

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905479

用于微创外科手术机器人的多维力传感器解耦方法研究*

姚斌, 张建勋, 代煜, 孙会娇

(南开大学 机器人与信息自动化研究所 天津 300350)

摘要:在微创外科手术机器人系统中,力反馈功能的实现可以提高外科医生在手术中的灵活性,降低患者组织和器官损伤的风险。为实现手术过程中力的检测,设计了一种基于光纤布拉格光栅(FBG)的微创外科手术机器人多维力传感器并研究其解耦方法。该多维力传感器由3条间隔120°的光纤布拉格光栅沿轴向粘贴于手术工具杆末端构成。首先在对传感器应力分析的基础上使用最小二乘法解耦,但由于装配等因素使传感器输入输出之间增加了非线性成分,因此使用前馈神经网络对多维力传感器进行非线性解耦。其次从理论和实验两方面分析了穿刺器的平移对解耦之后的力的影响。实验结果表明,前馈神经网络解耦多维力传感器的效果较好,3个相互垂直方向上的平均误差分别为0.05、0.07和0.18 N;穿刺器平移后力检测的最大平均误差为0.036 N,可以忽略不计。设计的传感器、解耦方法以及对穿刺器平移影响的分析均具有很强的实用性。

关键词:力传感器;光纤布拉格光栅;微创手术机器人;解耦

中图分类号: TP212 TH823 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Research on decoupling method of multi-dimensional force sensor used in minimally invasive surgical robot

Yao Bin, Zhang Jianxun, Dai Yu, Sun Huijiao

(Institute of Robotics & Automatic Information System, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In minimally invasive surgical robot system, the implementation of the force feedback function can increase the flexibility of the surgeon during surgery and reduce the risk of damage to the tissues and organs of the patient. In order to achieve the force detection during surgical process, a multi-dimensional force sensor based on fiber Bragg grating (FBG) is designed for minimally invasive surgical robot and its decoupling methods are studied. The multi-dimensional force sensor is composed of three fiber gratings spaced 120° apart that are attached to the end of the surgical tool rod along the axial direction. Firstly, based on the stress analysis of the sensor, the least squares method is used for decoupling. However, the sensor has a nonlinear relationship between inputs and outputs due to the factors such as assembly and etc., so the feedforward neural network is used to carry out the nonlinear decoupling of the multi-dimensional force sensor. Then, the effects of the trocar translation on the decoupled force are analyzed theoretically and experimentally. The experiment results show that the feedforward neural network has good decoupling effects for the multi-dimensional force sensor, and the average errors in three mutually perpendicular directions are 0.05, 0.07 and 0.18 N, respectively. The maximum average error of the force detection after the trocar translation is 0.036 N, which is negligible. The designed sensor, the decoupling method and the analysis of trocar translation effects are proved to have strong practicality.

Keywords: force sensor; fiber Bragg grating (FBG); minimally invasive surgical robot; decoupling

0 引言

在医疗领域内,微创手术机器人得到了广泛应用^[1],

其应用大幅提高了手术的质量,减少了患者的术后康复时间^[2-3]。但是手术机器人在术中进行缝合或打结等操作时,由于缺乏与组织接触力的反馈会降低外科医生在手术中操作的灵活性^[4],且极易导致患者组织和器官的

收稿日期:2019-08-15 Received Date:2019-08-15

* 基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0110402)、天津市自然科学基金(18JCYBJC18800)项目资助

损伤,严重的情况下甚至会威胁到患者的生命,因此让其大规模应用受到了限制。

为解决该问题,研究人员针对细长杆手术工具设计了多种多维力传感器:早期主要是基于电阻检测的力传感器,如约翰霍普金斯大学 Prasad 等^[5]开发了两自由度力检测套管,德国宇航中心 Seibold 等^[6]开发了六维力/力矩传感器,比萨圣安娜高等学校的 Menciassi 等^[7]开发了具有挠性关节的微夹钳;近年来对该问题的研究思路上多采用基于光纤的方法,如鲁汶大学 Peirs 等^[8]开发的基于光纤反射原理的三维力传感器,伦敦国王学院 Puangmali 等^[9]利用光强度可调原理开发了三维力传感器,韩国科学技术院 Hoseok 等^[10]基于光纤光栅应变片设计了三维力传感器。利用光纤相关原理设计微型力传感器相比传统电阻应变片优势突出,其具有结构精巧、引线较少、不受电磁干扰等优点,因此更能适应人体内复杂的环境。本文设计了一种易于实现的多维力传感器并进行了解耦研究。传感器由粘贴在手术工具杆上的3条光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)构成。手术工具杆是一根细长的中空圆杆,手术工具杆上对增加的力感知元件的要求是不能改变其结构,而圆筒形的结构在轴向受力时应变与径向相比较小,这给测量轴向力增加了困难。

多维力传感器一般都会存在维间耦合,在多维力传感器进行解耦方法的研究上,大多数都使用经典的最小二乘法,基于传感器的布置进行直接建模以及基于误差建模等方法^[11-16]。而使用神经网络^[17]进行解耦对各种结构的传感器都具有很好的适用性。

在实际手术过程中,手术工具需经穿刺器进入人体来实施手术。穿刺器为中空圆筒形结构,固定于手术机器人操作臂上,其内径略大于手术工具杆的外径。穿刺器的作用是提供器械进出腹腔的通道。手术工具在穿刺器内往复运动的过程中可能会对力的检测有一定影响。因此有必要分析所设计的传感器是否会受到手术工具与穿刺器相对运动的影响。

本文利用3条FBG设计了一个结构简单的三维力传感器,并分别通过最小二乘法和神经网络对多维力传感器进行静态解耦研究,获得了较高精度。在穿刺器与手术工具杆相对运动的情况下,从理论和实验两方面分析了穿刺器对力检测基本没有影响。

1 传感器设计

1.1 FBG 测量力的原理

FBG 是利用紫外线曝光技术在光纤芯内形成折射率周期性分布的结构,这种光纤折射率调制使 FBG 成为波长选择器。当一束光进入 FBG 时,它能对波长满足光纤

反射条件的入射光产生反射,反射入射宽带光谱的窄带。

在 FBG 受到拉力或压力时,其反射的窄带光的波长会发生变化^[18],通过检测其波长的变化来确定力信息的大小。当多条 FBG 组合时,根据其波长变化可以确定多维力信息的大小和方向。

1.2 传感器设计

微创手术机器人系统中的手术工具来自于天津大学等单位研制的“妙手”微创手术机器人^[19],具有横滚、俯仰、偏航和开合4个自由度,采用钢丝传动,可在手术工具末端配置手术钳、手术剪和单刃刀片等装置以满足手术过程中不同技术操作的需求。其手术工具杆为中空玻璃纤维材质,长度为450 mm,外径为10 mm,内径为8 mm。

图1所示为本文所用的一套夹钳类手术工具,为了测量手术工具末端的钳头与人体组织的接触力,使用以氰丙烯酸酯为基础制成的粘着剂,将3条FBG沿轴向间隔120°粘贴在圆杆靠近钳头端,形成空间三维力传感器。图1中光纤光栅到钳头的距离 $d=60$ mm, A-A 截面是粘贴3条FBG的截面。

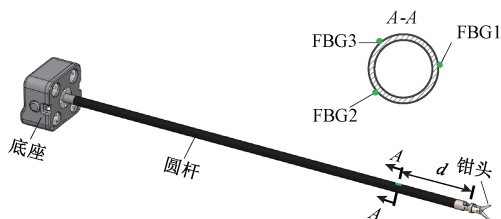


图1 手术工具和含传感器横截面

Fig.1 Surgical tool and sensor-containing cross section

2 解耦方法研究

多维力传感器一般都存在维间耦合,需要经过标定和解耦才能正常使用。解耦的过程:通过实验数据或物理条件对力和传感器的输出之间建立对应关系,进一步得到传感器的耦合模型,然后根据传感器的输出去估计未知的多维力在空间中各个方向的大小。

2.1 标定数据的获取

本文使用 HBM 公司生产的 FS22DI 解调仪来获取手术工具杆上3条FBG受力时波长变化的数据,然后通过以太网口,使用解调仪附带的数据采集软件将数据读取至上位机进行解耦研究。

图2所示的夹持装置定义了标定力加载时的方向和作用点,图3所示为在X轴正方向进行力加载的装置,其中细丝的一端固定连接于手术工具末端的加载点处,另一端绕过定滑轮连接至砝码托盘,通过在托盘中加入砝

码实现力的加载,其他几个方向力的加载方法与此类似。获取解耦和测试数据的过程,首先分别沿 X 、 Y 、 Z 方向施加单向力,然后同时在 X 、 Y 、 Z 中任意 2 或 3 个方向施加耦合力,将获取的数据分为 2 组:第 1 组含 21 组数据用于建立解耦模型;第 2 组含 9 组数据用于测试解耦效果。根据实际手术接触力,施加的 X 、 Y 方向力的大小未超过 5 N,施加的 Z 方向力的大小未超过 10 N。

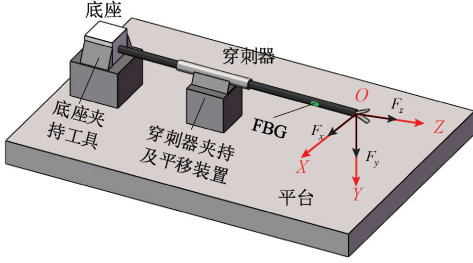


图2 手术工具的夹持装置

Fig.2 The holding device of the surgical tool

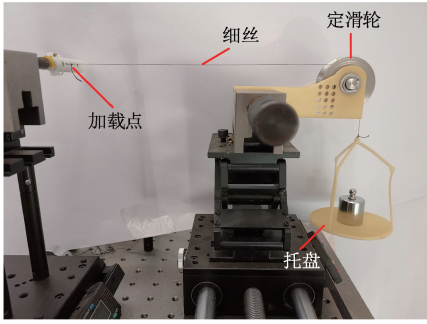


图3 力加载装置

Fig.3 Force loading device

2.2 最小二乘解耦

根据图2坐标系定义,任取图1中手术工具圆杆上的一个FBG,设其在 XY 平面的坐标为 $P(x, y)$, 对其进行应力分析。

$$\sigma = \frac{F_z}{A} + \frac{M_x y}{I_x} + \frac{M_y x}{I_y} \quad (1)$$

式中: A 为横截面积; F_z 为钳头所受 Z 方向的力; I_x 和 I_y 分别为截面对形心主轴 X 和 Y 的惯性矩; M_x 和 M_y 分别是在 X 和 Y 方向钳头所受集中力 F_x 和 F_y 所造成的弯矩,而弯矩与受力的关系如式(2)和(3)所示。

$$M_x = F_x d \quad (2)$$

$$M_y = F_y d \quad (3)$$

根据胡克定律,在一定的比例极限范围内应力 σ 与应变 ε 成线性比例关系。

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

式中: E 为弹性模量。FBG 的波长变化 $\Delta\lambda$ 与应变 ε 的关

系为:

$$\varepsilon = s \cdot \Delta\lambda \quad (5)$$

式中: FBG 的灵敏度 $s = 830.1 \mu\varepsilon/\text{nm}$ 。

由式(1)~(5)可以得到:

$$\Delta\lambda = k_1 F_x + k_2 F_y + k_3 F_z \quad (6)$$

式中: $k_1 = \gamma d / EsI_x$, $K_2 = xd / EsI_y$, $K_3 = 1 / EA_s$ 。

由于构成传感器的 3 条 FBG 在 XY 平面的位置不同,故有:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = k_{11} F_x + k_{12} F_y + k_{13} F_z \\ \Delta\lambda_2 = k_{21} F_x + k_{22} F_y + k_{23} F_z \\ \Delta\lambda_3 = k_{31} F_x + k_{32} F_y + k_{33} F_z \end{cases} \quad (7)$$

写成矩阵形式有:

$$\mathbf{V} = \mathbf{K}\mathbf{F} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{V} = (\Delta\lambda_1 \quad \Delta\lambda_2 \quad \Delta\lambda_3)^T$ 是 3 条 FBG 波长变化向

量; $\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix}$ 是系统耦合矩阵; $\mathbf{F} =$

$(F_x \quad F_y \quad F_z)^T$ 是实验中施加于传感器的实际力向量。所以 FBG 波长变化与所受各个方向的力之间理论上为线性关系,可以用最小二乘法进行解耦。

在对传感器解耦时,自变量为 FBG 波长变化向量,耦合的力信息则为因变量,其关系式为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{C}\mathbf{V} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{C} = \mathbf{K}^{-1}$ 为所求解耦矩阵,但其求解过程是利用第一组实验数据,由求解矩阵方程最小二乘估计量的方法求得解耦矩阵如下。

$$\mathbf{C} = \mathbf{F}\mathbf{V}^T (\mathbf{V}\mathbf{V}^T)^{-1} \quad (10)$$

最终可得:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} -10.99 & 10.18 & 15.82 \\ 8.51 & -13.88 & 16.53 \\ 254.22 & 183.83 & 214.08 \end{pmatrix}$$

根据所求解耦矩阵 $\mathbf{C}$,使用式(9)对第 2 组数据测试解耦效果。计算每组数据解耦后的力与实际力在各个方向上的平均误差。

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{F} - F| \quad (11)$$

式中: F 是其中一个方向上施加的力; $\hat{F}$ 是其对应方向上经解耦后的力。结果如表 1 所示。

表 1 两种解耦方式平均误差

Table 1 Average errors of two decoupling methods

(N)			
解耦方式	X 方向	Y 方向	Z 方向
最小二乘法	0.111	0.069	0.796
神经网络法	0.066	0.048	0.180

由表1可见Z方向的误差较其他2个方向大了一个量级。原因之一是Z方向应变较小,另外手术工具的装配等因素使传感器系统产生了非线性^[11],是导致Z方向的误差过大的另外一个原因。因此考虑通过神经网络方法对该含非线性成分的传感器模型进行解耦。

2.3 神经网络解耦

根据传感器系统实际情况及精度要求,确定本文使用的人工神经网络为4层前馈神经网络,其结构如图4示。其中第1层3个节点的输入为3个FBG波长的变化;第4层3个节点输出经解耦之后的X、Y、Z方向的力;第2、3层为隐含层。

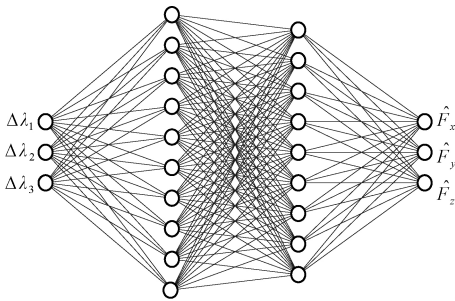


图4 前馈神经网络结构

Fig.4 The structure of feedforward neural network

确定解耦神经网络各层的神经元激活函数为:

$$\text{Relu}(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

Relu(x)是无界函数,不会达到饱和状态,可以不需要对输入数据初始化。前人文献中一般较多使用 Purelin 型函数^[20]。优化算法采用 Adam^[21],Adam 是一种可以替代传统随机梯度下降过程的一阶优化算法,它能基于训练数据迭代地更新神经网络权重。神经网络的终止条件是迭代达到 10 000 次或者连续 10 次目标函数的相对变化小于 0.000 01。

在调节隐含层节点个数时,使用上文所述第1组数据对神经网络进行多次训练。选取使得训练误差最小时的隐含层节点个数作为最终网络结构,得到第2层为10个节点,第3层为9个节点。对训练完成的神经网络使用上文所述第2组数据测试解耦效果,利用式(11)计算得到测试数据集在各个方向上的平均误差如表1所示。

比较最小二乘和神经网络的平均误差,可见神经网络解耦误差在各个方向上相对最小二乘均有所减小,Z方向上神经网络解耦的优势更加明显,误差仅是最小二乘法的23%。

3 穿刺器的影响分析

3.1 理论分析

在实际手术过程中,手术工具通过穿刺器进入体内进行手术操作,并会在穿刺器内往复平移。穿刺器的平移不会越过FBG到达手术工具末端,但会限制手术工具杆在XY平面内的挠度变化,故需要考虑这种平移是否会对空间三维力测量有影响。

如图5(a)所示,穿刺器的内径 $h=10.5\text{ mm}$,手术工具杆的外径 $Q=10.0\text{ mm}$,内径 $q=8.0\text{ mm}$ 。手术工具插入穿刺器后,可计算在未受力时与穿刺器管壁有0.25 mm空隙。手术工具杆受力直到与穿刺器壁接触前,传感器系统模型可简化为图6(a),其中安装在机器人臂上的手术工具杆视作一个悬臂梁,对于具有圆环截面的手术工具杆,其截面惯性矩为:

$$I_x = \frac{\pi}{64}(Q^4 - q^4) \quad (13)$$

考虑在手术工具杆末端施加力 F_x ,则由式(1)、(2)、(4)、(13)可以确定FBG处应变为:

$$\varepsilon = \frac{64F_x dy}{\pi E(Q^4 - q^4)} \quad (14)$$

在FBG粘贴处,式(14)与穿刺器的位置无关,故这种情况下,理论上穿刺器的平移对应变没有影响,也就是对力检测没有影响。

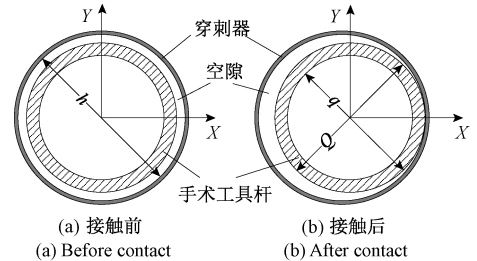


图5 手术工具与穿刺器位置关系的截面图

Fig.5 Sectional view of the positional relationship between the surgical tool and trocar

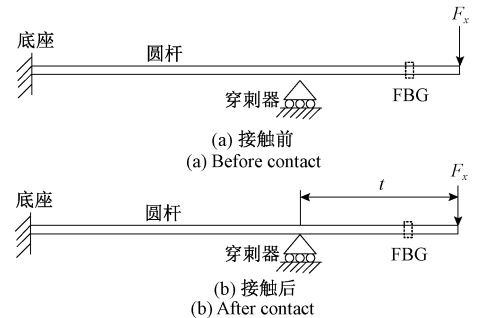


图6 考虑穿刺器影响的手术工具受力分析

Fig.6 Force analysis of the surgical tool when considering the influence of the trocar

在手术工具杆受力与穿刺器壁接触后如图 5(b) 所示,可将传感器系统受力时简化为图 6(b) 所示模型,其中穿刺器视为一个支座,其支撑力与手术工具杆受力方向相反。穿刺器的平移限制在图 6(b) 中 FBG 区域左面。同样地考虑在手术工具杆末端施加力 F_x , 由式(1)、(2)、(4)、(13)可以确定 FBG 处应变与式(14)相同,故这种情况下,理论上穿刺器的平移对应变没有影响,也就是对力检测没有影响。

3.2 实验验证

综合上述 2 种情况来看,理论上穿刺器的平移对应变没有影响,也就是对力检测没有影响。利用图 3 所示的力加载装置及方法对穿刺器的影响进行实验验证。如图 6 所示,利用穿刺器夹持及平移装置使 t 从 9 cm 平移至 21 cm 处,平移过程中始终对手术工具末端在 X 方向施加 1.96 N 的力,每隔 2 cm 记录 3 条 FBG 波长变化。实验重复进行 3 次,记录传感器的输出。图 7 所示为 3 次实验的平均值和标准差,由图 7 可见随着穿刺器的平移,FBG 的波长没有发生明显的变化。根据式(5),FBG 处应变没有发生变化,这与理论分析的结论一致。

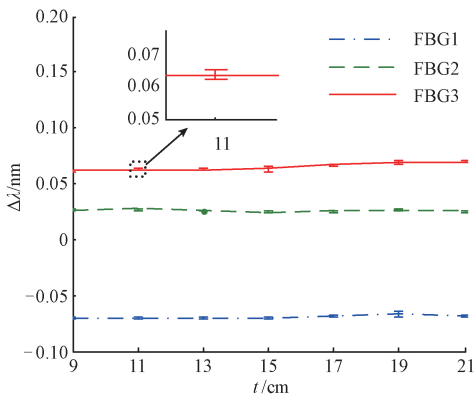


图 7 穿刺器平移时的 FBG 的波长变化
Fig.7 The wavelength variation of FBG when the trocar translates

对上文已经训练好的神经网络模型加入穿刺器平移时采集的数据再进行训练,训练数据增加至 35 组。将原神经网络第 2 层节点调整至 9 个,第 3 层节点调整至 7 个,其余参数保持不变。同样地做 3 次穿刺器平移实验,记录平移过程中采集的 21 组数据作为测试数据。利用式(11)计算得到解耦之后 X 、 Y 、 Z 方向力的平均误差如表 2 所示。由表 2 可见,穿刺器平移时带来的误差小于表 1 穿刺器未移动时的解耦误差,因此可以忽略不计。

前人所设计的力传感器的参数如表 3 所示。本文所

表 2 穿刺器平移时的解耦误差
Table 2 The decoupling error when the trocar translates (N)

误差	X 方向	Y 方向	Z 方向
平均误差	0.036	0.022	0.004

设计的力传感器适宜地利用手术工具为弹性体,保证了传感器结构稳定且刚度较大;对比传统应变片,使用 FBG 作为接触力检测元件,具有较高的精度和较高的抗电磁干扰能力,使得所设计力传感器结构紧凑便于集成;利用神经网络对多维力进行解耦,进一步地提高了所设计力传感器的精度;文中对穿刺器在手术中对所设计力传感器影响的理论分析,丰富了外科手术机器人力传感器设计的约束条件和设计原则;对穿刺器在手术中对所设计力传感器影响的实验验证,说明了该传感器的在实际应用中的可靠性。本文研究有利于加快微创外科手术机器人力检测与力反馈的应用进程。

表 3 多种方案参数对比
Table 3 Parameter comparison of various schemes

方案	量程/N		精度		结构	抗电磁
	径向	轴向	径向	轴向	稳定性	干扰能力
Prasad ^[5]	10	—	6.63%	—	强	弱
Seibold ^[6]	2	2	0.05 N	0.25 N	中	弱
Peirs ^[8]	1.7	2.5	0.04 N	0.04 N	中	强
Puangmali ^[9]	1.5	3	0.02 N	0.02 N	中	强
Hoseok ^[10]	10	10	0.10 N	0.10 N	弱	强
本文方法	5	10	0.07 N	0.18 N	强	强

4 结 论

本文设计了一种结构简单,实用性较高的三维力传感器。在应力分析的基础上进行最小二乘法解耦,但解耦效果不太理想;分析其中原因是手术工具的装配等因素使系统增加了非线性成分,因此利用前馈神经网络对多维力传感器进行非线性解耦研究,结果表明使用神经网络解耦在 X 方向的平均误差为 0.07 N, Y 方向为 0.05 N, Z 方向为 0.18 N,优于最小二乘法。接着从理论上分析得出传感器系统的受力模型,分析穿刺器与手术工具的相对运动不会对 FBG 处应变造成影响,并通过实验加以验证。实验结果表明,穿刺器在平移时的误差小于穿刺器未平移时的解耦误差,因此忽略穿刺器平移对力检测的影响。本文所设计的传感器、解耦方法以及对穿刺器影响的分析对于提高手术机器人的安全性具有重要意义。

参考文献

- [1] 付宜利, 潘博. 微创外科手术机器人技术研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(1): 1-15.
FU Y L, PAN B. Research progress of surgical robot for minimally invasive surgery [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(1): 1-15.
- [2] LANFRANCO A R, CASTELLANOS A E, DESAI J P, et al. Robotic surgery: A current perspective[J]. Annals of Surgery, 2004, 239(1): 14-21.
- [3] OKAMURA A M. Haptic feedback in robot-assisted minimally invasive surgery [J]. Current Opinion in Urology, 2009, 19(1): 102-107.
- [4] DAHIYA R S, METTA G, VALLE M, et al. Tactile sensing-from humans to humanoids [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(1): 1-20.
- [5] PRASAD S K, KITAGAWA M, FISCHER G S, et al. A modular 2-DOF force-sensing instrument for laparoscopic surgery[C]. Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, 2003: 279-286.
- [6] SEIBOLD U, KUBLER B, HIRZINGER G. Prototype of instrument for minimally invasive surgery with 6-axis force sensing capability[C]. IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2005, doi: 10.1109/ROBOT.2005.1570167.
- [7] MENCIASSI A, EISINBERG A, CARROZZA M C, et al. Force sensing microinstrument for measuring tissue properties and pulse in microsurgery [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(1): 10-17.
- [8] PEIRS J, CLIJNEN J, REYNAERTS D, et al. A micro optical force sensor for force feedback during minimally invasive robotic surgery [J]. Sensors and Actuators A (Physical), 2004, 115(2): 447-455.
- [9] PUANGMALI P, LIU H B, SENEVIRATNE L D, et al. Miniature 3-axis distal force sensor for minimally invasive surgical palpation [J]. Ieee-Asme Transactions on Mechatronics, 2012, 17(4): 646-656.
- [10] HOSEOK S, KIM H, JEONG J, et al. Development of FBG sensor system for force-feedback in minimally invasive robotic surgery[C]. International Conference on Sensing Technology, 2011, doi: 10.1109/ICSensT.2011.6136956.
- [11] 陈峰, 徐一鸣, 钟永彦, 等. 六维腕力传感器非线性正解耦方法设计 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33(6): 107-110.
- CHEN F, XU Y M, ZHONG Y Y, et al. Design of nonlinear directly decoupling method for six-axis wrist force sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(6): 107-110.
- [12] 陈望隆, 杨述焱, 胡权, 等. 面向运动力学测量的无线六维力传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 129-136.
- CHEN W L, YANG SH Y, HU Q, et al. Wireless six-dimensional force sensor for motion mechanics measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 129-136.
- [13] 刘俊, 徐军领, 李敏, 等. 垫圈式压电六维力传感器静态灵敏度解析 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 901-910.
- LIU J, XU J L, LI M, et al. Static sensitivity analysis of washer-type piezoelectric six-dimensional force sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(4): 901-910.
- [14] XIAO F U, WANG S, XINHUA X U, et al. An isolation enhanced PCA method with expert-based multivariate decoupling for sensor FDD in air-conditioning systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(4): 712-722.
- [15] LIANG Q K, WU W N, COPPOLA G, et al. Calibration and decoupling of multi-axis robotic Force/Moment sensors [J]. Robotics Computer-integrated Manufacturing, 2018, 49(2): 301-308.
- [16] 刘明尧, 邴俊俊, 周伟剑, 等. 基于光纤光栅的三维铣削力测量方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 49-57.
- LIU M Y, BING J J, ZHOU W J, et al. New three-axis milling force measurement method based on fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 49-57.
- [17] 牛培峰, 高龙, 孟凡东, 等. 基于神经网络解耦的循环流化床锅炉燃烧系统自适应模糊控制 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1021-1025.
- NIU P F, GAO L, MENG F D, et al. Adaptive fuzzy control based on neural network decoupling for circulating fluidized bed boiler combustion system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1021-1025.
- [18] 李红, 祝连庆, 刘锋, 等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014,

35(8): 1744-1750.

LI H, ZHU L Q, LIU F, et al. Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1744-1750.

- [19] WANG W, LI J, WANG S, et al. System design and animal experiment study of a novel minimally invasive surgical robot [J]. International Journal of Medical Robotics Computer Assisted Surgery, 2016, 12(1): 73-84.

- [20] 李映君, 韩彬彬, 王桂从, 等. 基于径向基函数神经网络的压电式六维力传感器解耦算法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1266-1271.

LI Y J, HAN B B, WANG G C, et al. Decoupling algorithms for piezoelectric six-dimensional force sensor based on RBF neural network [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(5): 1266-1271.

- [21] KINGMA D P, BA J. Adam: A method for stochastic optimization [J]. International Conference on Learning Representations, 2015, arXiv:1412.6980.

作者简介



姚斌, 2018 年于山东科技大学获得学士学位, 现为南开大学博士研究生, 主要研究方向为手术机器人的力感知。

E-mail: yaobin1@mail.nankai.edu.cn

Yao Bin received his B.Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2018. He is currently a Ph.D. student at Nankai University. His main research interest is force perception for surgical robot.



代煜(通信作者), 分别在 2002 年、2004 年和 2009 年于哈尔滨工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为南开大学副教授, 主要研究方向为面向手术机器人的智能感知技术。

E-mail: daiyu@nankai.edu.cn

Dai Yu (Corresponding author) received his B.Sc., M.Sc. and Ph.D. degrees all from Harbin Institute of Technology in 2002, 2004 and 2009, respectively. He is currently an associate professor at Nankai University. His main research interest is intellisense technology for surgical robot.