

仿生咀嚼装置及其在食品质地评价中应用研究进展

Research progress of bionic chewing device and its application in food texture evaluation

谢桂林¹ 赵 奇² 郭一霏¹ 王 超¹ 毛 倩^{1,3}

XIE Gui-lin¹ ZHAO Qi² GUO Yi-fei¹ WANG Chao¹ MAO Qian^{1,3}

(1. 辽宁大学轻型产业学院, 辽宁 沈阳 110000; 2. 东北大学医学与生物信息工程学院, 辽宁 沈阳 110169; 3. 长春大学农产品深加工省高校重点实验室, 吉林 长春 130022)

(1. College of Light Industry, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110000, China; 2. College of Medicine and Biological Information Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110169, China; 3. Key Laboratory of Agroproducts Processing Technology at Jilin Provincial Universities, Changchun University, Changchun, Jilin 130022, China)

摘要:结合国内外研究现状,对仿生咀嚼装置的理论模拟和装置研发的应用进行了综述,并对仿生咀嚼装置的发展方向进行了展望。

关键词:仿生咀嚼;装置;质地评价

Abstract: Based on the domestic and abroad research status of the bionic chewing device, its theoretical simulation and application were summarized, and the development direction was also prospected.

Keywords: bionic chewing; device; quality evaluation

食品质地是通过视觉、听觉、触觉、肌肉运动知觉等来感知食品的所有机械特性(包括几何尺寸和表面特性),用来表示与食品组织结构和状态有关的物理量,在食品物性学中被广泛用来表示食品的组织状态、口感及美味感觉等^[1]。仿生咀嚼装置即通过模拟人类口腔对食物进行咀嚼的装置,在食品工业中常用其来进行食品质地评价。目前食品质地评价方法主要包括感官评价法和仪器测量法。感官评价法一般以色泽、质地、滋味和气味为评价指标,其试验结果最接近于食品本身质地性质。

但个体和试验环境的差异会使评价结果有一定的主观性和局限性,离散程度大,很难对食品质地进行客观和准确的评价^[2]。仪器测量法通常是使用质构仪配备不同形状的压头对食品物料进行杵压,从而获取食品质地特性。与感官评价法相比,仪器测量法具有客观、精确、结果可量化、灵敏度高、重现性好等优点^[3]。但是,质构仪与人类口腔环境特征相差较大,难以真实模拟口腔咀嚼运动情况,因此仪器测量法获得的结果对于食品在实际口腔中的质地变化描述是不准确的。

近年来,随着科学技术发展及人们对食品品质的追求,相关人员开展了关于仿生咀嚼装置的设计和优化。文章拟结合国内外研究进展,对仿生咀嚼装置的理论模拟、装置研发的应用进行综述,并对其发展方向进行展望,旨在为仿生咀嚼装置的深入研究提供依据。

1 仿生咀嚼模型

仿生咀嚼模型是当前仿生咀嚼装置研究的基础。Franks 等^[4]利用三维建模软件设计仿生咀嚼模型来重现人类口腔上下颌咀嚼行为,模拟下颌运动,测定咀嚼效率、咀嚼力等参数。仿生咀嚼模型基于机械系统的运动学和动力学仿真来优化模型结构,评价运动性能^[5-6]。构建仿生咀嚼模型能够缩短装置设计时间,提升设计效率,提高装置可靠性和稳定性,最终得到最优的设计产品^[7]。目前仿生咀嚼模型的研究主要有六自由度咀嚼机器人和少自由度咀嚼机器人。

1.1 六自由度咀嚼机器人

六自由度咀嚼机器人即机器人处于咀嚼状态时,运

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(编号:31801623,62002056);辽宁省科技厅博士科研启动基金计划项目(编号:2019-BS-108);辽宁省教育厅青年育苗项目(编号:LQN202002)

作者简介:谢桂林,女,辽宁大学在读硕士研究生。

通信作者:毛倩(1987—),女,辽宁大学讲师,博士。

E-mail: qianmao72@163.com

收稿日期:2021-02-09

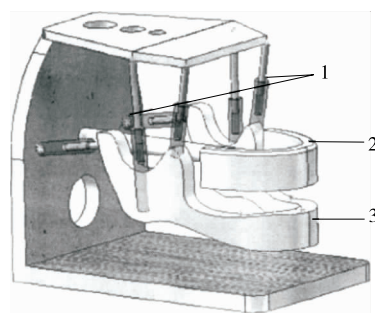
动平台在空间中具有 6 个自由度^[8-9]。六自由度机器人由静平台、动平台及运动支链组成,一般以上颌骨为静平台,下颌骨为动平台。通过分析人类口腔咀嚼系统的生物力学特性,在三维建模软件中构建六自由度咀嚼机器人,模拟人类口腔运动的实际环境,对仿下颌运动机器人进行运动特性分析及有限元静力学分析。

1.1.1 仿下颌运动机器人 下颌作为人类面部重要骨骼,具有进食、说话、面部动作等功能。人类下颌有 3 种运动模式:张开/咬合,向前/向后和向左/向右。通过这 3 种运动模式,人类可以咀嚼食物或发声^[10]。在咀嚼食物的周期性过程中,正常人类下颌边缘运动轨迹幅度范围为 20~30 mm,而下颌运动则取决于食物本身形状和质地^[11-12]。

仿下颌运动机器人的研究主要集中在下颌运动轨迹的仿真以及下颌康复等领域。以并联机构为基础构建的仿下颌运动机器人,其驱动杆一般两两对称。王艺博^[13]构建了 6-SPS 并联机构仿人类下颌机器人,其线性驱动器承受的最大力为 179.7 N。李晓峰等^[14]研究发现,优化后的驱动杆长度分别为 215,184,183 mm。程秀芳等^[15]设计的仿下颌康复机器人可根据患者坐姿身高、颅骨长度、下颌骨长度等进行调节,能满足患者在康复前、后期的不同训练要求。刘同占等^[16-17]充分考虑到下颌系统驱动肌肉分布不对称、作用力方向不同及上下颌连接点不共面的生物力学特性,提出了一种基于 Stewart 平台的并联机构仿下颌运动机器人(图 1)。这类机器人皆选择电机带动丝杠螺母传动系统来驱动,通过滑块位置变化带动模拟咀嚼肌肉的支链实现下颌平台运动;ADAMS 软件仿真下颌运动的不规则张合运动、咬合、左侧咀嚼、常规张合运动、右侧咀嚼,参考点运动范围由 IP>LCP>LMP 优化为 IP>LMP>LCP,最大咬合力约 500 N。宋佳^[18]进行了竖直切割、水平研磨、左侧压碎运动的仿真分析,LCP与RCP最大位移量分别为12.8,15.7 mm,参考

点运动范围为 IP>LMP>LCP,IP>RMP>RCP。以上机器人均能实现人类下颌运动的既定轨迹和咬合力要求。

1.1.2 其他咀嚼机器人 仿下颌运动机器人主要模拟人类口腔下颌运动,再现下颌运动轨迹,对人类上、下颌咀嚼的状态研究较少。而早期的咀嚼模拟器仅研究驱动系统和简单模拟,未分析模型的速度、加速度、力,仿真性简单。裴占波等^[19-20]将复杂的咀嚼肌简化成由直线驱动器模拟的六自由度并联结构(图 2),能模拟下颌骨功能。



1. 直线驱动器 2. 定平台 3. 动平台

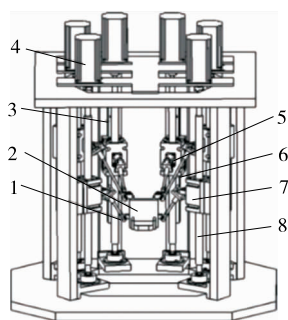
图 2 直线驱动咀嚼机器人^[19]

Figure 2 Linear drive chewing robot

近年来研究者在咀嚼机器人的驱动方式、工作空间(连杆长度等)、上位机控制方向进行了不同方式的优化和设计。例如应用松冈神经振荡器驱动其关节运动,模拟验证机器人咀嚼不同食物的运动轨迹和咬合力^[21]。雷孟冬^[22]以滚珠丝杆为驱动杆,当驱动力为 200 N, $V_{\max}$ 为 0.007 5 m/s 时,咀嚼力最大为 260 N。王加森^[23]设计了将上颌骨更换为不同探头来实现对不同食品的质地评价。秦文龙^[24]以球体直径为 5 mm 的杆件模拟髁突,模型在弹性元件弹簧系数为 10~50 N/mm 时具有稳定性。Tahir 等^[25]开发了液压驱动的 Stewart 并联机构(PKM)咀嚼机器人,可在矢状面、水平面和垂直面平移和旋转。陈根禄^[26]比较了机器人动力学方程位姿曲线与 ADAMS 仿真分析曲线,并验证其可行性。以上咀嚼机器人的理论模拟大多以上颌骨为静平台,下颌骨为动平台来完成咀嚼运动。但也有关于将上颌骨和下颌骨都作为动平台的研究^[27],其上、下颌独立驱动,相对运动,共同实现咬合咀嚼功能。

1.2 少自由度咀嚼机器人

以六自由度并联机构为基础设计的咀嚼机器人结构复杂,成本高且控制困难,为了使咀嚼机器人成本低廉,便于控制和使用,设计了少自由度咀嚼机器人。少自由度咀嚼机器人是一类以自由度<6 的并联机构组成的咀嚼机器人^[28-29],其驱动方式主要包括连杆、滚珠丝杆及绳索。王倩竹^[30]基于四杆机构设计,以弹簧作为减震器模拟咀嚼。谢高鹏^[31]以曲柄摇杆驱动,配以橡胶舌头、唾



1. 球副 2. 末端执行器 3. 导轨 4. 电机 5. 虎克铰 6. 驱动支链 7. 丝杠螺母 8. 丝杠

图 1 仿生下颌运动机器人模型^[16-17]

Figure 1 Bionic mandibular motion robot model of Dalian University of Technology team

液装置、温湿度系统来提升模型仿生性。吴范徐齐等^[32]构建的机器人由1条从动驱链约束3条主动支链,其下颌模型置于转台上,转台与动平台为一体。温海营等^[33]选择电机带动滚珠丝杠传动进而带动滑块运动,该机器人开、闭口运动时间为0.735 s。任杰^[34]利用绳索牵引模拟咀嚼肌,点接触高副模拟人体颞下颌关节,气动人工肌肉驱动构建仿下颌运动机构。

2 仿生咀嚼装置

仿生咀嚼装置的研究始于20世纪90年代,是一种基于人体咀嚼系统的机械模拟器。日本早稻田大学自1987年开始研究咀嚼机器人WJ系列,主要用于口腔咀嚼运动困难人群的治疗。根据牙科生理学,Takanobu等^[35]开发了WJ1~WJ5系列口腔咀嚼机器人,该机器人系统由执行机构、传感器和控制子系统组成。近年来,仿生咀嚼装置也被应用于食品领域,主要包括食品咀嚼模拟器和仿生咀嚼质构仪。

2.1 食品咀嚼模拟器

食品咀嚼模拟器是指模拟人类口腔系统咀嚼,能够在咀嚼过程中收集食品颗粒,分析食品属性特点的一类装置。近年来,食品咀嚼模拟器的研究主要包括机构参数优化、仿舌头的添加及咀嚼效能评定。

2.1.1 机构参数优化 Meyer等^[36]设计了由滑轮牵动绳索模拟主要咀嚼肌的静态下颌模拟器,该装置能使用PM传感器测量咬合力,但存在肌肉群分布不平衡的问题,可能会导致装置不稳定。为提高装置的稳定性和仿生性,后续设计的咀嚼模拟器对机构参数进行了优化,主要包括运动参数和下颌运动。

咀嚼模拟器的运动参数优化主要包括驱动器和驱动部件的位移范围、速度及加速度优化,以此来适应咀嚼不同质地的食品或者接近于人体口腔咀嚼系统,提高机构仿生性。Xu等^[37]研制了以连杆驱动的咀嚼模拟器,由上下颌骨、放大器、计算机等组成,能通过限制电机扭矩适应不同食物质地。同时,Xu等^[38]还设计了由旋转电机、齿轮减速传动系统和丝杠组成的并行驱动机构,最终驱动力设定为200 N。Wen等^[39]的设计由执行器、上颌骨单元、下颌骨单元和底座组成,其下切牙点轨迹与人吻合较好,移动关节最大位移、速度和加速度分别为45 mm、250 mm/s和2 778 mm/s²。汤文杰^[40]制作了以6RSS并联机构为基础的咀嚼模拟器,并分析了装置的角度、角速度和角加速度。Sun等^[41]研制的六连杆仿生咀嚼装置,能在咀嚼不同食物过程中实现咀嚼速度和咀嚼力的快速协调。

优化下颌运动有助于更精确地模拟人类口腔运动。测量装置下颌骨下切牙点的轨迹,与人类下切牙点运动轨迹一致。杜婧^[42]设计了以滚珠丝杠驱动的仿下颌运动

装置,能模拟下颌的小开颌、大开颌、最大开颌运动。温海营^[43]得到了下颌切点张口、前伸、左右侧运动距离最大值分别为52, 20, 18 mm,且具有良好仿生性。Wang等^[44]研究表明,位置控制系统样机门牙轨迹(开合和左侧咀嚼)装置可用于评价食物咀嚼的组织特性。Kalani等^[45]开发了能利用表面肌电信号(sEMG)产生实时咀嚼轨迹的咀嚼模拟器,能生成一个平滑连续的轨迹,咀嚼阶段、时间间隔、试验、被试者的平均识别率为(86.36 ± 5.20)%。

2.1.2 仿舌头的添加 舌头是参与人类口腔咀嚼运动的重要器官。Liu等^[46]研究的仿舌检测装置由提升装置、压力传感器、数据采集手柄和仿舌压头组成,模拟并分析了舌头的4种运动状态(平躺状态、凹陷状态、隆起状态和翻转状态)。韩敬虎^[47]设计了以6-PSS型Stewart并联机构为基础的咀嚼吞咽一体化装置。该吞咽机构由口腔、记忆性塑胶材料制作的仿生舌、会厌、仿生食道组成,并在咀嚼基础上添加了吞咽步骤,真实地再现了人类咀嚼吞咽过程。

2.1.3 咀嚼效能的评定 咀嚼效能是指在一定咀嚼次数下将定量食物咀嚼的程度,可用于衡量咀嚼模拟器的咀嚼能力。咀嚼效能一般以粒度、 d_{50} 值(表明食物破碎程度)等参数来表示^[48]。Salles等^[49]开发的咀嚼模拟器由咀嚼部分、电子控制箱和计算机组成,最大咬合力(250, 300, 350 N)咀嚼花生4, 8个周期,装置能通过施加不同咬合力获得与感官结果相似的粒度。孙钟雷等^[50]制作了仿生牙齿、仿生颞下颌关节等硬件,由偏心轮带动上颌实现咀嚼,组装的咀嚼模拟器咀嚼效率最大值达92.3%。

Woda等^[51]开发了下颌咀嚼盘左右滑动模拟咀嚼的咀嚼模拟器(AM2),该装置可设置咀嚼周期、咀嚼力等参数,并利用花生、胡萝卜进行体内和体外试验,粒度测定表明AM2能够模仿人类咀嚼行为,产生具有相似粒度特征的食物团。Mishellany-Dutour等^[52]利用AM2进行试验,其咬合力范围为35~337 N,体外和体内食物团显示出相似的 d_{50} 值。Peyron等^[53]选用不同质构食品进行体内和体外试验,10个周期后得到的白面包团的 d_{50} 值与全麦面包团的相似,24个咀嚼周期收集的芒果汁重量相似,AM2收集的果汁约为芒果样品初始重量的20%。

2.2 仿生咀嚼质构仪

仿生咀嚼质构仪是通过模拟人类咀嚼运动和口腔环境,对食品质地进行评价的装置。目前食品质地评价方法主要为仪器测量法,该方法实施过程中易受外界环境影响,且实施环境与人类口腔实际生理状况有差异,最终导致测试结果精度低、不稳定。因此,为提高食品质地评价的准确性,模拟口腔实际环境,研制及优化了仿生咀嚼质构仪。

2.2.1 仿齿压头 仪器测量法是利用仪器设备检测食品

的物理或机械指标,建立检测信号和食品质地参数之间的关系,进而分析食品质地。仪器测量法多通过食品质构仪进行测定,采用圆柱形或楔形压头对食品挤压得到的应力—应变曲线进行质地评价,这与人类牙齿形态特征相差较远,很难获取接近人类感受的食品质地结果。因此,优化质构仪压头,使其更接近人类牙齿形态特征,对准确获取食品质地特性具有重要意义。

陈莉等^[54]提取了人类咀嚼过程中咬肌肌电图的特征值,质构结果表明仿齿压头第 1 次压缩做功与咬肌活动量、硬度与咬肌信号峰值的相关系数分别为 0.866,0.934,均大于圆柱形压头的(0.740 和 0.907),其质地特性密切程度比圆柱形压头高 9.3%,破碎能力也优于圆柱形压头。孙钟雷等^[55]研究发现,仿单齿压头对花生和杏仁的破碎率分别为 63.05%,42.36%,均优于圆柱和齿形压头。

Park 等^[56]利用声音采集器获取质构仪压缩苹果的声学特性,质构仪配有不同压头(刀片、上全齿、全齿),结果表明,与刀片和上全齿压头相比,使用全齿压头获得的声学特性脆度与甜度(0.96)、多汁性(0.98)和整体口感(0.97)有较高的相关性。

2.2.2 质构仪测试 食品咀嚼模拟器仅近似模拟咀嚼功能,未模拟牙周膜结构和信号传递机理等,与人类的感官相差较大。针对食品质地评价中存在的问题,基于食品咀嚼模拟器和仿齿压头的研究,利用仿生技术研究开发了仿生咀嚼质构仪。以成人牙齿和颅骨标本为模型,采用仿生技术和逆向工程手段设计制作仿生牙齿、仿生上下颌、仿生牙周膜、信号调理及采集电路等系统硬件,设计开发系统测试软件,完成仿生咀嚼质构仪的组装。

通过仿生咀嚼质构仪对具有代表性质地的食品进行质地测试,将其质地评价结果与感官评价结果、食品质构仪评价结果相比较,可以评估该装置的仿生性、可靠性及稳定性。Meullenet 等^[57]的设计能通过调节金属柱和球形接头来调节下颌高度、倾斜和转动角度,最大咀嚼力为 150 N。峰值力(h_1)是预测奶酪硬度感官硬度的最优指标,仿生咀嚼质构仪的 h_1 为 0.83~0.97,该装置在评估食品硬度方面具有可靠性。杨杰^[58]利用拉伸弹簧系数不同(5~70 N/mm)调节驱动力,与感官评价的硬度、脆性、弹性、内聚性、咀嚼性的相关系数分别为 0.998,0.992,0.995,0.986,0.997,均显著相关。刘爱阳^[59]开发的牛肉嫩度快速检测系统能够获取不同嫩度牛肉的应变值,自组织神经网络预测结果正确率达到 95%,可用于牛肉嫩度的等级评定。Lee 等^[60]开发了以肌腱—弹簧机构实现双向驱动的仿生咀嚼质构仪,能够获取饼干的脆性和果冻的弹性等质地特性,但该质构仪不能持续咀嚼。以上仿生咀嚼质构仪未考虑唾液在咀嚼中的作用。

2.2.3 引入唾液及温控装置 人类咀嚼过程中口腔保持一定的湿度和温度,同时口腔内壁会分泌唾液来促进咀

嚼。Poinot 等^[61]设计了由密闭容器、活塞和可调电机组成的人工口腔装置,注入唾液 30 mL,37 ℃时咀嚼面包 [$m_{\text{面包}}:V_{\text{唾液}}$ 为 2.04:1.00 (g/mL)],结果表明唾液有利于面包咀嚼破碎。孙钟雷等^[62]设定唾液流速 3 mL/min,口腔温度(37±1) ℃,与苹果感官硬度、脆性的相关系数分别为 0.970,0.904,与胡萝卜硬度、脆性的相关系数分别为 0.961,0.971。Peyron 等^[54]在唾液流速 0.5~5.0 mL/min,温度 36 ℃时利用 AM2 咀嚼口香糖,其重量减轻和葡萄糖释放变化具有相似的时间进程。AM2 无唾液咀嚼牛肉时,牛肉氧化加快,说明唾液具有抗氧化作用。王璐^[63]采用蠕动泵控制唾液流速(3 mL/min),加热加湿器控制温湿度(37 ℃,相对湿度 60%),对饼干、面包、花生、苹果、胡萝卜进行了测试。Alemzadeh 等^[64]利用仿生咀嚼质构仪咀嚼口香糖,咀嚼温度 37 ℃,唾液(表 1)流速 1.2~4.9 mL/min。结果表明,该装置能在 20 min 内嚼碎口香糖,木糖醇释放的变化趋势及回收量与人体相似。仿生咀嚼质构仪可以用来代替人类感官质地评价,且经过对比发现仿生咀嚼质构仪较食品质构仪更优越。

表 1 人工配制唾液成分[†]

Table 1 Artificial preparation of saliva components

mmol/L					
CaCl ₂ ·2H ₂ O	MgCl ₂	KH ₂ PO ₄	HEPES 缓冲液	KCl	HCl
0.7	0.2	4.0	20.0	30.0	0.1

[†] 用 KOH 调 pH 至 6.8。

仿生咀嚼质构仪还能对风味物质进行检测。Tarrega 等^[65]通过仿生咀嚼质构仪连接大气化学电离质谱对进食过程中易挥发的芳香化合物(丁酸,2-庚酮,丁酸乙酯,3-辛酮和 2-壬酮)释放参数进行控制和测量,发现通过注射泵控制唾液流速(1~4 mL/min)会影响疏水性较强的芳香化合物。仿生咀嚼质构仪也可应用于烟草制品^[66-67]。利用仿生咀嚼质构仪咀嚼口含型烟草制品和胶基型烟草制品,咀嚼时添加含牙龈卟啉单胞菌的人工唾液,通过荧光定量 PCR 分析研究咀嚼前、后唾液中牙龈卟啉单胞菌含量^[68-69]。

3 结语

随着学科的交叉融合和当前各种机械技术的发展以及人们对食品质地评价精确性的要求不断提高,仿生咀嚼装置还需深入研究:① 优化仿生牙齿材料和仿生舌。当前的仿生牙齿材料多选择不锈钢或者塑料材质,牙面过于光滑,咀嚼时食物易滑落,试验结果存在误差;舌头在咀嚼过程中起搅拌和传送食物的作用,舌头本身是柔软且灵活的,而目前的仿生舌都是刚性的。因此,在仿生咀嚼装置中优化仿生牙齿材料及仿生舌是研究的重要方向。② 提高仿生咀嚼装置的智能性。当前仿生咀嚼装置

需要人的参与才能完成食品质地的评价,如何提高仿生咀嚼装置的适应性和自动化水平,使其对不同形态、质地的食品,自主稳定地完成食品质地评价,减少人的参与。

③ 设计成本低、操作简单的仿生咀嚼装置。仿生咀嚼装置的应用目前还处在实验室阶段,设计时应考虑装置的整体材料、体积、驱动方式等,减少操作步骤,开发一个简洁易懂的软件系统也有利于提升其操作简便性。

参考文献

- [1] ROLLS E T. The texture and taste of food in the brain[J]. *Journal of Texture Studies*, 2020, 51(1): 23-44.
- [2] GULD Z, DIÁNA N S, GERE A, et al. Comparison of sensory evaluation techniques for Hungarian wines[J]. *Journal of Chemometrics*, 2020, 34(4): e3219.
- [3] SODHI N S, SINGH B, DHILLON B, et al. Application of electromyography (EMG) in food texture evaluation of different Indian sweets[J]. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 2019, 38(1): 41-48.
- [4] FRANKS E M, JELTEM M, LUCK P J, et al. Morphological and masticatory performance variation of mouth behavior groups [J]. *Journal of Texture Studies*, 2020, 51(2): 343-351.
- [5] TODOROV G, KAMBEROV K, PANTALEEV T, et al. Elastic rail clip design development, based on virtual prototyping[J]. *Iop Conference*, 2018, 393(1): 012120.
- [6] 庆毅辉, 王淑青, 张子蓬, 等. 上颌机器人运动学分析及轨迹研究[J]. *食品与机械*, 2020, 36(12): 70-73.
- [7] PARK H S, DANG D V, NGUYEN T T. Development of a flexible roll forming machine for cutting curved parts with virtual prototyping technology [J]. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, 2019, 13(2): JAMDSM0033.
- [8] FU Jian-xun, GAO Feng, CHEN Wei-xing, et al. Kinematic accuracy research of a novel six-degree-of-freedom parallel robot with three legs[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2016, 102: 86-102.
- [9] CHEN Feng-jun, LIAO Jin-qi, XIONG Jun, et al. High-precision trajectory tracking design and simulation for six degree of freedom robot based on improved active disturbance rejection control[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(10): 3 659-3 669.
- [10] NAGAOKA M, SUZUKI H, KANAYAMA K, et al. Inability to close mouth and dysphagia caused by pseudobulbar palsy: Trial treatment by vibration-induced mastication-like movement[J]. *BMJ Case Reports*, 2019, 12(12): e232061.
- [11] 黄超, 许向亮, 孙玉春, 等. 下颌髁突功能面三维运动轨迹的初步推算和模拟[J]. *中华口腔医学杂志*, 2018, 53(10): 669-673.
- [12] GARCIA E, LEAL M M, VILLAMIL M B. Modeling and simulation of masticatory muscles[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 51: 2 878-2 882.
- [13] 王艺博. 仿人类下颌机器人的机构设计与仿真分析[J]. *机电信息*, 2016(24): 133-134.
- [14] 李晓峰, 王加森, 卢慧, 等. 6-PSS 仿生下颌咀嚼平台工作空间分析及其优化[J]. *机械设计*, 2016, 33(1): 48-54.
- [15] 程秀芳, 张超. 下颌康复机器人结构设计与仿真分析[J]. *机械传动*, 2019, 43(3): 95-98.
- [16] 刘同占. 仿下颌运动机器人设计及仿生性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 239-248.
- [17] 丛明, 刘同占, 温海营, 等. 一种新型仿下颌运动机器人设计及运动性能分析[J]. *机器人*, 2013, 35(2): 38-53.
- [18] 宋佳. 仿下颌运动并联机器人的性能分析与参数优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 29-37.
- [19] 裴占波. 咀嚼机器人建模与控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 11-15.
- [20] YU Jing-hu, GANG Pei, YIN Zhi-zhang. Reverse kinematics of bionic 6-RSS chewing robot for food mechanical properties measuring[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2012, 127: 3-11.
- [21] XU W L, FANG F C, BRONLUND J, et al. Generation of rhythmic and voluntary patterns of mastication using Matsuoka oscillator for a humanoid chewing robot[J]. *Mechatronics*, 2009, 19(2): 205-217.
- [22] 雷孟冬. 六自由度咀嚼虚拟样机设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 15-59.
- [23] 王加森. 面向食品材料的高仿真咀嚼平台研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 8-27.
- [24] 秦文龙, 丛明, 任翔, 等. 仿生咀嚼机器人弹性颞下颌关节设计与性能分析[J]. *生物医学工程学杂志*, 2020, 37(3): 512-518, 526.
- [25] TAHIR A M, JILICH M, TRINH D C, et al. Architecture and design of a robotic mastication simulator for interactive load testing of dental implants and the mandible[J]. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2019, 122(4): 389.
- [26] 陈根禄, 俞经虎, 揭景斌, 等. 仿生咀嚼 6PSS 并联驱动平台的动力学分析[J]. *现代制造工程*, 2018(7): 43-50.
- [27] 丰瑞鑫. 用于食品检测的咀嚼平台机构及其控制系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019: 11-18.
- [28] LIU Kai, KONG Xian-wen, YU Jing-hu. Operation mode analysis of lower-mobility parallel mechanisms based on dual quaternions[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 142: 103577.
- [29] LIANG Xing-hai, YUKIO Takeda. An iterative method for the inverse kinematics of lower-mobility parallel mechanism with three RS or SR chains based on kinematically equivalent mechanism[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 141: 40-51.
- [30] 王倩竹. 咀嚼模拟机器人设计与分析[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 15-39.
- [31] 谢高鹏. 食品咀嚼模拟机系统的开发与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 19-49.
- [32] 吴范徐齐, 许嵩, 刘生, 等. 基于咀嚼特性的少自由度咀嚼机器人设计[J]. *机械传动*, 2019, 43(8): 52-58.
- [33] 温海营, 任翔, 徐卫良, 等. 咀嚼机器人颞下颌关节仿生设计及试验测试[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2019, 49(3): 943-952.
- [34] 任杰. 基于绳索驱动的仿下颌运动机构设计与分析[D]. 大连:

- 大连理工大学, 2019: 19-27.
- [35] TAKANOBU H, TAKANISHI A. Dental robotics and human model[C]// 1st International IEE EMBS Conference on Neural Engineering, Capri Island: [s.n.], 2003: 671-674.
- [36] MEYER C, KAHN J L, LAMBERT A, et al. Development of a static simulator of the mandible[J]. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 2000, 28(5): 278-286.
- [37] XU W L, TORRANCE J D, CHEN B Q, et al. Kinematics and experiments of a life-sized masticatory robot for characterizing food texture[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(5): 2 121-2 132.
- [38] XU W L, PAP J S, BRONLUND J. Design of a Biologically Inspired Parallel Robot for foods chewing[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(2): 832-841.
- [39] WEN Hai-ying, CONG Ming, WANG Gui-fei. Experimental verification of workspace and mouth-opening movement of a redundantly actuated humanoid chewing robot[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2015, 42(5): 406-415.
- [40] 汤文杰. 六自由度咀嚼机设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2017: 11-19.
- [41] SUN C, XU W L, BRONLUND J E, et al. Dynamics and compliance control of a linkage robot for food chewing[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(1): 377-386.
- [42] 杜婧. 仿下颌运动机器人的样机设计和实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 65-81.
- [43] 温海营, 丛明, 王贵飞, 等. 冗余驱动仿下颌运动机器人工作空间分析及试验验证[J]. *机器人*, 2015, 37(3): 286-297.
- [44] WANG Gui-fei, CONG Ming, XU Wei-liang, et al. A biomimetic chewing robot of redundantly actuated parallel mechanism[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2015, 42(2): 103-109.
- [45] KALANI H, MOGHIMI S, AKBARZADEH A. Toward a bio-inspired rehabilitation aid: sEMG-CPG approach for online generation of jaw trajectories for a chewing robot[J]. *Biomedical Signal Processing & Control*, 2019, 51: 285-295.
- [46] LIU Jing-jing, CUI Ying, CHEN Yi-zhou, et al. Evaluation of food fineness by the bionic tongue distributed mechanical testing device[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(12): 4 250.
- [47] 韩敬虎. 咀嚼吞咽一体化仿生机器人研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 16-25.
- [48] 毛倩. 仿咀嚼食品质地评价及咀嚼效能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 4-5.
- [49] SALLES C, TARREGA A, MIELLE P, et al. Development of a chewing simulator for food breakdown and the analysis of in vitro flavor compound release in a mouth environment[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 82(2): 189-198.
- [50] 孙钟雷, 孙永海, 万鹏, 等. 仿生咀嚼装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(8): 214-218.
- [51] WODA A, MISHELLANY-DUTOIR A, BATIER L, et al. Development and validation of a mastication simulator[J]. *Journal of Biomechanics*, 2010, 43(9): 1 667-1 673.
- [52] MISHELLANY-DUTOIR A, PEYRON M A, CROZE J, et al. Comparison of food boluses prepared in vivo and by the AM2 mastication simulator[J]. *Food Quality & Preference*, 2010, 22(4): 326-331.
- [53] PEYRON M A, SANTE-LHOUTELLIER V, DARDEVET D, et al. Addressing various challenges related to food bolus and nutrition with the AM2 mastication simulator[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 97: 105229.1-105229.11.
- [54] 陈莉, 孙永海, 刘晶晶, 等. 基于肌电信号的仿齿压头对食品质地的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(8): 248-253, 281.
- [55] 孙钟雷, 孙永海, 方旭君, 等. 仿齿冠压头破碎物料试验及模拟[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2011, 41(增刊 2): 236-240.
- [56] PARK D J, CHUN Y G, LEE S H, et al. Development of teeth probe for analysis of correlation between mechanical and sensory properties of apples[J]. *Journal of Texture Studies*, 2016, 47(6): 523-529.
- [57] MEULLENET J F, GANDHAPUNENI R K. Development of the BITE Master II and its application to the study of cheese hardness[J]. *Physiology & Behavior*, 2006, 89(1): 39-43.
- [58] 杨杰. 仿咀嚼机实验平台的研究设计及食品质地分析[D]. 长春: 吉林大学, 2018: 32-90.
- [59] 刘爱阳. 基于单片机技术的牛肉自动控制检测系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 70-75.
- [60] LEE S J, KIM B K, CHUN Y G, et al. Design of mastication robot with life-sized linear actuator of human muscle and load cells for measuring force distribution on teeth[J]. *Mechatronics*, 2018, 51: 127-136.
- [61] POINOT P, ARVISENET G, GRUA-PRIOL J, et al. Use of an artificial mouth to study bread aroma[J]. *Food Research International*, 2009, 42(5): 717-726.
- [62] 孙钟雷, 孙永海, 李宇, 等. 仿生食品质构仪设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(1): 230-234.
- [63] 王璐. 咀嚼效能分析及仿咀嚼机食品质地评价方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 58-69.
- [64] ALEMZADEH K, JONES S B, DAVIES M, et al. Development of a chewing robot with built-in Humanoid Jaws to simulate mastication to quantify robotic agents release from chewing gums compared to human participants[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2020, 68(2): 492-504.
- [65] TARREGA A, YVEN C, SEMONE E, et al. Effect of oral physiology parameters on in-mouth aroma compound release using lipid-protein matrices: An in vitro approach[J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2019, 8(3): 106.
- [66] 杨继, 田永峰, 段沅杏, 等. 一种全仿真模拟咀嚼机: CN206057269U[P]. 2017-03-29.
- [67] 李怀奇, 邱建华, 李国政, 等. 卷烟烟气在模拟口腔环境中 pH 值的测定[J]. *食品与机械*, 2019, 35(4): 60-63, 162.
- [68] 高茜, 段沅杏, 赵伟, 等. 一种口含型烟草制品对牙龈卟啉单胞菌影响的检测方法: CN107630072A[P]. 2018-01-26.
- [69] 高茜, 杨继, 赵伟, 等. 一种胶基型烟草制品对牙龈卟啉单胞菌影响的检测方法: CN107513580A[P]. 2017-12-26.