



(21) 申请号 202511442441.1

(22) 申请日 2025.10.10

(71) 申请人 浙江理工大学

地址 310000 浙江省杭州市钱塘区白杨街
道2号大街928号

(72) 发明人 罗潇 程琳 孙增 陈浩文
张一刚 姚盼 刘爱萍

(74) 专利代理机构 杭州敦和专利代理事务所
(普通合伙) 33296

专利代理师 冯海军

(51) Int. Cl.

G01L 1/14 (2006.01)

G01P 3/42 (2006.01)

A63B 67/197 (2016.01)

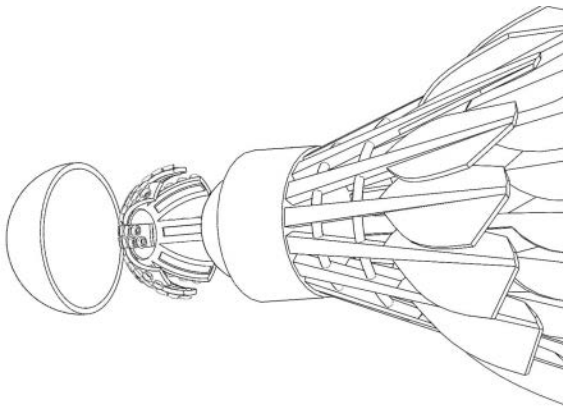
权利要求书2页 说明书6页 附图1页

(54) 发明名称

具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器及其制备方法与应用

(57) 摘要

本发明公开了一种具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器及其制备方法与应用,属于柔性电子技术领域。该传感器包括:柔性衬底;环型分布于衬底上的多个激光诱导石墨烯敏感元件;设于衬底中心并与敏感元件电性连接的导电弹性体,以及贴合于衬底下表面用于增强附着稳定性的吸盘阵列层。其制备方法结合激光直写与转印成型,实现传感器的高效、低成本制造。本发明通过放射性敏感阵列与中心力传导的仿生结构,将空间压力矢量直接转化为差分电信号,实现了硬件级的方向识别,识别误差小于 4° ;吸盘阵列利用范德华力有效抑制动态接触下的相对滑动。该传感器可集成于羽毛球球头,用于实时高精度地监测击球方向,显著提升训练的科学与数据分析能力。



1. 一种具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器,其特征在于,包括:

柔性衬底(3);

激光诱导石墨烯敏感元件(2),若干所述激光诱导石墨烯敏感元件(2)等间距环型分布于所述柔性衬底(3)的上表面;

导电弹性体(1),设置于所述柔性衬底(3)的中心位置,并与若干所述激光诱导石墨烯敏感元件(2)电性连接,用于接收并传导外部压力;

吸盘阵列层(4),贴合设置于所述柔性衬底(3)的下表面,所述吸盘阵列层(4)由微纳柔性吸盘构成,用于通过范德华力增强传感器与接触表面的附着稳定性,抑制测量过程中的相对滑动;

导线组件,所述导线组件电性连接于导电弹性体(1)与若干所述激光诱导石墨烯敏感元件(2)之间;

柔性封装层,所述柔性封装层覆盖封装所述导电弹性体(1)、激光诱导石墨烯敏感元件(2)以及柔性衬底(3)的搭接区域。

2. 根据权利要求1所述的具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器,其特征在于:所述激光诱导石墨烯敏感元件(2)的数量为八个,等间距呈环型分布于柔性衬底(3)的上表面,相邻敏感元件之间的夹角为 45° ,构成空间八向压力检测通道。

3. 根据权利要求1所述的具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器,其特征在于:所述导电弹性体(1)、嵌合有激光诱导石墨烯敏感元件(2)的所述柔性衬底(3)以及所述吸盘阵列层(4)自上而下以三明治结构层叠组装;柔性封装层封装后的整体传感器厚度为20mm-25mm。

4. 根据权利要求1所述的具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器,其特征在于:所述吸盘阵列层(4)中的每一微纳柔性吸盘的直径为2mm-5mm、高度为1mm-2mm,相邻两微纳柔性吸盘之间的间距与单个微纳柔性吸盘直径的比值为1:1.5。

5. 根据权利要求1所述的具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器,其特征在于:所述激光诱导石墨烯敏感元件(2)的长度为17mm-21mm、宽度为0.5mm-1.2mm;

若干所述激光诱导石墨烯敏感元件(2)呈放射性均匀分布于所述柔性衬底(3)上表面;相邻两个激光诱导石墨烯敏感元件(2)之间的夹角为 45° ,每个激光诱导石墨烯敏感元件(2)的边缘距离所述柔性衬底(3)边缘为2mm。

6. 根据权利要求1所述的具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器,其特征在于:所述导线组件包括与导电弹性体(1)电性连接的主线以及与激光诱导石墨烯敏感元件(2)电性连接的分线;

所述主线与导电弹性体(1)上表面之间,以及所述分线与对应所述激光诱导石墨烯敏感元件(2)之间,均通过导电银浆实现电路连接。

7. 根据权利要求1所述的具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器的制备方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、采用红外激光器在聚酰亚胺薄膜上标刻出放射性分布的激光诱导石墨烯敏感条;

S2、将标刻有激光诱导石墨烯敏感条的薄膜置入模型中,浇筑Ecoflex 00-30预聚体并固化,形成集成激光诱导石墨烯敏感阵列的柔性衬底(3);

S3、将多壁碳纳米管掺入Ecoflex预聚体中,制备导电弹性体(1);

S4、通过激光刻制负型模具,填充Ecoflex预聚体后,采用带半球凸起的对模合压成型,制得吸盘阵列层(4);

S5、将导电弹性体(1)至于柔性衬底(3)中心,与激光诱导石墨烯敏感条的近端搭接,使用导电银浆将主线连接至导电弹性体(1)上表面中心,并将八根分线依次连接至各激光诱导石墨烯敏感条的远端;在关键连接区域涂覆Ecoflex封装层,最后贴合吸盘阵列层(4),形成柔性触觉传感器。

8.根据权利要求7所述的具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器的制备方法,其特征在于:

在S1中,红外激光器的扫描速度为15-22mm/s,频率为80-130KHz,功率百分比为15%-21%;

在S3中,多壁碳纳米管的质量分数为5%-15%;

在S4中,负型模具腔体直径为3mm,深度为1.5mm,间距为4.5mm;半球凸起R=1.5mm。

9.一种集成有传感单元的智能羽毛球,其特征在于,包括:羽毛球球头;

如权利要求1至6中任意一项所述的柔性触觉传感器,其通过所述吸盘阵列层(4)稳定附着于所述羽毛球球头的内壁;

数据采集/发射模块,设置于所述羽毛球球头内部,与所述柔性触觉传感器的导线组件连接,用于采集并无线发射所述传感器的电阻变化信号;

其中,所述柔性触觉传感器在30m/s的击球速度下,其与球头内壁的相对滑动位移小于0.2mm。

10.一种羽毛球击球方向监测方法,采用权利要求9所述的智能羽毛球,其特征在于,包括以下步骤:

通过球拍击打所述智能羽毛球,冲击力经球头外壳传导至所述柔性触觉传感器的导电弹性体(1);

所述导电弹性体(1)将压力矢量分配至周围的激光诱导石墨烯敏感元件(2),导致各敏感元件产生差异化的电阻变化率(ΔR_i);

采集各敏感元件的电阻变化信号;

基于所述电阻变化信号,利用方向解算模型实时计算出击球力的方向角 θ ;模型为:

$$\theta(t) = \arctan \left[\frac{\sum_{i=1}^8 (\Delta R_i(t) \cdot \sin \alpha_i)}{\sum_{i=1}^8 (\Delta R_i(t) \cdot \cos \alpha_i)} \right] \text{ 其中, } \alpha_i \text{ 为第 } i \text{ 条敏感元件的方位角。}$$

具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器及其制备方法与 应用

技术领域

[0001] 本发明属于柔性电子与传感技术领域,具体涉及一种具备空间压力方向识别能力和稳定接触特性的柔性触觉传感器,尤其适用于集成于羽毛球或球拍表面,用于实时监测击球方向、力度分布及接触稳定性,提升训练科学性与训练数据分析能力。

背景技术

[0002] 柔性触觉传感器作为模拟人体皮肤功能的核心器件,在机器人灵巧操作、智能假肢以及人机交互等领域具有广阔应用前景。其发展长期致力于追求高灵敏度、多维信息感知和在复杂环境下的稳定性和适应性。。目前,该领域的主流技术路线主要分为两类:基于单一敏感单元的压力传感器:通常采用碳纳米管(CNT)/聚二甲基硅氧烷(PDMS)等复合导电弹性体薄膜,通过检测整体电阻或电容变化来感知压力幅值。然而,此类结构本质上无法获取力的空间方向信息,极大地限制了其在需要矢量力控的场景中的应用。基于高密度阵列的分布压力传感器:例如电容式或压阻式网格传感器,通过成像式测量压力分布,理论上可间接解析力方向。但该方法存在固有缺陷:首先,其通常采用平面矩形排布,对斜向力的响应存在各向异性,识别误差大;其次,依赖复杂的软件算法对阵列数据进行解耦来计算方向矢量,导致系统响应延迟大、计算成本高,难以满足动态交互的实时性要求。此外,动态接触下的稳定性是另一大技术瓶颈。机器人抓取滑动物体、假肢握持潮湿表面或医疗监测贴合曲面皮肤时,传感器与目标界面的意外相对滑动是导致信号失效的核心因素。传统解决方案包括:使用粘性贴片或者提高表面摩擦纹理,但是此类方法均未实现自适应、可逆的物理吸附,导致在动态或复杂表面应用中方向识别信号的信噪比急剧下降。此外,传感器的制备还需考虑集成工艺和制造成本。具体到智能体育装备如羽毛球领域,现有技术多依赖于惯性测量单元(IMU)来获取球体的加速度、角速度等运动参数。IMU无法直接感知球拍与球头之间的接触力方向与击球点分布这一关键信息。虽有尝试在球拍上粘贴薄膜传感器的方案,但受限于上述单一敏感单元或阵列传感器的固有缺陷,既不能实现可靠的力方向解析,又缺乏在高达30m/s击球速度的冲击下抑制自身滑动的机制,导致采集的数据信噪比低、可靠性差。因此,急需一种兼具方向识别能力与动态稳定接触特性的柔性传感器解决方案,能够从物理结构上直接解算力方向,并确保在高速、高冲击应用场景中与测量表面保持稳定附着。

发明内容

[0003] 为克服现有柔性触觉传感器在方向识别硬件架构缺失与动态接触失稳方面的缺陷,本发明提供了一种具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器,通过仿生八爪鱼放射性神经分布的力感知机制与吸盘吸附特性进行创新性设计。

[0004] 为了实现上述目的,本发明采用的技术方案如下:一种具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器,包括:

[0005] 柔性衬底;

[0006] 激光诱导石墨烯敏感元件,若干所述激光诱导石墨烯敏感元件等间距环型分布于所述柔性衬底的上表面;

[0007] 导电弹性体,设置于所述柔性衬底的中心位置,并与若干所述激光诱导石墨烯敏感元件电性连接,用于接收并传导外部压力;

[0008] 吸盘阵列层,贴合设置于所述柔性衬底的下表面,所述吸盘阵列层由微纳柔性吸盘构成,用于通过范德华力增强传感器与接触表面的附着稳定性,抑制测量过程中的相对滑动;

[0009] 导线组件,所述导线组件电性连接于导电弹性体与若干所述激光诱导石墨烯敏感元件之间;

[0010] 柔性封装层,所述柔性封装层覆盖封装所述导电弹性体、激光诱导石墨烯敏感元件以及柔性衬底的搭接区域。

[0011] 进一步地,所述激光诱导石墨烯敏感元件的数量为八个,等间距呈环型分布于柔性衬底的上表面,相邻敏感元件之间的夹角为 45° ,构成空间八向压力检测通道。

[0012] 进一步地,所述导电弹性体、嵌合有激光诱导石墨烯敏感元件的所述柔性衬底以及所述吸盘阵列层自上而下以三明治结构层叠组装;柔性封装层封装后的整体传感器厚度为20mm-25mm。

[0013] 进一步地,所述吸盘阵列层中的每一微纳柔性吸盘的直径为2mm-5mm、高度为1mm-2mm,相邻两微纳柔性吸盘之间的间距与单个微纳柔性吸盘直径的比值为1:1.5。

[0014] 进一步地,所述激光诱导石墨烯敏感元件的长度为17mm-21mm、宽度为0.5mm-1.2mm;

[0015] 若干所述激光诱导石墨烯敏感元件呈放射性均匀分布于所述柔性衬底上表面;相邻两个激光诱导石墨烯敏感元件之间的夹角为 45° ,每个激光诱导石墨烯敏感元件的边缘距离所述柔性衬底边缘为2mm。

[0016] 进一步地,所述导线组件包括与导电弹性体电性连接的主线以及与激光诱导石墨烯敏感元件电性连接的分线;

[0017] 所述主线与导电弹性体上表面之间,以及所述分线与对应所述激光诱导石墨烯敏感元件之间,均通过导电银浆实现电路连接。

[0018] 一种具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器的制备方法,包括以下步骤:

[0019] S1、采用波长为 $10.6\mu\text{m}$ 红外激光器在 $300\mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺薄膜上标刻出八条放射性分布的激光诱导石墨烯敏感条;

[0020] S2、将标刻有激光诱导石墨烯敏感条的薄膜至于直径为50mm、高度为5mm的圆柱模型中,浇筑Ecoflex 00-30预聚体,在 80°C 下固化60min,形成集成激光诱导石墨烯敏感阵列的柔性衬底;

[0021] S3、将多壁碳纳米管掺入Ecoflex预聚体中,制备直径10mm、高5mm的导电弹性体;

[0022] S4、通过激光刻制负型模具,填充Ecoflex预聚体后,采用带半球凸起的对模合压成型,制得吸盘阵列层;

[0023] S5、将导电弹性体至于柔性衬底中心,与激光诱导石墨烯敏感条的近端搭接,使用导电银浆将主线连接至导电弹性体上表面中心,并将八根分线依次连接至各激光诱导石墨

烯敏感条的远端;在关键连接区域涂覆厚度为2mm的Ecoflex封装层,最后贴合吸盘阵列层,形成柔性触觉传感器。

[0024] 进一步地,在S1中,红外激光器的扫描速度为15-22mm/s,频率为80-130KHz,功率百分比为15%-21%;

[0025] 在S3中,多壁碳纳米管质量分数为10%;

[0026] 在S4中,负型模具腔体直径为3mm,深度为1.5mm,间距为4.5mm;半球凸起R=1.5mm。

[0027] 一种集成有传感单元的智能羽毛球,包括:

[0028] 羽毛球球头;

[0029] 柔性触觉传感器,其通过吸盘阵列层稳定附着于羽毛球球头的内壁;

[0030] 数据采集/发射模块,设置于所述羽毛球球头内部,与所述柔性触觉传感器的导线组件连接,用于采集并无线发射所述传感器的电阻变化信号;

[0031] 其中,所述柔性触觉传感器在30m/s的击球速度下,其与球头内壁的相对滑动位移小于0.2mm。

[0032] 一种羽毛球击球方向监测方法,采用智能羽毛球,包括以下步骤:

[0033] 通过球拍击打所述智能羽毛球,冲击力经球头外壳传导至所述柔性触觉传感器的导电弹性体(1);

[0034] 所述导电弹性体(1)将压力矢量分配至周围的激光诱导石墨烯敏感元件(2),导致各敏感元件产生差异化的电阻变化率(ΔR_i);

[0035] 采集各敏感元件的电阻变化信号;

[0036] 基于所述电阻变化信号,利用方向解算模型实时计算出击球力的方向角 θ ;模型

为: $\theta(t) = \arctan \left[\frac{\sum_{i=1}^8 (\Delta R_i(t) \cdot \sin \alpha_i)}{\sum_{i=1}^8 (\Delta R_i(t) \cdot \cos \alpha_i)} \right]$ 其中, α_i 为第*i*条敏感元件的方位角。

[0037] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0038] 1.高精度方向识别:放射性分布的八敏感通道将空间力矢量直接转化为差分电阻信号,通过硬件级解算实现 $\leq 5^\circ$ 的方向识别误差(传统传感器 $\geq 15^\circ$),响应速度达22ms,无需复杂算法补偿,显著提升机器人抓取和假肢操控的指向准确性;仿生环形力传导结构:通过中心弹性体耦合+放射性敏感阵列,将空间力矢量转化为差分电信号,从硬件层面简化方向识别。

[0039] 2.动态接触稳定性跃升:利用范德华力实现非粘性可逆吸附,抑制动态工况下的相对滑动。吸盘层有效抑制击球瞬间传感器与球体/球拍的相对滑动,提升数据可靠性。

[0040] 3.薄型轻量化集成和低成本制造:结合激光直写与转印成型,实现高性能敏感元件的高效、低成本制造,且全柔性Ecoflex/PDMS结构具有生物兼容性,满足可穿戴设备长期佩戴需求。传感器厚度优化至1.5-3mm,重量小于1g,不影响羽毛球飞行特性。

[0041] 4.低成本可批量制造:采用激光直写与转印工艺,适合集成于训练用羽毛球或智能球拍。

附图说明

[0042] 图1是本发明的传感器结构示意图(集成于羽毛球球头);

[0043] 图2是图1传感器的俯视剖面图(展示传感器内部布局);

[0044] 附图标记:1-导电弹性体;2-激光诱导石墨烯敏感元件;3-柔性衬底;4-吸盘阵列层。

具体实施方式

[0045] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0046] 实施例一:

[0047] 如图1-图2所示,本实施例提供一种具备方向识别与稳定接触的柔性触觉传感器,包括:

[0048] 柔性衬底3:作为传感器的结构基体,由Ecoflex 00-30硅胶制成,呈圆形,直径为50 mm,厚度为5 mm。其具有良好的柔韧性和形变恢复能力。

[0049] 激光诱导石墨烯敏感元件2:共八个,作为核心的压阻敏感单元。它们以等间距放射性环状分布形式被嵌入在所述柔性衬底3的上表面。每个敏感条的长度为19 mm,宽度为0.8 mm。相邻敏感条之间的中心夹角为 45° ,且其远端距离柔性衬底边缘为2 mm。此放射性对称布局构成了空间八向压力检测的硬件基础。

[0050] 导电弹性体1:作为中心的力传导与集流单元,它位于柔性衬底3的中心位置,与八个激光诱导石墨烯敏感元件2的近端物理接触并电性连接。该弹性体由掺杂了10%质量分数多壁碳纳米管(MWCNTs)的Ecoflex复合材料制成,直径为10 mm,高度为5 mm。外部压力作用于其上时,会依据力的矢量方向,将压力非均匀地分配至周围的八个敏感元件。

[0051] 吸盘阵列层4:作为稳附功能层,它通过Ecoflex硅胶粘合紧密贴合于柔性衬底3的下表面。该层由微纳柔性吸盘构成,单个吸盘直径3 mm,高度1.5 mm,相邻吸盘中心间距为4.5 mm(间距与直径比为1:1.5)。此设计通过范德华力效应,能有效增强传感器与接触表面(如羽毛球球头内壁)的附着稳定性,抑制在动态冲击下的相对滑动。

[0052] 导线组件:用于信号引出,包括一根与导电弹性体1上表面中心连接的主线,和八根分别与各激光诱导石墨烯敏感元件2远端连接的分线。所有连接点均通过导电银浆实现稳固的电性连接。

[0053] 柔性封装层:由Ecoflex 00-30硅胶构成,以约2 mm的厚度涂覆并固化,完整覆盖了导电弹性体1、所有的导线连接点以及敏感元件与衬底的搭接区域,起到保护、绝缘和增强结构整体性的作用。

[0054] 最终,传感器呈现为一种“三明治”层叠结构,自上而下依次为:柔性封装层5/导电弹性体1与敏感元件2/柔性衬底3/吸盘阵列层4。封装后的整体传感器厚度为 23 ± 1 mm。

[0055] 实施例二:

[0056] 本实施例详细阐述实施例1中所述传感器的制备方法,具体包括以下步骤:

[0057] S1、激光诱导石墨烯(LIG)敏感阵列的制备:

[0058] 采用波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的红外 CO_2 激光器系统。

[0059] 以厚度为 $300 \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺(PI)薄膜作为前驱体材料。

[0060] 设定激光参数为:扫描速度18 mm/s,频率110 kHz,功率百分比18%。

[0061] 在上述参数下,于PI薄膜上精确标刻出八条呈放射性均匀分布的激光诱导石墨烯敏感条。每条敏感条的设计尺寸为长19 mm × 宽0.8 mm,相邻敏感条夹角为45°。

[0062] S2、柔性衬底的集成成型:

[0063] 将步骤S1制得的、带有LIG敏感条的PI薄膜,放置于内腔直径为50 mm、高度为5 mm的圆柱形模具中。

[0064] 将混合均匀并经过真空脱泡的Ecoflex 00-30预聚体浇筑入模具,完全浸没PI薄膜。

[0065] 随后将模具置于80°C的烘箱中固化60分钟。

[0066] 脱模后,即得到已将LIG敏感阵列牢固嵌入其中的柔性衬底3。

[0067] S3、导电弹性体的制备:

[0068] 将质量分数为10%的多壁碳纳米管(MWCNTs)掺入Ecoflex 00-30预聚体中,通过机械搅拌与超声处理使其均匀分散,形成导电复合浆料。

[0069] 将该浆料注入一个直径为10 mm、高度为5 mm的圆柱形模具中。

[0070] 在80°C下固化40分钟,脱模后得到所需的中心导电弹性体1。

[0071] S4、吸盘阵列层的制备:

[0072] 使用高精度激光雕刻机在亚克力板上刻制出负型模具。模具腔体为阵列式微孔,每个微孔直径为3 mm,深度为1.5 mm,孔中心间距为4.5 mm。

[0073] 将Ecoflex预聚体填充到模具腔体中。

[0074] 使用一个带有半球形凸起(半径 $R = 1.5$ mm)的对模进行合模加压,挤出多余预聚体,并在80°C下固化30分钟。

[0075] 脱模后,得到具有规整微纳结构的吸盘阵列层4。

[0076] S5、传感器整体组装与封装:

[0077] 电气连接:将导电弹性体1置于柔性衬底3的中心,使其与各LIG敏感条2的近端良好接触。使用导电银浆,将主线焊接在导电弹性体1上表面中心,并将八根分线分别焊接至各LIG敏感条2的远端。

[0078] 封装保护:在导电弹性体、所有焊点及关键连接区域涂覆一层Ecoflex预聚体作为柔性封装层5,控制厚度约为2 mm,然后进行固化。

[0079] 功能层贴合:最后,将制备好的吸盘阵列层4平整地贴合于柔性衬底3的下表面,完成整个传感器的组装。

[0080] 实施例三:

[0081] 本实施例演示将本发明传感器集成于羽毛球中,用于击球方向监测的具体应用与验证结果。

[0082] 1. 系统集成:

[0083] 将实施例1所制备的传感器,以其吸盘阵列层4朝外的方向,压入一个标准羽毛球(已对球头内部进行适应性处理)的球头内壁。传感器的导线组件连接至一个微型数据采集/发射模块,该模块内置在球头内部,用于采集八个通道的电阻变化信号,并通过蓝牙技术无线传输至外部计算机或移动终端。

[0084] 2. 方向识别原理与模型:

[0085] 当球拍击打羽毛球时,冲击力通过球头外壳传导至中心的导电弹性体1。

[0086] 由于力的矢量特性,导电弹性体1将压力按方向分配至周围的八个LIG敏感元件2,导致各敏感元件产生差异化的电阻变化率(ΔR_i)。

[0087] 通过采集各通道的 ΔR_i 信号,利用以下方向解算模型可直接计算出击球力的方向角 θ : $\theta(t) = \arctan \left[\frac{\sum_{i=1}^8 (\Delta R_i(t) \cdot \sin \alpha_i)}{\sum_{i=1}^8 (\Delta R_i(t) \cdot \cos \alpha_i)} \right]$ 其中, α_i 为第i个敏感元件的方位角(例如,以 0° 起始,按 45° 递增)。

[0088] 3. 性能测试结果:

[0089] 方向识别精度:在实验室条件下,使用发球机以30 m/s的速度从 0° 、 45° 、 90° 、 135° 等典型角度击打集成该传感器的智能羽毛球。测试结果表明,本发明传感器对击球方向角的识别误差均小于 4° 。

[0090] 动态接触稳定性:在相同的击球速度下,由于吸盘阵列层4的范德华力吸附作用,传感器与羽毛球球头内壁之间的相对滑动位移被抑制在0.2 mm以下,显著优于无吸盘层时出现的显著滑动(> 2 mm),确保了信号基线的稳定性和数据的可靠性。同时,在连续击打测试中,由于吸盘层的稳附作用,传感器信号基线稳定,未出现因内部滑动导致的信号漂移。

[0091] 系统响应性:从受到冲击到完成方向角解算输出的全过程,系统响应时间小于25 ms,满足羽毛球高速击球场景下的实时性要求。

[0092] 综上所述,本实施例成功地将具备方向识别与稳定接触能力的柔性触觉传感器集成于羽毛球中,为实现智能羽毛球的高精度击球分析提供了可行的技术方案。尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,对于本领域的技术人员来说,其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

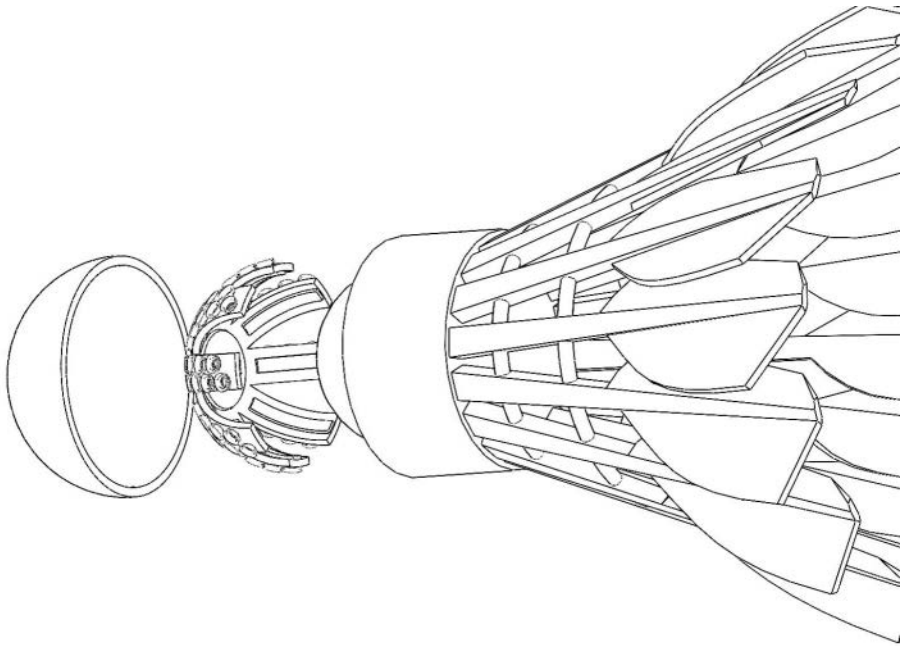


图1

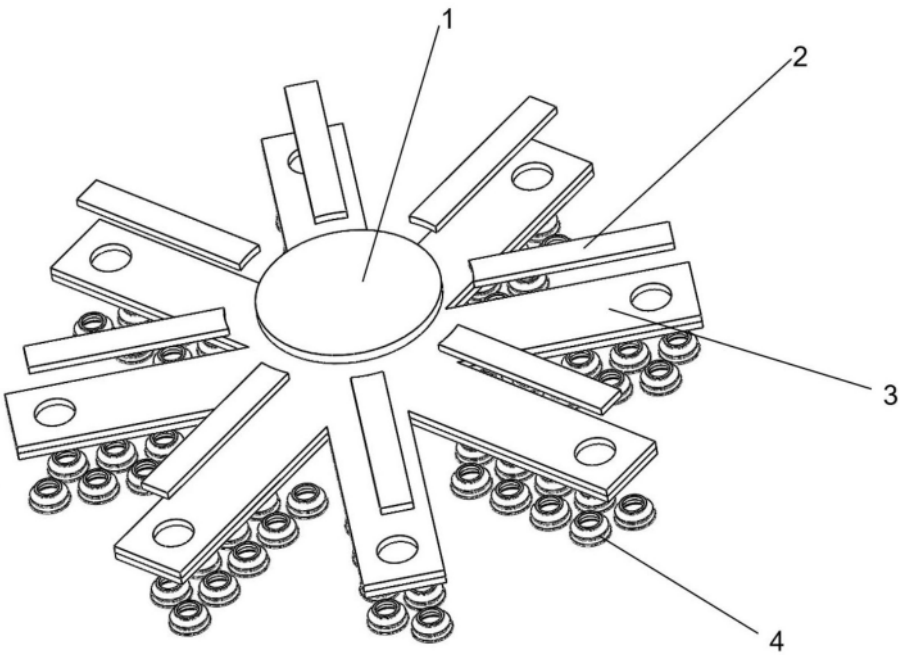


图2