闭的状态。

各向异性响应。2）一种线性自校准算法，可将光纤信号直接映射为接触物体尺寸，并根据接触物体尺寸校准触觉力。3）基于所提出的传感器硬件设计和校准算法，展示了精准的测量结果。

## II. 传感原理与硬件

### A. 传感器设计与工作原理

为实现光纤对不同方向变形的各向异性响应，我们提出了以下传感器设计。所提出的触觉传感器由两层软光纤以及用于光的发射与检测的印刷电路板（PCB）组成。如图 1 所示，软弹性体包裹着软光纤，并充当包层。根据全内反射原理 [17], ，纤芯的折射率 $n_{core} \approx 1.48$ 高于包层的折射率$n_{clad} \approx 1.41$，因此光线将完全限制在光纤纤芯内，功率损耗可以忽略不计。由于软材料表面的受力也会在材料深处引起应变，不同法向力与剪切力的组合会在弹性体内部产生不同的应变分布。当力作用于弹性体表面时，弹性体内部产生的变形也会导致纤芯光纤形状改变，并使纤芯内的光发生功率损耗。另一方面，压入深度（与法向力相关）和物体的几何尺寸也会影响弹性体内部的应变。

如第 I 节所述，已有研究证明了基于软波导的力传感器的可行性。在此，我们通过考虑接触物体的尺寸，进一步提升基于软波导的触觉传感器的力感测能力。基于以下假设：力的大小和物体尺寸会影响弹性体内光纤纤芯的变形段长度，因此外部载荷作用下光纤中的光功率损耗，即传感器响应，包含耦合的力和物体尺寸信息，需要进行解耦。因此，我们提出了软聚氨酯（PU）光纤的双层结构，以在下一节验证这一假设，如图 2 所示。对于每根光纤，一端连接红外发光二极管芯片，另一端连接红外光电二极管（PD）芯片。

光纤形状的差异旨在产生各向异性光纤响应，以提取并解耦力和物体尺寸信息。该结构的顶层由四根 U形光纤组成，主要对剪切载荷分量敏感。U形光纤的弯曲部分对剪切变形更敏感，而 U形光纤与底部印刷电路板之间的弹性体部分可确保提供足够的法向支撑力，使其不易受到法向变形的影响。相比之下，底层由两根垂直交叉的直光纤组成，其设计主要用于感知法向载荷分量，因为假定光纤在轴向上的变形可以忽略不计。传感器侧面与直光纤之间的弹性体部分也能确保直光纤不易受到剪切变形的影响。除了连接在光纤末端的光电二极管芯片外，弹性体底部还连接了一个额外的光电二极管芯片，用于读取底层光纤的漏光功率，且仅对压入深度敏感。经成功验证后，可利用印刷电路板上的光电二极管读数，同时获取物体尺寸和经过校准的力矢量。

### B. 制造工艺

如图所示，触觉传感器的制造工艺包括三个关键步骤：弹性体包层和光纤芯的地形模塑、印刷电路板层制造，以及弹性体与印刷电路板层的组装

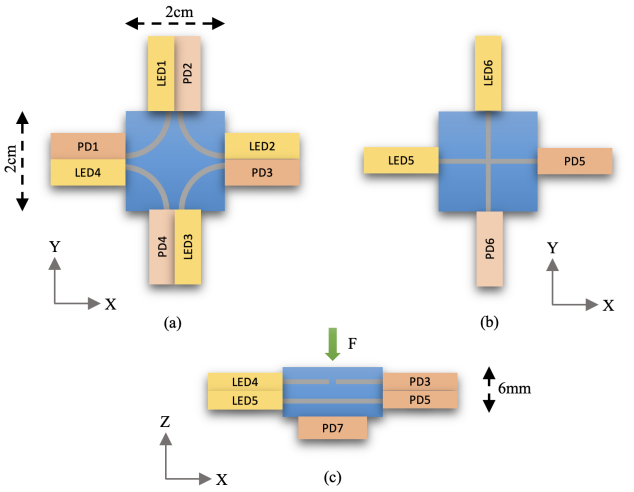



图 2. 所提出的触觉传感器设计。(a) 和 (b) 分别展示了光纤结构的上层和下层，灰线表示光纤。(c) 展示了弹性体内该结构的横向剖面图。外围的红外发光二极管和红外光电探测器如图所示。注意：图中尺寸并未严格按比例绘制。

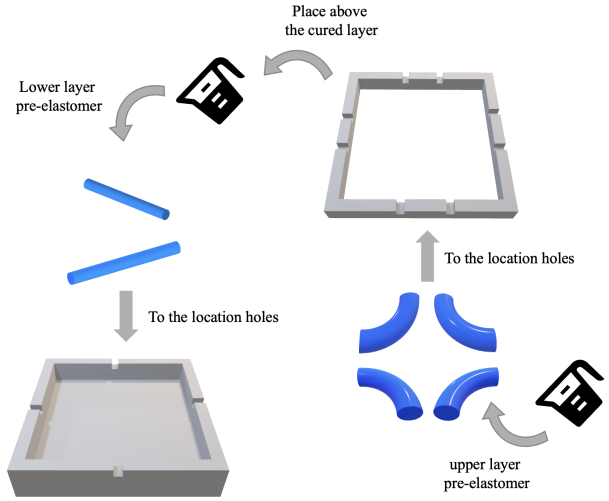



图 3. 双层光纤结构传感器弹性体的制造示意图。制造步骤从左向右进行。制造每一层时，将光纤末端（图中以蓝色管状物表示）固定在定位孔处，以便预先拉伸或弯曲，然后将未固化的弹性体倒入模具并固化。该结构的上层直接在下层上方固化。

见图 3。这些步骤按以下顺序进行
所列顺序。

- 地形模塑：弹性体包层的上层模具和下层模具（图 3a）由 WeNext 3D打印服务（WeNext Technology Co., Ltd）使用 WeNext 8100 SLA聚合物树脂进行 3D打印。为使光纤在弹性体内部呈对称分布，用于组装内部光纤纤芯的定位孔设在模具每一侧的中部。定位孔的尺寸与光纤纤芯的直径相同（1mm）。弹性体的尺寸（见图 2）经过专门设计，以平衡光纤芯内的透光率与传感器的灵敏度。为模塑嵌入光纤芯的弹性体包层，我们使用了硅橡胶弹性体 Ecoflex 00-50（Smooth-On Inc.）。将 Ecoflex 00-50 的 A、B 两组分按 1:1 的比例混合，然后将混合物放入真空离心混合机，以 1000 rpm 的速度混合 1 分钟。将混合后的预弹性体倒入下层模具中，再放置于设定为 70°C 的加热平台上 15 分钟。下层固化后，将模具从固化的下层上取下，并将上层模具直接放置在已固化的下层上方，使边缘对齐。随后重复相同工序，使弹性体上层固化。请注意，在将预弹性体倒入模具之前，聚氨酯纤维（直径为 1mm，SHIN-IL Co.）已预先拉伸成直线，并固定在下层模具的定位孔中；同时将其弯成四分之一圆形，并固定在上层模具的定位孔中。

- PCB层制造：发光二极管（0805 封装，IR17- 21C，亿光电子工业股份有限公司）和光电二极管（0805 封装，PT17-21C，亿光电子工业股份有限公司）是光学资源和信号接收器，集成在同一块柔性印刷电路板上。该电路由 Arduino Mega 2560 微控制器板提供 3.3V 电压电源。与发光二极管串联的电阻 $R_{LED}$以及与光电二极管串联的电阻 $R_{PD}$，其阻值与 [14], 中的相同，以便将发光二极管的发光强度和光电二极管的电压读数调整到合适水平，使传感器对外部载荷足够敏感。

- 弹性体与印刷电路板的组装：弹性体与柔性印刷电路板组合后，即完成触觉传感器的组装。柔性印刷电路板的伸出部分上设有 LED-PD 对，位于弹性体两侧；这些部分弯折成 90°，朝向弹性体的侧面。为将柔性印刷电路板紧密固定在弹性体上，同时确保光纤纤芯末端与发光二极管和光电二极管正确对齐，使用 3D 打印制作了四个光纤固定器（如图 1 所示），其上设有用于光纤末端以及柔性印刷电路板上发光二极管和光电二极管的定位孔。光纤固定器将弹性体与四个柔性印刷电路板伸出部分紧密连接，使传感器在发生较大变形时也能稳定输出信号。

### III. 数据采集

图 5 展示了数据采集过程。使用三轴光学精密运动平台（SZH Co.,Ltd.）控制传感器的法向和侧向位移，从而控制弹性体的按压程度。最大

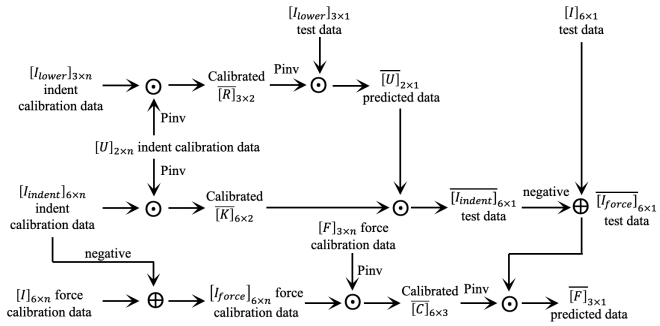



图 4. 所提出的自校准算法示意图。⊙ 表示矩阵的点积，⊕ 表示矩阵求和，'Pinv'表示矩阵的 Moore-Penrose 伪逆，'negative'表示矩阵的负值。

运动平台在 Z 方向上的移动距离为 8mm，在 ± X 和 Y 方向上的移动距离为 10mm，重复定位误差小于 5$\mu$m。各个运动方向上的移动均通过手动调整控制。通过调整运动平台的位置，接触后平台与压头之间会产生相对运动，并由此产生法向力和剪切力。法向力和剪切力的真实值由安装在机械臂末端的力/扭矩传感器测得。

### *A.* 压入深度与尺寸感知

如第 II 节所述，纯法向压入的信息是从下层光纤和底部光电二极管中提取的。因此，在平台沿法向移动 0–5 mm 的过程中，使用直径为 5–12 mm 的圆柱形压头，采集传感器底部的下层光学纤芯、上层光学纤芯和光电二极管的响应。此时产生的法向力值并非用于法向力校准，而仅用于利用不同直径的压头产生不同的压入深度（因为不同尺寸的压头会产生不同的压入深度）。使用前文所述的硬件配置，归一化光强变化 ($\Delta I$) 除以 $I_0$，可反映光纤变形和传感器上的压入深度。根据采集的数据，我们旨在确定下层直光纤的读数与底部光电二极管读数之间的关系，以及仅由压入深度和压头尺寸变化所产生的变形。校准详情见第 III-C 节。

### *B.* 法向力与剪切力感知

如第二节所述，剪切力的信息由上层光纤提取。为对传感器施加剪切力，还应同时施加法向力。压入过程中，压头始终垂直于弹性体表面，剪切力由运动平台沿 X 方向和 Y 方向移动产生。X 方向和 Y 方向移动的不同组合会产生不同的剪切力分量，用于校准（见第 III-C 节）。为采集单根光纤对不同剪切力的响应，通过保持运动平台的高度不变来维持法向力恒定，并在不同法向力下重复相同的过程。由于剪切力数据是在存在法向力的情况下采集的，因此应综合六根光纤的信号，以准确校准光纤响应与法向力和剪切力之间的关系。

### *C.* 自校准算法

在此，受 [13], 启发，我们提出了一种校准方法，可根据传感器的光强响应确定法向力、剪切力以及压头半径。考虑到光纤的响应特性，我们采用线性校准方法，同时对法向力、剪切力和压头直径进行校准与解耦。在此，我们采用两步校准策略：（1）校准主要由压入深度 $\delta$ 和半径 $r$ 引起的光强变化之间的关系；（2）校准主要由施加力引起的光强变化之间的关系。触觉力自校准测量的完整过程如图4所示。

在第一步校准中，我们校准了下层光电二极管（PD5 和 PD6）与底部 PD7 感知到的光强变化（三个输出总计）和压入因子之间的线性关系。我们使用遵循公式1的增益矩阵 $[R]_{3\times2}$ 来表征这一关系。在 $[I_{lower}]_{3\times n}$ 中，每一行代表所采集的 $n$ 个采样信号中的一个信号，其中包含下层和底部的三个光电二极管读数。在 $[U]_{2\times n}$ 中，每一行包含每次 $n$压入的压入深度和压头半径的串联值。

$$[I_{lower}]_{3\times n} = [R]_{3\times2} \cdot [U]_{2\times n} \tag{1}$$

利用 Moore-Penrose 伪逆，求得的增益矩阵 $[R]$为

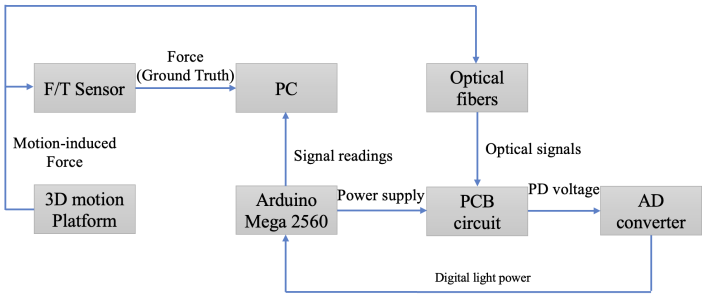
$$[\overline{R}]_{3\times2} = [I_{lower}]_{3\times n} \cdot ([U]^{\top}_{n\times2} \cdot [U]_{2\times n})^{-1} \cdot [U]^{\top}_{n\times2} \tag{2}$$

利用该增益矩阵，我们可以根据两个下层光电二极管和底部光电二极管的读数，同时恢复压入深度和压头直径:

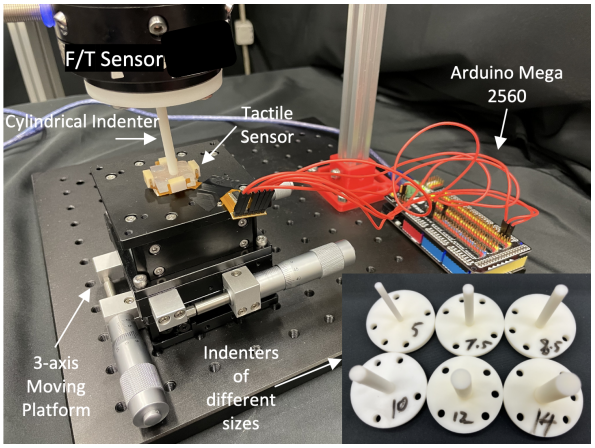
$$[\overline{U}]_{2\times1} = ([\overline{R}]^{\top}_{2\times3} \cdot [\overline{R}]_{3\times2})^{-1} \cdot [\overline{R}]^{\top}_{2\times3} \cdot [I_{lower}]_{3\times1} \tag{3}$$

在第二步校准中，我们假设光纤内的总光强变化是由上文第一步计算出的压入因子所导致的光强变化与施加的力所导致的光强变化之和，如下式所示:

$$[I]_{6\times n} = \underbrace{[C]_{6\times3} \cdot [F]_{3\times n}}_{[I_{force}]_{6\times n}} + \underbrace{[K]_{6\times2} \cdot [U]_{2\times n}}_{[I_{indent}]_{6\times n}} \tag{4}$$




(a) 数据采集和校准过程示意图。




(b) 用于数据采集和校准的硬件装置。压头与力/扭矩传感器相连，并压在运动平台上触觉传感器的表面。

图5. 用于数据采集和校准的硬件装置示意图及光学照片。

我们将式（4）中加号右侧的部分记为$[I_{indent}]$，其中包含当仅发生法向压入时所有六根光纤内信号变化的 $n$ 采样集。增益矩阵 $[K]$ 校准了压入因子与所有光纤中的信号变化之间的关系。

$$[I_{indent}]_{6\times n} = [K]_{6\times 2} \cdot [U]_{2\times n} \tag{5}$$

$[I_{indent}]$ 中的样本是在不施加剪切力的情况下，使用不同尺寸的压头以不同压入深度采集的。尽管此过程中存在法向力，但它与压入深度和压头半径均呈正相关，因此我们将在后续方程中考虑法向力。与之前相同，使用 Moore-Penrose 伪逆，求得的增益矩阵 $[K]$ 为

$$[\overline{K}]_{6\times 2} = [I_{indent}]_{6\times n} \cdot ([U]^{\top}_{n\times 2} \cdot [U]_{2\times n})^{-1} \cdot [U]^{\top}_{n\times 2} \tag{6}$$

校准 $[K]$ 后，待校准的剩余增益矩阵为 $[C]$，它描述了施加的法向力和剪切力 $[F]$ 与忽略压入因子后的光信号变化 $[I_{force}]$ 之间的关系。详细表达式见方程7和8。

$$[I_{force}]_{6\times n} = [I]_{6\times n} - [I_{indent}]_{6\times n} = [C]_{6\times 3} \cdot [F]_{3\times n} \tag{7}$$

$$[\overline{C}]_{6\times 3} = [I_{force}]_{6\times n} \cdot ([F]^{\top}_{n\times 3} \cdot [F]_{3\times n})^{-1} \cdot [F]^{\top}_{n\times 3} \tag{8}$$

计算出所有校准矩阵后，即可根据式（9），利用校准后的$[C]$，并基于求得的压入因子$[U]_{2\times 1}$ 和由校准后的 $[K]_{6\times 2}$与 $[U]_{2\times 1}$拟合得到的 $[I_{indent}]_{6\times 1}$，计算施加的法向力和剪切力。

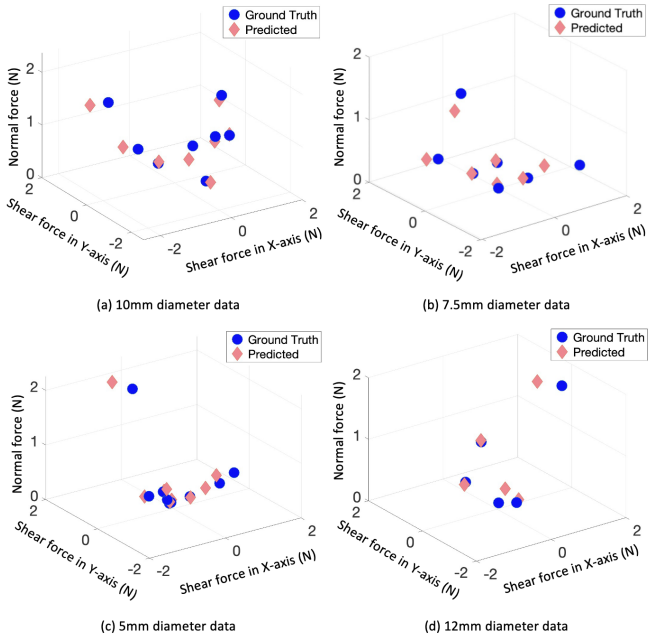



图 6. 不同直径的压头施加的法向力与剪切力组合的真实值（蓝色圆圈）和预测值（粉色菱形）。实验中使用的压头直径为 10 mm、7.5 mm、5 mm 和 12 mm，对应结果分别如 (a)、(b)、(c) 和 (d) 所示。预测值根据 6 根光纤（光电二极管1-6）的信号计算得出。

$$[\overline{F}]_{3\times 1} = ([\overline{C}]^{\top}_{3\times 6} \cdot [\overline{C}]_{6\times 3})^{-1} \cdot [\overline{C}]^{\top}_{3\times 6} \cdot [\overline{I_{force}}]_{6\times 1} \tag{9}$$

## IV. 结果与讨论

真实力与预测力的比较如图6所示。根据第III-C节中的线性校准关系，当运动平台移动至

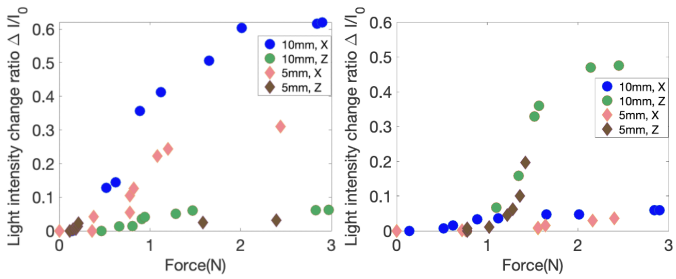



图 7. 光纤对不同压头直径和不同方向的力的响应对比。(a) 显示连接 LED4 和 PD4 的光纤的响应，(b) 显示连接 LED5 和 PD5 的光纤的响应。图中展示了各光纤响应的各向异性。

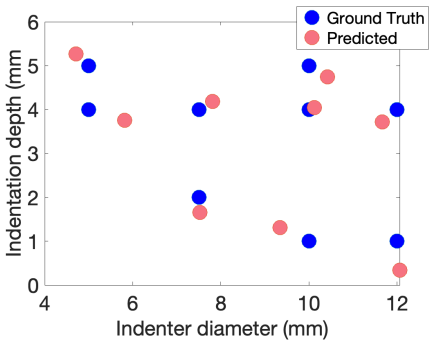



图 8. 实验中使用的压入深度和压头半径的真实值（蓝色圆圈）与预测值（粉色圆圈）。预测值根据下层两根光纤的信号以及底部的光电二极管（PD5-7）计算得出。

不同位置时，可根据光信号变化计算出预测力值。实验中，Z方向的运动范围为距初始位置0至5 mm； ± X轴和Y方向的运动范围为距初始位置0至4 mm，步长为1 mm，以采集校准数据集。测试数据集采用各方向上校准数据集中相邻两个位置的中间位置采集。测试结果如图6所示。对于每种压头直径，在感测范围内，预测力值与真实力值十分接近，X轴、Y轴和Z轴上的平均力误差分别为0.17 N、0.18 N和0.15 N。尽管运动平台在各方向上的校准位置呈线性调整，但与各校准位置对应的数据点分布呈现非线性，这是因为在压头线性压缩过程中，弹性体及其内部嵌入的光纤会产生非线性应变。随着力的大小增加，这种非线性变得更加明显，图中的数据点分布也更加稀疏。尽管如此，仍可使用线性校准方法，因为力感测范围相对较小（在2 N以内），且相较于力感测范围，力误差也较小。

正如图 6 所示，我们的触觉传感器能够准确测量力，图 7 定量展示了不同层中光纤的各向异性响应。图 7a 绘制了上层一根光纤（连接 LED4 和 PD4 的光纤，见图 2）的响应。弯曲光纤在不同尺寸的压头施加剪切力时，光强度会显著变化，而在法向力作用下，光强度的变化可以忽略不计。图 7b 绘制了下层一根光纤（连接 LED5 和 PD5 的光纤，见图 2）的响应。与弯曲光纤不同，直光纤在法向压缩作用下的光强度会显著变化，而在剪切力作用下的变化可以忽略不计。此外，直光纤在不同直径压头施加法向力时也呈现出显著不同的响应。另一方面，利用下层直光纤的各向异性响应以及底部 PD 的响应，该触觉传感器能够准确解耦压入深度和压头直径，如图 8 所示；压头直径预测的平均误差为 0.4 mm，压入深度测量的平均误差为 0.3 mm。结果验证了我们的传感器设计能够同时提取并解耦力和压头尺寸，这得益于不同层中光纤的各向异性响应。

## V. 结论

本文展示了一种新型聚合物基光纤触觉传感器，该传感器能够测量接触物体尺寸，并根据物体尺寸校准后解耦法向力和剪切力，且测量精度良好。结果凸显了各向异性双层光纤结构、柔性印刷电路板的硬件设计以及校准算法所带来的精确测量能力。这使触觉传感器用户无需依赖机器学习或 iFEM 等数据驱动方法，即可根据接触力和物体尺寸信息精确测量变形场，同时成本较低且易于制造。传感器表面也具有良好的贴合性，有望用于人类或机器人的皮肤，制成可穿戴设备。

基于我们未来的工作，仍有一些方面可以改进。目前，光纤的排列方式、光纤层数以及传感器尺寸仍受外围电子元件尺寸的限制。未来可以增加更多层，以解码更多触觉模态；还可以通过采用优化的光纤排列方式来调整不同的各向异性。

## 参考文献

[1] R. S. Johansson 和 ˚A. B. Vallbo，“人手无毛皮肤中的触觉感觉编码”，《神经科学趋势》，第 6 卷，第 27–32 页，1983 年。[2] W. Yuan、S. Dong 和 E. H. Adelson，“Gelsight：用于估计几何形状和力的高分辨率机器人触觉传感器”，《传感器》，第 17 卷，第 12 期，第 2762 页，2017 年。

[3] F. Guo、C. Zhang、Y. Yan、P. Li 和 Z. Wang，“使用基于视觉的触觉传感器测量三维变形和载荷”，载于*2016*年*IEEE*第二十五届国际工业电子学研讨会（*ISIE*）。IEEE，2016 年，第 1252–1257 页。[4] R. Sui、L. Zhang、T. Li 和 Y. Jiang，“一种基于分布力和变形的基于视觉的触觉传感器初始滑移检测方法”，*IEEE*传感器期刊，第 21 卷，第 22 期，第 25 973–25 985 页，2021 年。[5] Y. Du、G. Zhang、Y. Zhang 和 M. Y. Wang，“用于FingerVision传感器的密集随机颜色图案高分辨率三维接触变形跟踪”，*IEEE Robotics and Automation Letters*，第 6 卷，第 2 期，第 2147–2154 页，2021 年。[6] Y. Zhang、X. Chen、M. Y. Wang 和 H. Yu，“采用薄型仿复眼成像系统的多维触觉传感器”，软体机器人，第 9 卷，第 5 期，第 861–870 页，2022 年。[7] D. Ma、E. Donlon、S. Dong 和 A. Rodriguez，“使用GelSlim和逆有限元法进行密集触觉力估计”，载于*2019*年国际机器人与自动化会议（*ICRA*）。IEEE，2019 年，第 5418–5424 页。[8] X. Lin、L. Willemet、A. Bailleul 和 M. Wiertlewski，“利用标记阵列的颜色干涉效应进行球形触觉传感器曲率感知”，载于*2020*年*IEEE*国际机器人与自动化会议（*ICRA*）。IEEE，2020 年，第 603–609 页。[9] S. Wang、Y. She、B. Romero 和 E. Adelson，“GelSight Wedge：利用紧凑型机器人手指测量高分辨率三维接触几何”，载于*2021*年*IEEE*国际机器人与自动化会议（*ICRA*）。IEEE，2021 年，第 6468–6475 页。[10] Y. Narang、B. Sundaralingam、M. Macklin、A. Mousavian 和 D. Fox，“ 通过基于物理的仿真和学习得到的潜在投影实现机器人触觉感知从仿真到现实的迁移”，载于*2021*年*IEEE*国际机器人与自动化会议（*ICRA*）。IEEE，2021 年，第 6444–6451 页。[11] K. Park、H. Yuk、M. Yang、J. Cho、H. Lee 和 J. Kim，“利用电阻抗和声学断层成像进行触觉感知的仿生弹性体机器人皮肤”，*Science Robotics*，第 7 卷，第 67 期，第 eabm7187 页，2022 年。[12] Y. Yan、Z. Hu、Z. Yang、W. Yuan、C. Song、J. Pan 和 Y. Shen，“用于超分辨率触觉感知且具备力自解耦功能的软磁性皮肤”，*Science Robotics*，第 6 卷，第 51 期，文章编号 eabc8801，2021 年。[13] D. Cao、J. Hu、Y. Li、S. Wang 和 H. Liu，“用于三维曲面壳体的基于聚合物光波导的三轴触觉感知”，*IEEE Robotics and Automation Letters*，第 7 卷，3450，2022 2，3443，无页码信息。[14] J. Zhou、Q. Shao、C. Tang、F. Qiao、T. Lu、X. Li、X.-J. Liu 和 H. Zhao，“通过各向异性波导实现用于人类与机器人抓取的柔性紧凑型多轴触觉传感器”，*Advanced Materials Technologies*，第 7 卷，第 11 期，文章编号 2200595，2022 年。[15] H. Bai、S. Li、J. Barreiros、Y. Tu、C. R. Pollock 和 R. F. Shepherd，“可拉伸分布式光纤传感器”，*Science*，第 370 卷，第 6518 期，第 848–852 页，2020 年。[16] H. Zhao、K. O’brien、S. Li 和 R. F. Shepherd，“通过可拉伸光波导实现光电神经化软体假手”，*Sciencerobotics*，第 1 卷，第 1 期，文章编号 eaai7529，2016 年。[17] H. Li 和 S. Xie，“通过全内反射测量生物组织折射率的方法”，*Applied optics*，第 35 卷，第 10 期，第 1793–1795 页，1996 年。