

用于PDMS成型的3D打印技术应用研究进展

周僖¹, 赵宏², 王艺霖¹, 黄文华^{1,2}

1. 南方医科大学基础医学院/人体解剖与组织胚胎学国家重点学科/广东省数字医学与生物力学重点实验室/广东省医学3D打印应用转化工程技术研究中心, 广东 广州 510515; 2. 广东医科大学基础医学院/人体解剖与组织胚胎学教研室, 广东 东莞 523808

【摘要】聚二甲基硅氧烷(PDMS)是一种具有良好的生物相容性和一定光学透明性的弹性材料。随着3D打印技术的发展,PDMS在医学领域中显示出巨大的应用前景。相对于间接3D打印,直接3D打印PDMS在医学领域中受到更广泛的关注。最常用于PDMS成型的直接3D打印技术包括挤出式3D打印技术、嵌入式3D打印技术和光固化3D打印技术。本综述简要介绍了PDMS的特性及其在医学领域中的应用;详细阐述了PDMS成型过程中常用的直接3D打印技术;最后对PDMS未来在医学领域中的应用提出展望。

【关键词】聚二甲基硅氧烷;挤出式3D打印;嵌入式3D打印;光固化3D打印;综述

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)11-1441-05

Advances in applications of 3D printing technology for PDMS molding

ZHOU Xi¹, ZHAO Hong², WANG Yilin¹, HUANG Wenhua^{1,2}

1. Guangdong Engineering Research Center for Translation of Medical 3D Printing Application/Guangdong Provincial Key Laboratory of Digital Medicine and Biomechanics/National Key Discipline of Human Anatomy and Histoembryology/School of Basic Medical Science, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China; 2. Department of Human Anatomy and Histoembryology/School of Basic Medical Science, Guangdong Medical University, Dongguan 523808, China

Abstract: Polydimethylsiloxane (PDMS) is an elastic material with good biocompatibility and certain optical transparency. With the development of 3D printing technology, PDMS has shown great application prospects in the medicine. Compared with indirect 3D printing, direct 3D printing for PDMS molding has received more attention. Extruding 3D printing technology, embedded 3D printing technology and photo-curing 3D printing technology are most commonly-used direct 3D printing technologies for PDMS molding. The review briefly introduces the characteristics of PDMS and its applications in the medicine, elaborates the direct 3D printing technologies commonly used in PDMS molding, and puts forward an outlook about the future applications of PDMS in the medicine.

Keywords: polydimethylsiloxane; extruding 3D printing; embedded 3D printing; photo-curing 3D printing; review

前言

聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)是一种粘度范围广的硅基弹性聚合物,其制造成本低且具有良好的力学特性及生物相容性^[1],因此,PDMS常被用于微流体系统^[2-4]、生物医学设备^[1]、电

子元件^[5-6]等领域。在生物医学应用中,PDMS已被广泛应用于疾病的体外研究、植入物^[7]、伤口敷料^[8]等方面。传统增材制造工艺、铸造工艺无法实现高度复杂的人体结构的精准化制备;此外,传统工艺的工序复杂、使用材料过多、总体效益低下等诸多因素限制了PDMS在医学领域中的应用^[9-10]。

3D打印技术又名增材制造技术,是一种基于计算机数字模型文件,运用固态或液态的可黏合材料逐层堆叠打印来构造3D实体的先进技术,具有个性化定制、能制造精细复杂结构、材料利用率高、制造周期短等优势^[11-12]。3D打印技术逐渐成为医学领域新兴且关键的辅助工具,广泛应用于医疗设备和生物工程,如植入物^[7]、康复支具^[13]、医学教学模型^[10]、新型药物^[14]、传感器^[15-17]、仿生机器人^[18-19]、仿生器

【收稿日期】2023-05-16

【基金项目】国家自然科学基金(32271181, 31972915);广东省基础与应用基础研究基金(2020B1515120001);广东医科大学学科建设项目(G622280009, 4SG22260G)

【作者简介】周僖,硕士研究生,研究方向:医学3D打印, E-mail: zx-joyce7@163.com

【通信作者】黄文华,教授,博士生导师,研究方向:临床应用解剖学、数字医学及3D打印, E-mail: huangwenhua2009@139.com

官^[20]、器官芯片^[21]等。3D打印技术打印方式的多样性有利于不同类型PDMS的成型,为PDMS在生物医学应用的发展开辟了广泛的可能性。本研究将简要介绍PDMS的特性及其在医学领域的应用,阐述PDMS常用的直接3D打印技术,并对其未来应用提出展望。

1 PDMS的特性与应用

PDMS的疏水性、抗菌性、透气性及生物相容性在伤口敷贴^[22]、植入物抗菌涂层^[23]、微流体元件^[3]等应用中有很大的优势。有研究将PDMS和蜡混合使其具有超疏水性,再用矿物油溶解蜡以增加PDMS的孔隙率、透气性,在可穿戴设备、传感器和超疏水涂层等方面发挥更大的优势^[9]。基于PDMS的疏水性,可将其与其他聚合物(如聚氯乙烯醋酸酯)的共混涂层用于制作膜分离应用的高效替代品;该共混涂层具有防冻、防污、调节细胞反应、改善植入物性能等作用,可应用于自清洁手术服、血液相容材料、血液分离和分型的微流体装置以及新型密封封装方法等^[9,24]。但PDMS的疏水性不利于细胞粘附,这限制了PDMS在细胞培养、生物3D打印等领域的应用。通过表面活化、化学涂层、嫁接等方法对PDMS进行改性可以有效且持久地提高PDMS的亲水性^[3,25]。此外,还可以通过修改PDMS的表面特性、孔隙分布、孔径等参数来构建需要的有机硅结构^[25]。多种方法相结合可以更好地进行PDMS改性以解决其疏水性问题^[1]。

PDMS因其惰性和生物相容性被广泛用作植入体。然而,传统工艺制备的硅胶用物常出现硅胶渗漏、细菌接种等并发症,导致植入体包膜挛缩,严重者需要再次手术移除植入体^[23]。Sutthiwanjampa等^[23]使用人类脂肪来源的干细胞以及衣康酸对PDMS进行表面修饰,并通过实验证明人类脂肪来源的干细胞和(或)衣康酸涂层可以增强PDMS的表面生物相容性,以最大限度地减少宿主对异物的反应,从而减少基于PDMS的医疗器械的包膜挛缩。Yoo等^[26]对基于PDMS的硅胶植入体进行双重表面改性,证明具有较大尺寸微图案和多层涂层的PDMS样品能有效地抑制包膜挛缩。

有些PDMS还具有良好的光学透明性,可以作为血脑屏障器官芯片^[27]、人工颅窗^[28]等的理想材料。此外,PDMS的蜡复合材料可以通过改变温度来控制透明度,如PDMS石蜡复合薄膜在室温下保持不透明,随着温度升高而增加透明度^[9]。然而,为了增强PDMS的机械性能,有研究将二氧化硅和炭黑等颗粒填料分散到PDMS聚合物中,代价是可见光散射而导

致透明度的牺牲,因此许多增强型PDMS聚合物往往是半透明或不透明的^[29]。

目前,对PDMS的相关研究已非常深入,PDMS的应用也已在各个方面得到验证,其在医学领域中的应用前景是毋庸置疑的。

2 可用于PDMS成型的3D打印技术

用于PDMS成型的3D打印技术根据成型特点可分为直接3D打印和间接3D打印。间接3D打印是指利用3D打印制造用于成品的模具,不直接打印成品本身,最常见的是3D打印出模具,再用固化液体材料构建成品。另一种间接方法是“牺牲材料法”,即3D打印牺牲结构被其他材料填充、固化后,这些牺牲结构可以被熔化或溶解以获得所需的中空结构或流道^[10]。间接3D打印的优点是技术要求低、成本低,但缺点是工序复杂,手工操作流程多,容易导致时间成本增加和误差。直接3D打印是指使用3D打印机一次性打印出完整的成品,或拆分打印多个部件后再组装成一个成品,其优点是简单精准、工作流程少,但缺点是成本高、技术要求高,受到尺寸、结构、特征和外观等限制^[10]。

3D打印技术正成为医学领域中被广泛接受并应用的制造技术,因为它可以为患者提供个性化且复杂的设计、高效益的制造以及高生产率^[30]。有研究表明与传统铸造工艺制造的PDMS样品相比,直接3D打印的PDMS样品具有更高的机械性能和细胞粘附能力^[31]。用于PDMS成型的直接3D打印技术类型主要有挤出式3D打印、嵌入式3D打印和光固化3D打印等技术。

2.1 挤出式3D打印技术成型PDMS

挤出式3D打印技术是指将半固体材料或热熔材料从喷嘴挤出并逐层铺展到打印平台表面的技术^[14],主要包括直接墨水书写(Direct Ink Writing, DIW)和熔融沉积建模。熔融沉积建模是一种在高工作温度条件下用于热塑性聚合物的3D打印技术,其中聚合物长丝通过加热喷嘴熔化和挤出,然后冷却到低温时凝固^[32]。PDMS作为一种热固性弹性材料,熔融沉积建模这种加热融化成型的方式不适用于PDMS的直接3D打印成型^[33]。

DIW是一种通过机械压力使粘弹性墨水通过喷嘴挤出并选择性地逐层沉积的打印方式^[32]。DIW打印程序简单,材料广泛,因此被大量应用。但是PDMS流变学特性使其在重力影响下容易变形,大大提高打印难度,使其无法形成复杂的高分辨率3D结构。因此,越来越多的研究致力于改良DIW技术或改变PDMS材料的流变学特性,以攻克DIW的

PDMS成型难题。Wang等^[32]将气相二氧化硅、蜡微粒和PDMS混合,通过高工作温度-DIW 3D打印系统,将PDMS-气相二氧化硅-蜡微粒墨水从45℃的加热喷嘴挤出到20℃环境中,然后用矿物油和乙醇对样品进行溶胀收缩和除蜡处理,实现相变、快速、高分辨率的复合PDMS材料的DIW,使具有空间变化功能的软生物启发器件成为可能。在该研究中,蜡相变(固态-液态-固态)使打印墨水具有多种温度敏感的流动特性,实现对墨水流动行为和打印适性的快速控制;此外,蜡还可以赋予PDMS超疏水性^[1]和形状记忆特性。Ozbolat等^[31]将两种PDMS材料(SE 1700和Sylgard 184)以不同的比例混合制备PDMS墨水,研究3D打印PDMS在不同浓度下的机械性能和细胞粘附性能,并3D打印出各种复杂的器官模型;结果表明PDMS的3D打印使制备样品的机械性能比传统铸造样品提高了3倍,3D打印也有助于细胞的粘附。

挤出式3D打印方便快捷,应用广泛,技术要求相对较低,有利于PDMS的推广,尤其是满足非科研人员对3D打印PDMS的需求。未来需要进一步研究如何提高挤出式3D打印PDMS的分辨率、缩减打印和固化时间、改进多材料同时打印等问题。

2.2 嵌入式3D打印技术成型PDMS

PDMS是一种低弹性模量的柔性材料,在打印复杂3D结构时容易导致样品坍塌和保真度不佳^[34]。嵌入式3D打印是一种在支撑浴中完成打印的技术,是传统挤出式3D打印的一种进阶成型方式。嵌入式3D打印允许挤出针头在支撑浴中移动,且支撑浴可以使得挤出成型和固化交联时维持打印结构的位置与形态,这种成型技术可以用于更多低粘度的打印墨水的成型^[35]。嵌入式3D打印技术根据其制备特点可分为完全基质固化嵌入式3D打印和可移动嵌入式3D打印^[36],这两种技术都适用于PDMS材料3D立体制备。

2.2.1 完全基质固化嵌入式3D打印 在完全基质固化嵌入式3D打印中,整个支撑基质被固化,打印墨水由可固化或不可固化的墨水组成^[36]。Wei等^[17]开发一种用硅胶和碳纳米颗粒混合制备的新型热固性打印墨水,通过完全基质固化嵌入式3D打印技术制造出电子皮肤,应用于人类活动监控和个人医疗保健,包括使用应变传感器进行复杂的手势识别和使用压力传感器进行动脉搏动测量等。这些传感器具有优秀的稳定性、可靠性、抗冲击性和耐用性。该技术有望实现智能机器人感应和可穿戴生物医学设备。

2.2.2 可移动嵌入式3D打印 在可移动嵌入式3D打印中,整个支撑浴不固化,而墨水可固化并从支撑浴

中去除,最终得到3D打印结构。可移动嵌入式3D打印种类多样,包括自由形式可逆嵌入、在颗粒凝胶介质中书写、在液体状固体中打印、快速液体打印和流体挤出生物打印等。根据支撑浴的性质,可移动嵌入式3D打印的支撑浴可分为亲水性支撑浴和疏水性支撑浴^[36]。

最初的研究发现PDMS可以物理吸收疏水性生物分子以及疏水性溶剂(如甲苯)导致的聚合物膨胀^[3]。因此,在嵌入式3D打印PDMS材料的初期研究中,用于PDMS成型的疏水性支撑浴较少,而亲水性支撑浴的应用较多。如Hinton等^[34]在亲水性聚羧乙烯凝胶支撑浴内完成PDMS的3D打印,Abdollahi等^[16]在亲水性聚丙烯酸微凝胶支撑浴中打印PDMS。随着对嵌入式3D打印PDMS研究的不断深入,有研究发现在亲水性支撑浴中打印PDMS容易导致支撑浴滞留在打印结构内部、打印丝不连续等问题^[37]。为解决这些问题,学者们进行了深入研究并取得了一定成果。如Greenwood等^[36]研发一种用于嵌入式3D打印的支撑基质,该基质在打印时作为支撑浴,在打印后与墨水混合而内固化,但是不会在打印的墨水周围外固化,解决了打印结构中滞留未固化支撑基质问题。Jin等^[37]提出一种基于气相二氧化硅纳米颗粒的屈服应力悬浮液作为疏水性支撑浴,实现包括PDMS在内的各种疏水性墨水的嵌入式3D打印。

嵌入式3D打印技术在医学领域的应用上有很大的发展前景,能解决PDMS等软材料成型时的坍塌、保真度不高等问题。然而,还有许多技术难题亟待解决:如何解决硅油导致混合粘度和固化材料刚度降低的问题;如何提高支撑基质的透明度和分辨率以便监测打印过程;确定可以在支撑基质内打印的全系列有机硅材料和粘度。

2.3 光固化3D打印技术成型PDMS

光固化3D打印是最早的3D打印技术,其原理是液态光敏材料在光照下通过自由基或阳离子的光聚合作用而固化^[38],这是它与其他3D打印技术的最大区别。

根据打印方式和控制系统的不同,光固化3D打印技术可分为立体光刻(Stereo Lithography Appearance, SLA)、数字光处理、液晶显示、3D喷墨打印、连续液体界面制造、双光子3D打印和全息3D打印技术等。光固化3D打印技术具有打印速度快、精度高、打印物体表面光滑等特点。目前,光固化3D打印技术和材料多用于临时替代材料领域,如牙齿修复体、牙齿正畸、牙科手术、模型、模具等,但光固化3D打印具有成本高、光固化有机硅材料选择有限、

光引发剂的生物毒性等局限性^[39]。

PDMS本身不具备光敏感性,所以PDMS作为光固化打印墨水时,需要添加光引发剂或化学基团,使其发生物理改性或者化学改性而具备光敏感性^[40]。部分光引发剂(如氧化膦基光引发剂)会从样品中浸出而毒害PDMS催化剂,进而抑制PDMS固化,需要通过紫外线或加热处理,使光引发剂被消除并重新组合,避免固化抑制作用^[32]。近年来,研究者一直致力于克服光固化3D打印PDMS的难点,以推进光固化直接打印PDMS的进展^[39,41-42]。

2.3.1 SLA SLA是第一个3D打印技术,也是最常用的光固化3D打印技术,在再生医学组织支架的制造方面十分有前景^[42-43]。Palaganas等^[40]将不同体积比重的硅氧烷低聚物、甲基丙烯酸酯基树脂和适量的光引发剂等制备成光敏性硅氧烷复合材料,在波长405 nm的紫外光下通过SLA打印成足球状样品,证明将硅氧烷低聚物添加到甲基丙烯酸酯基树脂中可调整SLA打印物体的物理、热、机械和表面特性,而不会对标准配方的可打印性产生不利影响。Xiang等^[38]将乙烯基封端的聚硅氧烷、硫醇官能化的聚硅氧烷及适当的光引发剂通过硫醇-烯光反应的交联制备成紫外光固化有机硅弹性体并用SLA成功打印,证明该PDMS混合物具有良好的生物相容性和一定的抑菌性,是生物医学应用中的一种很有前途的材料,如伤口敷料或通过3D打印定制的软组织支架。Yu等^[44]研发一种具有硫醇和二硫键基团、可自修复的PDMS混合物,通过SLA打印出鞋垫和杯子等3D结构。该研究将鞋垫切成两部分,经过拼接、加热的修复过程,鞋垫恢复原样并且可以再次承受拉伸载荷,韧性约为原始复合材料的90%。Rodriguez等^[45]开发一系列由气相二氧化硅和PDMS组合的紫外光固化硫醇烯有机硅材料以及专用的SLA打印机,打印出陀螺仪和八位桁架格子。所得的有机硅弹性体被证明具有可调机械性能,极限拉伸强度和伸长率均有提升。

2.3.2 其他 除SLA外,其他的光固化3D打印技术也可以应用在PDMS的3D打印中。Unkovskiy等^[7]通过双喷头光固化3D打印出临时鼻假体,应用于鼻缺损患者的早期康复。双喷头分别打印不同的材料:一个喷头挤出光固化硅胶材料,该材料在紫外光下发生光聚合反应而固化;另一个喷头挤出亲水性支撑材料。打印结束后,用乙醇溶解支撑材料,将样品置于200℃环境下完全固化。在3D打印过程中,如果低粘度、低流体屈服应力的光固化有机硅胶不在原位和高紫外线强度下固化可能会导致明显的坍塌^[46]。因此,大多数光固化3D打印技术需要支撑浴

或支撑物。

总之,光固化3D打印PDMS的未来在于两方面:开发新材料以及改进打印技术^[42]。深入研究光聚合机制、开发新的光敏材料、消除或降低光引发剂的生物毒性、进行光固化4D打印的数学建模等问题需要进一步的研究。

3 结语

PDMS成型常用的直接3D打印技术包括挤出式3D打印技术、嵌入式3D打印技术和光固化3D打印技术。虽然当前直接3D打印PDMS在医学领域中的应用有很多创新,但是仍然需要继续改进,如PDMS材料的改性、直接3D打印技术的改进、嵌入式3D打印支撑浴的改良等。在未来的研究中,直接3D打印技术能在PDMS成型方面取得新突破,为医学应用提供一种更加经济、高效、快速的替代方案。

【参考文献】

- [1] Miranda I, Souza A, Sousa P, et al. Properties and applications of PDMS for biomedical engineering: a review[J]. J Funct Biomater, 2021, 13(1): 2.
- [2] Crevillen AG, Mayorga-Martinez CC, Vaghasiya JV, et al. 3D-printed SARS-CoV-2 RNA genosensing microfluidic system[J]. Adv Mater Technol, 2022, 7(6): 2101121.
- [3] Shakeri A, Khan S, Didar TF. Conventional and emerging strategies for the fabrication and functionalization of PDMS-based microfluidic devices[J]. Lab Chip, 2021, 21(16): 3053-3075.
- [4] Mea HJ, Delgadillo L, Wan JD. On-demand modulation of 3D-printed elastomers using programmable droplet inclusions[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2020, 117(26): 14790-14797.
- [5] Xu K, Li D, Shang E, et al. A heating-assisted direct ink writing method for preparation of PDMS cellular structure with high manufacturing fidelity[J]. Polymers (Basel), 2022, 14(7): 1323.
- [6] Liu S, Kim SY, Henry KE, et al. Printed and laser-activated liquid metal-elastomer conductors enabled by ethanol/PDMS/liquid metal double emulsions[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13(24): 28729-28736.
- [7] Unkovskiy A, Spintzyk S, Brom J, et al. Direct 3D printing of silicone facial prostheses: a preliminary experience in digital workflow[J]. J Prosthet Dent, 2018, 120(2): 303-308.
- [8] Liu J, Ye LJ, Sun YL, et al. Elastic superhydrophobic and photocatalytic active films used as blood repellent dressing[J]. Adv Mater, 2020, 32(11): e1908008.
- [9] Ariati R, Sales F, Souza A, et al. Polydimethylsiloxane composites characterization and its applications: a review[J]. Polymers (Basel), 2021, 13(23): 4258.
- [10] Jin Z, Li Y, Yu K, et al. 3D printing of physical organ models: recent developments and challenges[J]. Adv Sci (Weinh), 2021, 8(17): e2101394.
- [11] 姜涛,程筱胜,崔海华,等. 3D打印相关技术的发展现状[J]. 机床与液压, 2018, 46(3): 8.
Jiang T, Cheng XS, Cui HH, et al. Development status of 3D printing technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(3): 8.
- [12] 殷俊飞扬,钟静,陈莉智,等. 3D打印技术在颌面整形外科的应用进展[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(12): 4.
Yin JF, Zhong J, Chen LZ, et al. Application progress of 3D printing technology in maxillofacial plastic surgery[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(12): 4.
- [13] 詹佳楠,杨洋,黄文华. 3D打印技术在康复支具制作的应用研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2022, 39(10): 1310-1312.
Zhan JN, Yang Y, Huang WH. Advances in 3D printing technology for rehabilitation brace manufacturing[J]. Chinese Journal of Medical

- Physics, 2022, 39(10): 1310-1312.
- [14] Jamroz W, Szafraniec J, Kurek M, et al. 3D printing in pharmaceutical and medical applications - recent achievements and challenges[J]. Pharm Res, 2018, 35(9): 176.
- [15] Sayegh MA, Daraghma H, Mekid S, et al. Review of recent bio-inspired design and manufacturing of whisker tactile sensors[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(7):2705.
- [16] Abdollahi S, Markvicka EJ, Majidi C, et al. 3D printing silicone elastomer for patient-specific wearable pulse oximeter[J]. Adv Healthc Mater, 2020, 9(15): e1901735.
- [17] Wei PQ, Yang X, Cao ZM, et al. Flexible and stretchable electronic skin with high durability and shock resistance via embedded 3D printing technology for human activity monitoring and personal healthcare[J]. Adv Mater Technol-Us, 2019, 4(9):1900315.
- [18] 张伟, 马恺骐, 金国庆. 面向软体机器人的嵌入式3D打印聚二甲基硅氧烷材料实验研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(19): 10.
- Zhang W, Ma KQ, Jin GQ. Experimental study of embedded 3D printing PDMS materials for soft robot[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(19): 10.
- [19] 陈尤旭, 王德山, 张伟, 等. 面向软体机器人的3D打印硅胶软材料实验研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(5): 603-609.
- Chen YX, Wang DS, Zhang W, et al. Experimental study on 3D printing silicone soft materials for soft robots[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(5): 603-609.
- [20] 黄文华. 生物3D打印在器官再造中的前沿热点和研究进展[J]. 器官移植, 2022, 13(2): 8.
- Huang WH. Frontier hotspots and research progress on 3D bioprinting in organ reconstruction[J]. Organ Transplantation, 2022, 13(2): 8.
- [21] 张忆恒, 杜静, 夏安越, 等. 基于3D打印技术的微芯片用于模拟肠绒毛和肿瘤表面形貌[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2019, 39(10): 7.
- Zhang YH, Du J, Xia AY, et al. Microchips based on 3D printing technology for simulating intestinal villi and tumor surface morphology[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Medical Sciences), 2019, 39(10): 7.
- [22] Qian W, Hu X, He W, et al. Polydimethylsiloxane incorporated with reduced graphene oxide (rGO) sheets for wound dressing application: preparation and characterization[J]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2018, 166: 61-71.
- [23] Sutthiwanjampa C, Shin BH, Ryu NE, et al. Assessment of human adipose-derived stem cell on surface-modified silicone implant to reduce capsular contracture formation[J]. Bioeng Transl Med, 2022, 7(1): e10260.
- [24] Celik N, Sahin F, Ruzi M, et al. Blood repellent superhydrophobic surfaces constructed from nanoparticle-free and biocompatible materials[J]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2021, 205: 111864.
- [25] Razavi M, Primavera R, Vykunta A, et al. Silicone-based bioscaffolds for cellular therapies[J]. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl, 2021, 119: 111615.
- [26] Yoo BY, Kim BH, Lee JS, et al. Dual surface modification of PDMS-based silicone implants to suppress capsular contracture[J]. Acta Biomater, 2018, 76: 56-70.
- [27] Zakharova M, Palma Do Carmo MA, Van Der Helm MW, et al. Multiplexed blood-brain barrier organ-on-chip[J]. Lab Chip, 2020, 20(17): 3132-3143.
- [28] Yang N, Liu F, Zhang X, et al. A hybrid titanium-softmaterial, high-strength, transparent cranial window for transcranial injection and neuroimaging[J]. Biosensors (Basel), 2022, 12(2): 129.
- [29] Silvaroli AJ, Heyl TR, Qiang Z, et al. Tough, transparent, photocurable hybrid elastomers[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(39): 44125-44136.
- [30] Liaw CY, Guvendiren M. Current and emerging applications of 3D printing in medicine[J]. Biofabrication, 2017, 9(2): 024102.
- [31] Ozbolat V, Dey M, Ayan B, et al. 3D Printing of PDMS improves its mechanical and cell adhesion properties[J]. ACS Biomater Sci Eng, 2018, 4(2): 682-693.
- [32] Wang Y, Willenbacher N. Phase-change-enabled, rapid, high-resolution direct ink writing of soft silicone[J]. Adv Mater, 2022, 34(15): e2109240.
- [33] Montazerian H, Mohamed MG, Montazeri MM, et al. Permeability and mechanical properties of gradient porous PDMS scaffolds fabricated by 3D-printed sacrificial templates designed with minimal surfaces[J]. Acta Biomater, 2019, 96: 149-160.
- [34] Hinton TJ, Hudson A, Pusch K, et al. 3D printing PDMS elastomer in a hydrophilic support bath *via* freeform reversible embedding[J]. ACS Biomater Sci Eng, 2016, 2(10): 1781-1786.
- [35] Daniel J Shiowski AR, Tashman JW, Feinberg AW. Emergence of FRESH 3D printing as a platform for advanced tissue biofabrication[J]. APL Bioeng, 2021, 5(1): 010904.
- [36] Greenwood TE, Hatch SE, Colton MB, et al. 3D printing low-stiffness silicone within a curable support matrix[J]. Addit Manuf, 2021, 37: 101681.
- [37] Jin YF, Song KD, Gellermann N, et al. Printing of hydrophobic materials in fumed silica nanoparticle suspension[J]. ACS Appl Mater Inter, 2019, 11(32): 29207-29217.
- [38] Xiang HP, Wang XW, Ou ZR, et al. UV-curable, 3D printable and biocompatible silicone elastomers[J]. Prog Org Coat, 2019, 137: 105372.
- [39] Quan H, Zhang T, Xu H, et al. Photo-curing 3D printing technique and its challenges[J]. Bioact Mater, 2020, 5(1): 110-115.
- [40] Palaganas J, De Leon A, Mangadlao J, et al. Facile preparation of photocurable siloxane composite for 3D printing[J]. Macromol Mater Eng, 2017, 302(5): 1600477.
- [41] Xu X, Awad A, Robles-Martinez P, et al. Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications[J]. J Control Release, 2021, 329: 743-757.
- [42] Pagac M, Hajnys J, Ma QP, et al. A review of vat photopolymerization technology: materials, applications, challenges, and future trends of 3D printing[J]. Polymers (Basel), 2021, 13(4): 598.
- [43] Chartrain NA, Williams CB, Whittington AR. A review on fabricating tissue scaffolds using vat photopolymerization[J]. Acta Biomater, 2018, 74: 90-111.
- [44] Yu KH, Xin A, Du HX, et al. Additive manufacturing of self-healing elastomers[J]. Npg Asia Mater, 2019, 11(1): 7.
- [45] Rodriguez N, Ruelas S, Forien JB, et al. 3D printing of high viscosity reinforced silicone elastomers[J]. Polymers (Basel), 2021, 13(14): 2239.
- [46] Porter DA, Davis N, Krueger PS, et al. Additive manufacturing by material extrusion with medical grade silicone elastomers and IR laser curing[J]. Rapid Prototyping J, 2020, 26(1): 145-155.

(编辑:谭斯允)

良性阵发性位置性眩晕的辅助诊断

刘雪冰^{1,2}, 高永彬^{1,2}

1. 上海工程技术大学电子电气工程学院, 上海 201600; 2. 上海工程技术大学 智慧医疗研究所, 上海 201600

【摘要】目的:设计一种利用视觉虹膜识别概念和神经网络来诊断良性阵发性位置性眩晕(BPPV)的方法,从而辅助医生进行诊断。**方法:**通过计算机视觉二值化和阈值化技术从BPPV患者眼球运动视频中定位瞳孔和虹膜,捕获眼球运动轨迹。在眼球运动过程中使用虹膜模板匹配方法提取瞳孔和眼球运动的特征信息。将获得的眼动数据输入设计的神经网络进行BPPV诊断。**结果:**通过计算机视觉技术的实时检测和网络学习特征的能力,能有效捕捉并描述眼球运转轨迹,输出当前眼动轨迹信息,辅助医生做出更准确、更迅速的决策。**结论:**使用这种相对简单、无创且精确的方法来测量扭转眼球运动解决了长期存在的阻碍视觉和眼球运动的问题,能广泛应用于基础和临床研究或诊断测试。

【关键词】良性阵发性位置性眩晕;二值化;阈值化;模板匹配

【中图分类号】R318;R741

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)11-1446-07

Auxiliary diagnosis of benign paroxysmal positional vertigo

LIU Xuebing^{1,2}, GAO Yongbin^{1,2}

1. School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China; 2. Smart Medical Research Institute, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China

Abstract: Objective To diagnose benign paroxysmal positional vertigo (BPPV) using visual iris recognition concept and neural network for assisting doctors in diagnosis. **Methods** The pupil and iris were located from the eye movement video of BPPV patients using computer vision binarization and thresholding techniques to capture the eye movement trajectory. During eye movement, iris template matching method was used to extract the feature information of the pupil and eye movement. The obtained data was input into the designed neural network for BPPV diagnosis. **Results** Through the real-time detection of computer vision technology and the feature learning of network, the proposed method effectively captured and described the eye movement trajectory, and output the eye movement trajectory, thereby assisting doctors in more accurate and faster decision-making. **Conclusion** Using the proposed method which is relatively simple, non-invasive and accurate to measure torsional eye movements solves the long-standing problems that hinder vision and eye movement, and it can be widely used in basic and clinical researches or diagnostic testing.

Keywords: benign paroxysmal positional vertigo; binaryzation; thresholding; template matching

前言

对于眼球运动控制的全面描述和理解需要大脑获取和处理有关眼位置、视线方向、周围环境等信息。临床上,眼球运动被用作眼部生物标记物,能诊断或监测许多常见疾病的病程或治疗效果,如医生

通过平滑追踪和扫视眼球运动来判断创伤性脑损伤和帕金森氏症等退行性神经系统疾病^[1],通过眼球运动的改变来判断内耳和前庭系统的疾病^[2-3],此外,根据一些眼球的异常运动能判断一些常见的眼部疾病,包括斜视和弱视^[4]。

本研究设计一套辅助诊断系统,通过捕获和描述患者眼球运动特征,依据眼球运动来诊断良性阵发性位置性眩晕(Benign Paroxysmal Positional Vertigo, BPPV)。借用人工智能技术进行辅助诊断能提高诊断速度和准确度,快速识别患者潜在状况并进行适当的治疗,同时提高医疗资源的利用率。本研究设计的系统是一种非侵入性程序,这使它成为一种安全方便的诊断工具。另外,智能诊断能弥补

【收稿日期】2023-07-06

【基金项目】上海市科委科技创新行动计划社会发展科技攻关项目(21DZ1204900)

【作者简介】刘雪冰,硕士研究生,研究方向:计算机视觉、医学图像处理, E-mail: L983412889@gmail.com

【通信作者】高永彬,博士,副教授,研究方向:计算机视觉、医学图像处理、深度学习, E-mail: gaoyongbin@sues.edu.cn