arXiv:2305.01076v1 [cs.RO] 1 May 2023

具有主动视觉能力的仿生腱驱动3D打印机器人眼设计与评估

Hamid Osooli[1], Mohsen Irani Rahaghi[2] 和 S. Reza Ahmadzadeh[1]

摘要—近年来，机器人学领域取得了显著进展，尤其是在开发人形机器人方面。机器人眼的设计是一个尚未得到充分探索的研究方向。本文提出了一种用于机器人眼的计算机辅助三维设计方案，该方案兼具逼真的外观、自然的运动和高效的执行性能。所提出的设计采用腱驱动执行机构，可实现大范围的运动能力。执行过程中采用数量最少的伺服电机，每个主动肌-拮抗肌对各使用一个伺服电机，使所提出的设计具有很高的效率。与同类现有设计相比，我们设计的机器人眼具备美观且逼真的特征。我们使用基于视觉的控制器评估了该机器人的性能，结果表明，所提出的设计能够实现自然运动和高效执行。我们已将实验代码、工具箱以及该设计的可打印3D模型草图开源。

I. 引言

尽管机器人技术不断进步，如何复制人眼的功能和运动，近年来仍一直是活跃的研究课题。为了更好地了解人眼的力学特性和功能，一些研究致力于开发能够模仿人眼运动和能力的机器人 [1], [2], [3]。

以往设计类似人眼的机构时，研究人员采用了多种机械模型，例如Ruete机械模型，也称为眼肌运动模型 [4], [5]。 [4] 中的眼肌运动模型包含两个木制眼球，每个眼球都连接着六根聚丙烯马森弦，用来模拟眼外肌。

近几十年来，研究人员利用超螺旋聚合物 [1]，折叠式介电弹性体执行器 [6]和气动人工肌肉 [7]等先进材料设计了机器人眼。使用先进材料的缺点是，系统需要额外的组件来测量材料特性，从而增加了整个系统的复杂性。例如，测量流经超螺旋聚合物肌肉的电流需要额外的树莓派 [1]。另一个例子是，通过嵌入式三轴微机电加速度计测量气动人工肌肉的方向 [7]。另一方面，过于简化的机器人眼缺乏美感和外观表现 [8], [9]。

[1]马萨诸塞大学洛厄尔分校持续自主与机器人学习（PeARL）实验室，美国马萨诸塞州洛厄尔市 01854 {hamid osooli, reza ahmadzadeh}@uml.edu[2]卡尚大学机械工程系，伊朗伊斯法罕省卡尚市 irani@kashanu.ac.ir

高效的驱动和自然的运动是有效仿人机器人眼的主要特征。实现机器人仿人运动的一种方法是使用腱驱动机构进行机器人驱动。腱驱动机器人以钢丝（腱）作为类肌肉元件，与传统的刚性系统相比，具有更大的运动自由度 [10]。研究人员已经探索了腱驱动系统在各种机器人应用中的使用 [11], [12], [13]。然而，将腱驱动系统应用于模仿人眼机制的机器人设计方面，相关研究仍然有限。现有使用腱驱动机构的研究，其缺点是在设计中采用了冗余执行器 [1], [14]。

本文提出了一种仿生机器人眼设计，仅使用最少数量的执行器即可实现自然的仿人运动。我们的系统能够复现人眼运动，同时也将执行器数量控制在最低限度。我们为机器人配备了基于视觉的控制器，并评估其在人眼的四种主要运动中的表现：扫视、平滑追踪、辐辏和前庭眼反射（VOR）。

我们进行了八项实验（每种运动各两项），以展示所提出机器人的能力。结果表明，该机器人能够通过检测并追踪人脸，同时将其保持在画面中央，来模仿人眼运动的全部四类运动。所提出机器人眼的实验代码、工具箱和可打印3D模型草图均已开源。

II. 背景

A. 人眼

人眼是一个近似球形的器官，由两个主要部分组成：角膜和巩膜。角膜是眼球前部较为弯曲的部分，包括眼睛中央的黑色区域（瞳孔）及其周围的有色环（虹膜）。巩膜是眼球的白色部分，包含接收视觉信息所需的结构。为了看清图像，图像必须聚焦在一个称为中央凹的小区域内，该区域位于巩膜中。因此，眼球必须运动，使图像聚焦于中央凹 [15]。

六块眼外肌负责使每只眼球在颅骨的骨性眼眶内转动。这些肌肉由四块直肌（上直肌、下直肌、内直肌和外直肌）以及两块斜肌（上斜肌和下斜肌）组成。直肌附着于眼球上与光轴相距 55 度的位置 [16]，，负责使眼球转动。

使眼球在水平方向和垂直方向上运动。斜肌穿过一个称为滑车的结构，并使眼球绕视轴旋转。眼球运动时，这些肌肉成对以主动肌-拮抗肌的方式协同作用；例如，内直肌收缩而外直肌放松，使眼球转向鼻侧。

B. 眼球运动

眼球运动有多种作用。其中一个主要作用是在视野中注视目标。另一作用是防止对静态场景产生视觉适应，因为这可能导致一种称为神经衰退的现象 [17]。微扫视是一种细微且不自主的眼球运动，可以刷新视觉输入，从而防止这种现象 [18]。睡眠期间也会持续发生眼球运动，尤其是在快速眼动睡眠期间 [19]。

眼球运动主要分为四类：扫视、平滑追踪、辐辏和前庭眼反射（VOR）。扫视是快速、急促的眼球运动，使注视方向转向新的目标，例如追踪空中飞行的昆虫。平滑追踪运动是受控的眼球运动，用于平稳地追踪运动目标，例如阅读一行文字时。辐辏运动指双眼同时向相反方向移动、彼此靠拢，这种情况会在物体近距离出现时发生。前庭眼反射（VOR）是一种眼动反射，可通过使眼球朝头部运动的相反方向移动来补偿头部运动。它依赖于前庭系统，前庭系统负责检测头部运动。

III. 仿生设计

本文通过设计并构建人眼的精确机械模型，致力于开发一种机器人眼。所开发的机器人眼可用于多种机器人学和视觉应用，例如立体相机、人形机器人和主动视觉。为实现这一目标，我们采用计算机辅助设计 (CAD) 来构建机器人眼。使用 CAD 的优势在于，我们能够用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS) 耗材 3D打印机械结构草图。本节详细介绍了所提出的机器人眼各组件的设计考量，包括角膜、虹膜和晶状体。我们还说明了如何验证模型的准确性，以及如何将其用于未来的研究。

A. 眼球

机械眼球由一个腔室构成，如图 1 所示，用于容纳一台单视角 USB摄像头。我们选择了 Microsoft LifeCam HD-3000 网络摄像头，因为它价格低廉且易于获取，是一种有助于降低机器人总体成本的感知传感器。

为实现这一目标，我们设计了一个直径为60毫米、能够容纳USB摄像头的眼球。这一尺寸是典型成年人人眼眼球的两倍多，

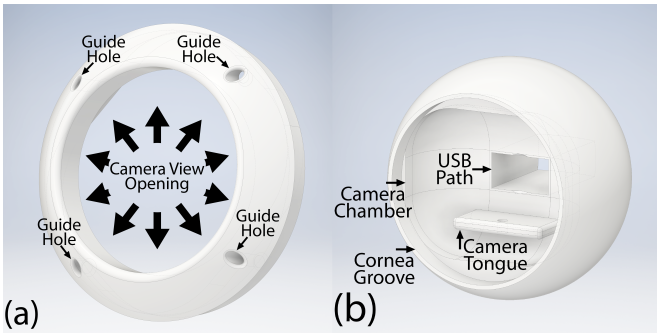

图 1. 设计的角膜 (a) 和巩膜 (b)。a 展示了摄像头视野开口和导向孔，b 则设有摄像头腔室、一体式凹槽和线缆出口

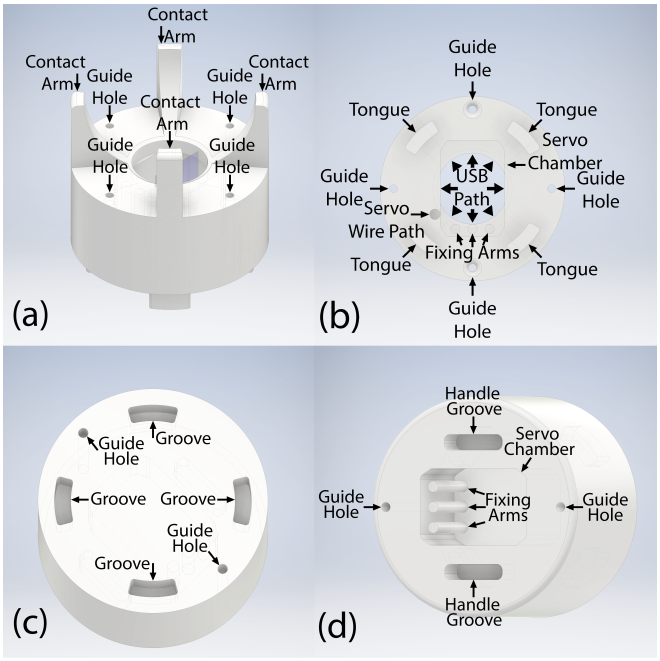

图 2. 所提出的机器人眼眼眶组件，包括前部 (a)-(b) 和后部 (c)-(d)

其直径范围为21毫米至27毫米 [20]。首先，我们设计了巩膜，它作为机器人眼最外层的结构，并用于容纳摄像头。如图1所示，巩膜设有用于固定摄像头的一体式凹槽，以及用于穿过USB线缆的USB通道。

接下来，我们为眼球主体添加角膜。角膜与巩膜的连接处相对于光轴呈 55 度角，使肌腱驱动的拉索能够以类似人眼的方式带动眼球运动 [16]。角膜上设有一个开口，其半径尽可能大，同时不会遮挡摄像头视野；角膜上的四个导向孔则有助于将拉索拉紧并固定在眼球上。零件详情如图 1 所示。

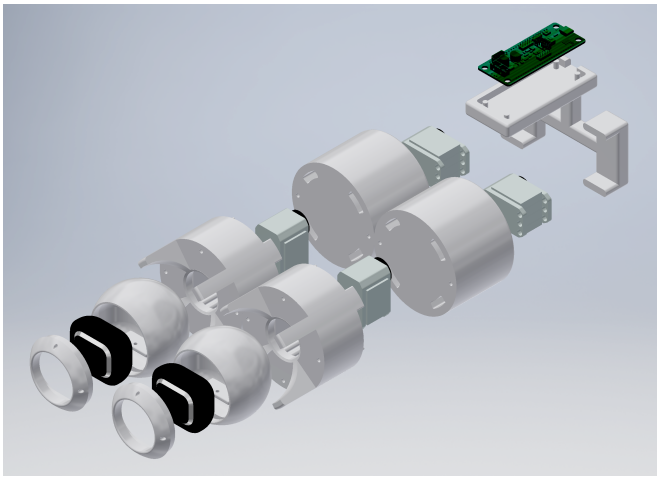

图3. 所提出的机器人眼爆炸图，包括3D打印机身、两个 Microsoft HD-3000 摄像头、四个 Dynamixel XL-320 舵机，以及 OpenCM 9.04-C 控制板。

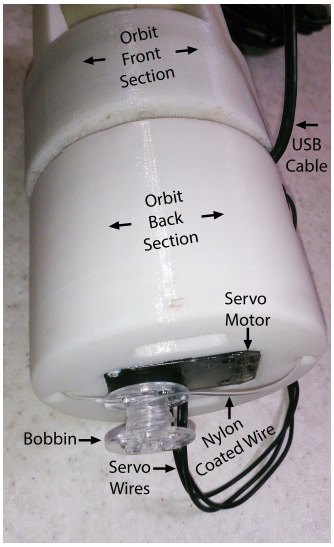

图 4. 安装在机器人眼眼眶后部的舵机电机，以及置于舵机电机上方、带有尼龙涂层导线的编织线轴

B. 眼眶

我们机器人眼的另一个关键组件是眼眶。在人眼中，眼眶是容纳眼球和眼外肌的颅腔。由于我们设计的只是眼睛的机械模型，而非完整的头部，因此提出了双段式眼眶设计，以分隔容纳伺服电机的腔室。零件详情如图 2 所示。

如图2(b)和图2(d)所示，眼眶的每个部分都装有一个伺服电机，通过拉索驱动机器人眼运动，其作用类似于人眼中的直肌。拉索负责水平方向和垂直方向的运动。我们为每对眼外肌的主动肌-拮抗肌配置了一个执行器。

眼眶前部（图2(a)和图2(b)）设有四个接触臂，彼此间隔75度。眼球表面的设计方法和抛光工艺降低了眼球与眼眶之间的摩擦。前部还设有摄像头 USB 线缆通道，以及四个穿过拉索的导向孔。该部分后方的伺服电机舱容纳垂直执行器，并通过三个固定臂将其固定。前部通过榫槽接头与眼眶后部连接。

如图 2(c) 和图 2(d) 所示，眼眶后部装有一个水平执行器，并通过榫槽接头与手柄相连（详情见下一节）。这样，用户便能轻松握持并控制机器人。

C. 手柄

如图 3 所示，机器人眼的最后一个组件是手柄，它具有多种功能。其主要功能是将双眼固定在相距 7 cm 的位置，这与人眼的间距相近，约为 6.3 cm [21]。考虑这一间距有助于构建更逼真的人眼机械模型



图 5. 完成最终组装后的机器人眼。最终设计结构紧凑、价格实惠，便于复制和修改

，并且在将机器人用于立体视觉时也很实用。

手柄设计得紧凑且易于握持，内部设有一个容纳控制板的腔室，控制板与个人电脑和伺服电机交互。手柄通过榫槽接头与机器人相连，确保连接牢固稳定。

IV. 实验与结果

本节介绍为评估我们提出的机器人眼在环境变化时的性能而开展的实验，这种能力也称为主动视觉 [8]。

我们在 MATLAB 环境中使用人脸跟踪器测试设计性能，从而分别评估不同的眼球运动。在所有实验中，一名人类受试者位于机器人前方，机器人的摄像头采集了场景的视频流。MATLAB 环境中的人脸跟踪算法会分析

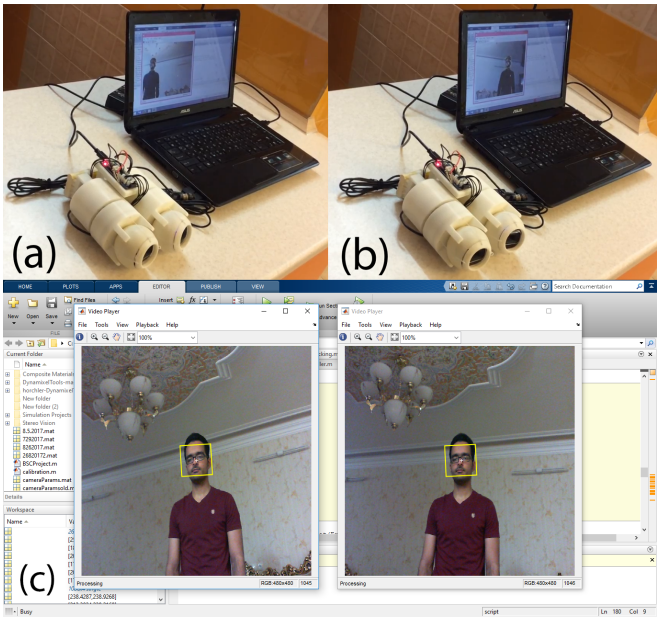

图6. 所提出的机器人眼在跟踪受试者人脸时的状态。该图包含三个子图，(c)展示人脸检测，(a)–(b)展示人脸跟随，并突出显示了人脸中心

视频流，以确定受试者人脸的位置。如图 6 所示，控制器使用的数据点包括检测到的人脸边界框的中心点。

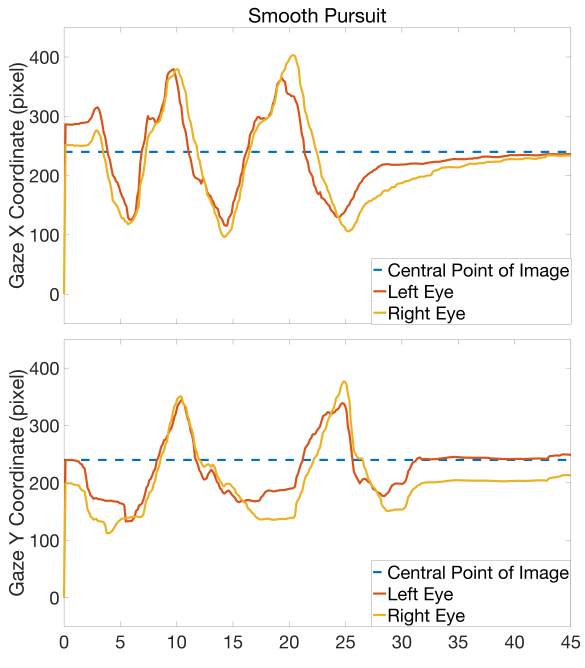

图8. 平滑追踪评估结果。图中显示了机器人左右摄像机捕捉到的人脸中心点的X和Y坐标。

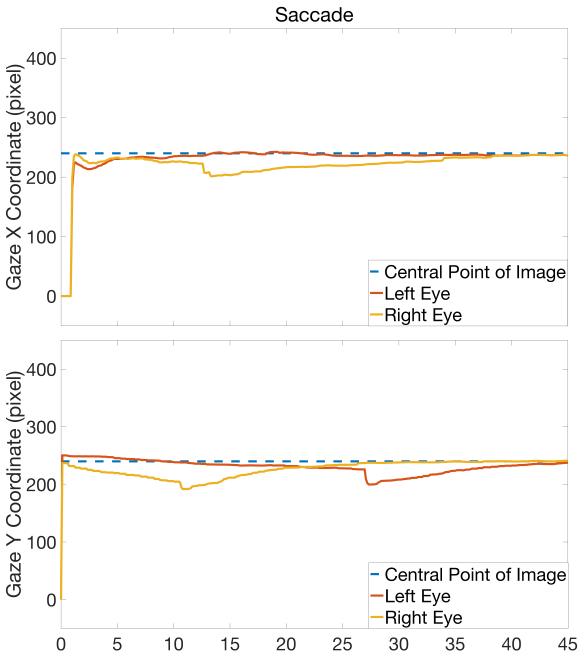

图7. 扫视评估结果。图中显示了机器人左右摄像机捕捉到的人脸中心点的X和Y坐标。

A. 机器人眼的组装

这里介绍所提出的机器人眼的构建和组装过程。眼球和眼眶的设计使其可用于左右眼。随后，我们3D打印两套眼球、眼球盖、眼眶前部和后部组件。组装顺序如图3所示，伺服电机上的导线和线轴的安装位置如图4所示。

该机器人使用四个 Dynamixel XL-320伺服电机作为执行器，驱动两个摄像头运动。每个伺服电机安装到眼眶内指定的腔室后，应在其顶部放置一个线轴，并将导线缠绕在线轴周围。两只眼睛组装完成后，使用手柄将其集成到系统中。

机器人的伺服电机连接到 OpenCM 9.04-C 控制板，该控制板通过 MATLAB 接收计算机发出的指令。我们专门为机器人眼的执行器制作了 MATLAB工具箱 XL-320，用于在 MATLAB 中生成和模拟运动。该工具箱、实验所用代码以及所提出机器人眼的可打印3D模型草图均已开源并公开提供 [1]。

为了同时支持四个伺服电机，控制板需要额外的电源。因此，我们通过 USB端口 添加了一块 7.2伏电池，以补充电压。图 5 显示了组装完成的机器人。

为了获取来自环境的反馈，我们使用了基于视觉的比例积分微分（PID）控-

[1]代码和草图见：https://github.com/hamidosooli/ robotic_eye

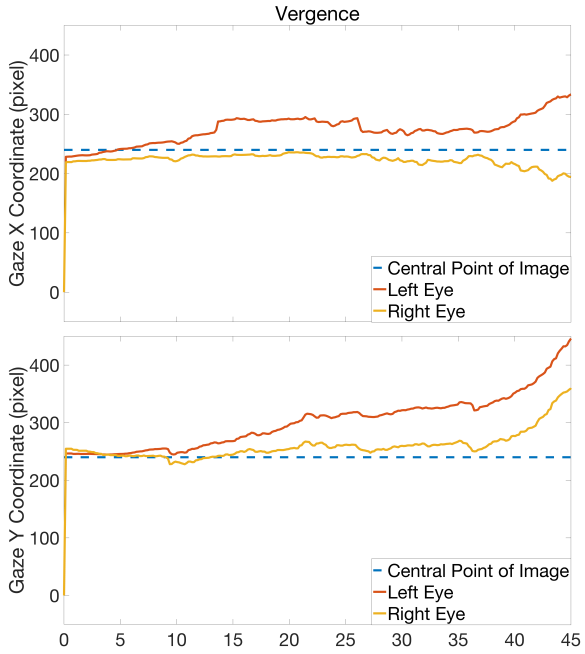

图9。辐辏评估结果。图中显示了机器人左右摄像机捕捉到的人脸中心点的X和Y坐标。

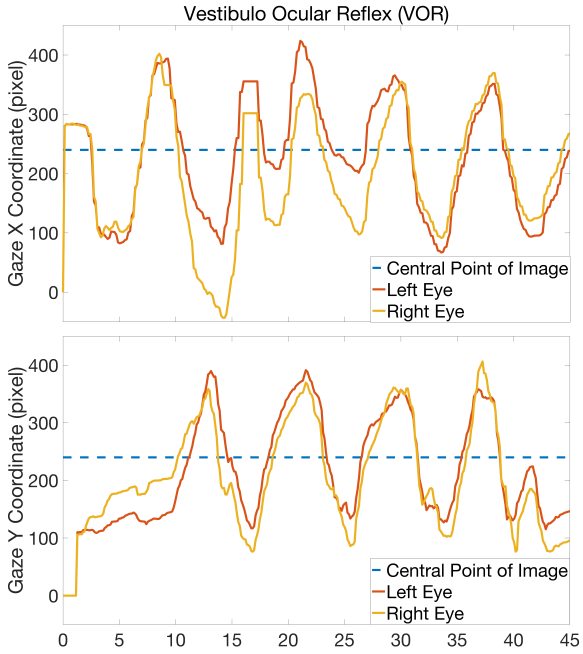

图10。前庭-眼反射评估结果。图表显示了机器人左右摄像机捕捉到的人脸中心点的X和Y坐标。

制器。该控制器的具体目标是使检测到的人脸保持在图像中心。我们分别对扫视、平滑追踪、辐辏和前庭-眼反射运动进行了水平和垂直仿真。随附视频展示了我们的实验[2]。

B. 扫视运动

扫视运动是一种快速的眼球运动，使眼睛能够将注视方向从一个点迅速转移到另一个点。为了评估系统的扫视运动性能，人类受试者保持静止，位于机器人前方的固定距离处。人脸最初位于图像边缘附近，以模拟眼睛必须向目标移动较长距离的场景。图7中的曲线显示，机器人的摄像头会迅速朝人脸的中心点移动，从而模拟扫视眼动。然而，通过分析结果，我们发现，对于这种运动，所提出机器人的运动速度不如人眼快。这一点可以从配套视频中看出。这一局限性可能是由机器人的执行器存在机械约束，或所使用的控制算法导致的。仍需开展进一步研究，以提高机器人的运动速度。

C. 平滑追踪运动

平滑追踪运动用于通过平稳、连续的眼球运动追踪运动目标。为评估这一点，我们进行了一项实验：测试对象行走或上下移动时，机器人眼检测并追踪人脸。由于机器人的摄像头经过编程，会跟随人脸的移动，并使其保持在图像中心，因此我们特别注意保持动作轻柔，以确保机器人的运动平稳、连续。这项测试的结果已记录并绘制于图8中。

D. 辐辏运动

辐辏运动用于在观察不同距离的物体时调节眼睛的焦点。为了评估这一运动，受试者逐渐靠近机器人眼，直到其脸部不再位于图像中心。测试中，机器人眼的摄像头经过调整，以追踪受试者的运动，并使其脸部保持在焦点内。更具体地说，机器人的摄像头经过编程，通过在受试者靠近时相互转向，来模仿辐辏运动。当眼睛需要调节焦点以保持清晰的人脸图像时，就会出现这种情况。如图9所示，眼睛从中心移开，并失去受试者脸部的中心点。

E. 前庭眼反射运动

前庭眼反射（VOR）是一种眼球运动，通过使眼睛向相反方向转动，来补偿头部向某一方向的运动 [22]。在这项实验中，受试者保持静止，而机器人向不同方向移动。机器人的摄像头经过编程，可模仿前庭眼反射，通过向与机器人身体运动相反的方向移动来实现这一效果。这种情况发生在头部转动时，此时前庭眼反射

[2]配套视频：https://youtu.be/1mQl93-Jzi8

会使眼睛向相反方向运动。该实验结果如图10所示。

V. 结论

我们设计并评估了一种能够模拟人眼主要眼球运动的机器人眼。该机器人的设计基于计算机辅助设计（CAD）和3D打印，从而实现了精准且经济实惠的原型。我们的设计采用低成本组件、3D打印部件以及最少数量的伺服电机来实现其功能。我们针对四种主要运动——扫视、平滑追踪、前庭眼反射（VOR）和辐辏——对机器人眼进行了评估。结果表明，所提出的设计能够在一定程度上模拟人眼运动。然而，仍有一些局限性需要在未来的工作中加以解决。例如，我们的设计未考虑扭转和内旋等运动。通过为每只眼睛额外增加一个伺服电机，所提出的机器人可以轻松进行修改，以模拟这些运动。这将使机器人能够模拟斜肌的运动，以及直肌的运动。所设计的机器人在人机交互、计算机视觉和认知科学应用方面具有巨大潜力。为促进该领域的进一步研究，我们已公开提供我们的设计和代码。

参考文献

[1] S. K. Rajendran、Q. Wei 和 F. Zhang，“双自由度机器人眼：中央凹化和平滑追踪中的设计、建模与基于学习的控制”，《生物启发与仿生》，第 16 卷，第 4 期，第 046022 页，2021年。[2] H. Osooli、A. Nikoofard 和 Z. Shirmohammadi，“眼机器人运动的博弈论：方法与硬件实现”，载于*2019*年第*27*届伊朗电气工程会议（*ICEE*）。IEEE，2019年，第 1081–1085 页。[3] S. K. Rajendran、Q. Wei、N. Yao 和 F. Zhang，“超螺旋聚合物驱动机器人眼的可观测性分析与降阶观测器设计”，载于*2022*年*IEEE*第*61*届决策与控制会议（*CDC*）。IEEE，2022年，第 1385–1391 页。[4] W. R. Pruehsner 和 J. D. Enderle，“达芬奇小组：第二代现代眼球运动模拟器”，*Biomed Sci Instrum*，第 42 卷，445，2006年，第 440 页。–。[5] H. Simonsz 和 I. Den Tonkelaar，“19世纪眼球运动的机械模型、多恩德斯定律、李斯廷定律和亥姆霍兹方向圆”，《眼科学文献》，第 74 卷，112，1990年，第 1 期，第 95 页。–。[6] F. Carpi 和 D. De Rossi，“仿人机器人面部眼球的仿生驱动：概念与初步研究”，《生物启发与仿生》，第 2 卷，第 2 期，第 S50 页，2007年。[7] X.-y. Wang、Y. Zhang、X.-j. Fu 和 G.-s. Xiang，“采用气动人工肌肉的新型人形机器人眼的设计与运动学分析”，《仿生工程学报》，第 5 卷，第 3 期，第 264–270 页，2008年。[8] X. Wang、J. van de Weem 和 P. Jonker，“模拟人眼运动的先进主动视觉系统”，载于*2013*年第*16*届国际先进机器人会议（*ICAR*）。IEEE，2013年，第 1–6 页。[9] J. Schultz 和 J. Ueda，“由类肌肉驱动的相机定位器”，载于*2012*年第*4*届*IEEE RAS*与*EMBS*生物医学机器人与生物机电一体化国际会议（*BioRob*）。IEEE，2012年，第 719–724 页。[10] I. Mizuuchi、R. Tajima、T. Yoshikai、D. Sato、K. Nagashima、M. Inaba、Y. Kuniyoshi 和 H. Inoue，“全腱驱动人形机器人‘Kenta’柔性脊柱的设计与控制”，载于*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议，第 3 卷。IEEE，2002年，第 2527–2532 页。

[11] H. Kobayashi、K. Hyodo 和 D. Ogane，“关于具有冗余腱的腱驱动机器人机构”，《国际机器人研究杂志》，第 17 卷，第 5 期，第 561–571 页，1998年。[12] T. Takuma、K. Takai、Y. Iwakiri 和 W. Kase，“使用单一执行器和线缆组的腱驱动跳跃机器人的身体设计”，载于《*UTP*会议论文集》，2018年，第 101–108 页。[13] B. Lin、J. Wang、S. Song、B. Li 和 M. Q.-H. Meng，“腱驱动机器人的模块化可锁定机构：设计、建模与表征”，*IEEE*机器人与自动化快报，第 7 卷，第 2 期，第 2023–2030 页，2022年。[14] D. Biamino、G. Cannata、M. Maggiali 和 A. Piazza，“Mac-eye：完全嵌入式腱驱动机器人眼”，载于第*5*届*IEEE-RAS*人形机器人国际会议，*2005*年。IEEE，2005年，第 62–67 页。[15] E. Perkins 和 H. Davson，“人眼解剖学”，网址 *https://www. britannica. com/science/human-eye*，2015年。[16] J. M. Miller 和 D. A. Robinson，“双眼对准力学模型”，《计算机与生物医学研究》，第 17 卷，第 5 期，第 436–470 页，1984年。[17] B. Krekelberg，“微扫视”，《当代生物学》，第 21 卷，第 11 期，第 R416 页，2011年。[18] E. Kowler 和 R. M. Steinman，“小幅扫视没有任何实际用途：回复 R. W. Ditchburn 的一封信”，《视觉研究》，第 20 卷，第 3 期，第 273–276 页，1980年。[19] J. Horne，“为什么会有快速眼动睡眠？来自实验室之外、更具挑战性世界的线索”，《生物心理学》，第 92 卷，第 2 期，第 152–168 页，2013年。[20] I. Bekerman、P. Gottlieb 和 M. Vaiman，“健康成年人眼球直径的变化”，《眼科学杂志》，第 2014 卷，2014年。[21] N. A. Dodgson，“人类瞳距的变化与极值”，载于《立体显示与虚拟现实系统 *XI*》，第 5291 卷。SPIE，2004年，第 36–46 页。[22] C. Barr、L. Sc hultheis 和 D. Robinson，“人类前庭-眼反射的自主非视觉控制”，《耳鼻喉学报》，第 81 卷，第 5–6 期，第 365–375 页，1976年。