DOI: 10.3901/JME.2019.12.215

基于主动包络和负压塑形的软体适形夹持器*

郭钟华¹ 李小宁¹ 林浩鹏^{1,2}

(1. 南京理工大学机械工程学院 南京 210094;

2. 上海飞机制造有限公司 上海 200436)

摘要: 借鉴软体生物的结构和功能特点,设计并制作一种气动软体塑形夹持装置。该装置的夹爪由软体材料制成,软体夹爪能张开和闭合,实现双向弯曲以夹持或释放物体。同时,提出多腔室软体和负压塑形单元相结合的结构型式,并得出技术实现方案,即用细颗粒物填充末端气囊,充气后先适应物体外轮廓发生变形,继而抽真空使气囊固化为夹持物外形,从而与物体形成可靠约束,对于外形尺寸不规则的异型件有良好的夹持效果。试制完成的塑形夹持装置以气压驱动的软体结构增大夹持装置与物体的接触面积,并采用负压塑形技术以大幅提高形状适应能力。研究成果为软体塑形夹持装置提供了理论和技术支持,可为食品分拣、海洋生物研究、混流生产等领域提供有益参考。

关键词: 气动夹持器;软体驱动器;负压塑形

中图分类号: TH138

Soft Adaptive Gripper with Active Enveloping Arms and Vacuum Jamming Technology

GUO Zhonghua¹ LI Xiaoning¹ LIN Haopeng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094;

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436)

Abstract: A new type of pneumatic soft gripper is designed and fabricated inspired by the structure and function of mollusk. The gripper jaws of this device are made of soft silicone, which open and close, and bidirectional bending is achieved to hold or release the object. At the same time, a new structure composed of high-density elastic multi-chamber soft body and vacuum shaping structures is proposed. The technical scheme is made to fill the shaping bag with granular material to conform to the object shape and a reliable constraint is realized between the gripper and the object under vacuum conditions. Therefore, good gripping performance is obtained for unfamiliar objects of variable shapes. In the fabricated device, soft adaptive bodies enlarge the contact area to adapt to the work-piece. Meanwhile, the vacuum shaping elements are added to increase shape adaptive capacity. It is useful for soft adaptive gripper design, to provide theoretical and technical support for food selection, marine biology study and mixed flow manufacturing lines.

Key words: pneumatic gripper; soft actuator; vacuum shaping

0 前言

随着工业生产的发展,自动化生产线的应用日益广泛。夹持装置是自动化生产线的重要组成部分,其夹持性能关系到生产效率及产品质量。传统夹持装置与抓持对象之间一般是刚性接触,通常有2至3个接触点,如图1所示,通过对接触点施加接触压力以产生摩擦力,从而实现抓持功能。当载荷增

大时,这类手爪通常采用增大正压力的方法提高抓握能力,难以抓取易碎物品。此外,传统夹持装置一般针对特定任务设计,只能完成特定对象抓持作业,通用性与互换性不足。当生产任务改变时,传统夹持装置难以适应新的生产需求。

在现代工业生产中,产品种类不断增多,产品更新速度不断加快,市场需求呈现出“多品种、小批量、生产换线频繁”的趋势。为了提高生产线的使用效率,在混流生产线上,多种工件必须被稳定可靠地夹持,并在不同生产步骤中流转和输送,夹持器的适应性和灵活性至关重要。因此,需要研制

* 国家自然科学基金(51305202)和江苏省自然科学基金(BK20130764)资助项目。20180620收到初稿,20181221收到修改稿

一种新型的夹持装置,能更好地适应夹持需求。

图 1 传统夹持器

受自然界生物体启发,仿生夹持装置应运而生,结构形式和形变状态各具特色,运用的材料形式多样^[1-2](硅橡胶,形状记忆合金、电活性聚合物等),如象鼻夹持器、海星夹持器、章鱼夹持器等^[3-4]。其中,由压缩空气驱动的仿生夹持器因为清洁、安全、防爆等优点而得到广泛应用。例如,德国费斯托公司研发了基于变色龙舌头原理的软体伸缩夹持器^[5],驱动器拉动弹性薄膜向内收缩,从而贴合并夹紧物体。ILIEVSKI 等^[6]研发出海星夹持器,这种夹持器采用对称式海星结构并由硅胶制成。其采用了气动网格型驱动器,结合可拉伸和不可拉伸两种材料,夹持器朝不可拉伸方向弯曲以包络和夹持物体^[7]。LESSING 等^[8]设计的章鱼夹持器能夹持西红柿等蔬果。

气动夹持器的适形操作多通过包络夹持物来实现,但是由于充满气体的橡胶囊与物体贴合面不易控制,所以具有很大的局限性。因此,可以考虑采用拟合物体外表面的塑形方法,如采用磁流变液、

电流变液等相变技术^[9-10]。为进一步控制成本,适应实际应用的需要,可以引入颗粒塑形原理进行夹持器末端塑形单元的设计,即在密闭的柔性容腔内填充颗粒物,使其在“类流体”状态和“类固体”状态之间相互转换^[11]。由于颗粒塑形技术操作方便、响应快且刚度可调,研究人员利用这种原理研制了可定制的模板构件、用于触诊的刚度反馈驱动器、可调刚度的手术牵引器、变刚度关节、高度变形移动机器人、多刚度变化的软体驱动器等^[12-18]。BROWN 等^[19-20]提出由一个球形塑形袋构成的单指塑形夹持器,并分析了其塑形和夹持的力学性能。

如果将软体夹持器与颗粒物塑形单元相结合,可以得到更轻巧和适形的夹持器,同时,它还具有有一定的刚度和稳定度,具备简单的结构和方便的控制策略。因此,本研究借鉴了海洋软体生物结构特点提出了一种塑形夹持方案。以海葵为代表的海洋软体生物身体柔软且易于变形,针对不同环境,它能改变自身形状以实现不同功能。受此启发,针对多形状和材质的夹持需求,设计了多夹爪软体夹持器,实现三维立体抓取操作。如图 2 所示,其包含两个组成部分,软体驱动器和夹爪。软体驱动器实现径向和轴向变形,驱动夹爪展开或收拢,能包裹夹持物并贴合物体的形状。为使夹持器更好地约束工件,图 2 所示的夹爪末端集成颗粒物塑形单元,进行塑形试验和实物夹持试验,适形和夹持效果良好。

图 2 软体夹持器原理示意图

1 设计方案

1.1 总体结构

为了实现图 2 所示的设计方案,并考虑到刚度和柔性兼顾的原则,夹持器的结构如图 3 示意,包括驱动气囊和多个软体夹爪(以三个夹爪为例),软体夹爪由柔性臂和塑形袋构成,它们对称分布于驱动器底部。

驱动器包括上固定板、浮动板、驱动气囊等。在充入或抽出空气时,驱动气囊驱动浮动板做上下往复运动,带动连杆动作以实现塑形单元的开合操

作。其螺杆上设有上下限位螺母,用于保证驱动气囊能在安全范围内动作。底座的下方安装有软垫,可防止物件与刚性驱动底座直接接触。主要构件尺寸和位置关系如图 4 所示。为方便连接柔性臂,连杆末端设计有夹爪连接件。连接件采用两部分相扣合的方法,将硅胶软体卡在连接件中,扣合后采用螺钉固定,并适当涂胶以密封。柔性臂设计为多腔室结构,充气后正向弯曲,包络夹持物体,抽真空时反向弯曲,释放夹持物。软体夹爪的内侧还设计有负压塑形单元。针对不同夹持对象,该夹持器可以做调整。对于形状对称的物体,三个夹爪均贴合物体进行适形包络。对于形状不对称物体,部分夹

爪工作, 利用塑形袋的作用来固定并夹持物体。对于尖锐物品, 塑形袋则能贴合锋利部位。

图3 软体夹持器结构示意图

1.2 动力传递方案

驱动气囊、柔性臂和塑形袋采用不同的回路供气 and 排气, 如图 5 所示。驱动气囊供气压力为 0.2 MPa, 气囊充气后伸长使浮动板下移, 控制驱动底座上连杆组向内收拢包络物体。需要解除夹持操作时, 通过图 5 中 17 号电磁阀换向, 接入真空源, 排出气囊内空气使连杆组向外张开而放开物体。

图4 软体夹持器驱动气囊及连杆结构示意图

驱动气囊充气包络物体的同时, 向柔性臂供气使柔性臂向内弯曲。夹持对象大小和外形不同时, 柔性臂弯曲角度不同。柔性臂向内弯曲时供气压力为 0~50 kPa, 而连通真空源后柔性臂可以向外弯曲, 其反向弯曲时真空度为 0~20 kPa。柔性臂弯曲并接触夹持物后, 向塑形袋供气使其内颗粒物疏松和流动, 柔性臂包络并接触物体时, 塑形袋能迅速贴合夹持物外表面。此时, 接通真空源以排出塑形袋内部分空气使其固化为夹持物轮廓, 即实现负压塑形。

图5 软体夹持器气动回路图

1. 气源 2,3,4,5. 正压调压阀 6,7,15,16,17. 电磁阀 8. 真空发生器 9. 消声器 10,12. 真空调压阀
11,13,14,18,19,20. 节流阀 21. 可编程逻辑控制器 22. 夹持器

2 负压塑形技术的实现

2.1 负压塑形单元

为了得到多个夹爪同时包络并塑形的效果, 研究两个以上夹爪以相对方向同时挤压并塑形, 原理如图 6 示意, 夹爪均带有塑形面, 用细颗粒物填充

后, 相对方向的塑形面适应物体外轮廓发生变形, 柔软的薄膜与夹持物相互挤压并拟合出物体轮廓。待贴合成型完毕后, 负压源与塑形单元接通并抽除部分空气, 利用腔内外压差来压缩颗粒物使其达到稳定状态, 并使其刚度增加, 且可以通过调节真空压力改变其刚度。多个塑形面在大气压的作用下紧紧压实内部颗粒物, 形成类似刚体的接触面, 从而

约束夹持物。

图 6 多夹爪塑形原理示意

为验证多夹爪塑形原理的可行性,制作了塑形单元并进行了试验。塑形单元如图 7 所示,其包含一个塑形面,由硅胶膜内填颗粒物构成。试验中,将直径为 34 mm 的木质小球压入塑形单元,柔软的硅胶薄膜与小球接触并拟合出与之匹配的三维轮廓,电磁阀动作接通真空源,薄膜固化而约束物体。为保证塑形膜能够较好地贴合被夹持物体,并且减小塑形单元对柔性臂弯曲性能的影响,使用材质较软的硅橡胶材料制作塑形膜,因此本文采用邵氏硬度 shore A10 硬度的硅橡胶制作塑形膜。

图 7 塑形单元塑形实物图

2.2 负压塑形试验

在不同的工作参数条件下,即真空度和填充颗粒种类不同时,分别研究了塑形单元的塑形对夹持物的约束作用。试验原理如图 8 所示,将直径 34 mm 的木质小球压入塑形单元中,并记录压入深度。抽离塑形单元腔内空气将小球约束于固化的塑形膜内,再用气缸对小球施加竖直向上的提升力,记录

图 8 试验原理图和试验装置

试验小球脱离塑形单元时气缸有杆腔气压力大小,可以计算出此刻提升力的大小。试验小球脱离塑形单元时气缸提升力越大,说明塑形单元与试验小球结合地越紧密,塑形夹持效果越好。

为使塑形单元容腔内留有一定空间以方便颗粒物流动,颗粒物体积占容腔容积的 80%。首先填充咖啡颗粒,试验真空度 P_v 的调节范围为 0~85 kPa,每次试验真空度的增量为 5 kPa,小球压入塑形单元的深度均为 30 mm。分析和处理试验数据,并绘制不同真空度条件下,试验小球脱离塑形单元时提升力数据曲线,如图 9 所示。从图 9 可以看出,当真空度小于 10 kPa 时,仅需要很小的提升力就能将小球与塑形单元分离,因为此条件下颗粒物固化的程度不足,塑形面松软,无法提供充足的约束力。当真空度在 10 kPa~50 kPa 时,随着真空度的增高,塑形面固化程度逐渐提高,塑形单元对小球的约束作用明显,需要较大的提升力才能将小球取出。当真空度大于 50 kPa 时,提升力增速减缓并趋于稳定,且在真空度为 65 kPa 时,此时塑形面已固化成小球外轮廓,起到良好的约束作用,继续提高真空度已不能再增强约束效果。

图 9 真空度与提升力关系试验曲线

为比较不同颗粒物条件下的塑形效果,试验对比了咖啡颗粒和石英颗粒的塑形效果,并得到试验小球脱离塑形单元时提升力和压入深度关系曲线,如图 10 所示。分析试验数据可知,当压入深度较小时,填充咖啡颗粒的塑形单元提升力更大,即其对小球的约束力更大。这是因为咖啡颗粒密度小、质量轻,更容易流动和固化。而随着压入深度增加,填充石英颗粒的塑形单元对试验小球的约束力显著增大。这是因为压入深度较大时,咖啡颗粒和石英颗粒都已具备优良的塑形条件,而硬度更高的石英颗粒通过挤压作用能提供更大的约束力。因此,对于压入深度较小的场合,如单爪塑形夹持器选用咖啡颗粒能得到较优的塑形效果,塑形单元轻触物体

即能提供较大的夹持力;对于压入深度较大的场合,若填充石英颗粒则能增大夹持力,达到稳定夹持和提高负载能力的目的。

图 10 压入深度和提升力关系试验曲线

3 软体夹爪的设计与制作

3.1 柔性臂的结构

软体夹爪的作用是主动包络并充分接触夹持物。为了得到有效的弯曲动作,本研究在叠形气囊的基础上,在原对称轴的一侧设计分割面,设计非对称型叠形气囊,其在充气或抽气时,两侧的伸长和收缩程度不同,驱使叠型气囊发生弯曲动作。

如图 11 所示,软体夹爪主要包括柔性臂、塑形膜和强化膜等。其中柔性臂由柔性臂主体和柔性臂固定片构成,采用硅胶材料制备。柔性臂固定片设置在连接件底部,柔性臂主体、塑形膜和强化膜分别设置在柔性臂固定片两侧,两两之间相互扣合并连为一体。

由于柔性臂内部设计有间隔式非对称气腔,在充入或排出空气时,能够在两个方向上进行弯曲,实现塑形夹持器软体夹爪的打开和闭合动作。排气时其动作情况如图 11a 所示,柔性臂内气腔承受负压,由于柔性臂外侧较内侧收缩地更多,驱使柔性臂向外弯曲实现软体夹爪的打开动作。当充入压缩空气时,其示意图如图 11b 所示,柔性臂内腔充入压缩空气,柔性臂外侧变形量更大,完成内弯动作使夹爪聚拢。

3.2 柔性臂的制作

本文所研究的柔性臂要求具有一定的柔顺性和压力承载能力,因此选择邵氏硬度 A20 的硅橡胶制作柔性臂。结合负压塑形试验结果,采用邵氏硬度 A10 的硅橡胶制作塑形薄。为了使设计完成的夹爪柔软并有弹性,且考虑环保无害的要求,采用 3D 打印机制作模具,灌注食用级硅橡胶成型。如图 12

图 11 软体夹爪动作示意图

所示,塑形膜和强化膜呈盒状结构,内部填充有塑形颗粒,并确保塑形膜及强化膜内部留有一定的间隙,使石英砂颗粒能够在塑形膜及强化膜内自由流动。充气软管嵌于柔性臂固定片内,在软管的出气口处设有过滤网,防止在负压的情况下塑形膜及强化膜内部的塑形颗粒物被吸出。在材料的选择过程中,塑形膜使用材质较软的硅橡胶,能使塑形膜更好地贴合被夹持物体。

图 12 制作完成的软体夹爪实物图片

4 试验样机和夹持试验

根据设计方案制作完成软体夹持器样机, 构建了夹持试验系统。夹持器的动作可归纳为三个工作状态: ① 夹持前张开状态, 即驱动气囊收缩、柔性臂收缩、塑形膜及强化膜疏松; ② 夹持收拢状态, 驱动气囊伸长、柔性臂包络塑形、塑形膜及强化膜固化定形; ③ 夹持完毕释放物体, 夹持器将重复初始化动作以准备下一次动作。夹持动作与效果参见图 13, 夹持器能较好地贴合工件, 并拟合出工件底部凸起处的轮廓。

图 13 塑形夹持照片

为测试夹持性能, 对生活中常见物品进行了夹持试验, 夹持效果良好, 夹持成功的部分物品如表 1 所示。夹持物中既有较轻的纸盒, 也有较重的小家电(干磨机); 既有球形的水果(梨), 也有扁平状的计算器, 其材质多样, 大小不一, 形状各异, 但都能被有效地稳定夹持。图 14 列出部分夹持试验照片。从图中可以看出塑形夹持器具有很好的灵活性, 其软体夹爪能够改变自身的位姿以顺应物体的形状, 塑形薄膜在挤压物体时能够拟合物体的外轮廓并与之形成可靠约束。由于夹持器塑形面柔软, 其能够对多种材质的物体实行夹持操作, 且不会对物体表面造成损伤。

表 1 夹持物体参数

名称	尺寸/ $\left(\frac{\text{长}}{\text{mm}} \times \frac{\text{宽}}{\text{mm}} \times \frac{\text{高}}{\text{mm}}\right)$	质量/g	材质
耳机包	210×180×60	350	布
润滑脂罐	125×125×110	914	铁
纸盒	90×90×120	30	纸
塑形单元	100×100×70	1 149	铝+硅胶
圆柱容腔	113×113×90	3 095	塑料+金属块
水杯	70×70×210	291	不锈钢
计算器	165×80×15	131	塑料
干磨机	113×113×220	860	塑料+金属件
梨	100×100×110	531	水果

图 14 部分夹持物照片

5 结论

借鉴了海洋软体生物结构特点提出了一种塑形夹持方案, 即将软体夹持器与颗粒物塑形单元相结合, 得到了更轻巧和适形的夹持器, 具备简单的结构和方便的控制策略。主要结论归纳如下。

(1) 针对多形状和材质的夹持需求, 设计了软体适形夹持器, 包含软体驱动器和夹爪, 并提出了结构方案和动力传递方案。软体驱动器实现径向和轴向变形, 驱动夹爪展开或收拢, 能包裹夹持物并贴合物体的形状。

(2) 为使夹持器更好地约束工件, 试验验证颗粒物塑形原理的可行性, 研究了不同的工作参数条件下塑形单元对夹持物的约束作用。

(3) 基于设计方案, 试制完成软体夹持器并在夹爪末端集成颗粒物塑形单元。对于材质、大小和形状各异的物体, 软体夹爪能够改变自身的位姿以顺应物体的形状, 塑形薄膜能拟合物体外轮廓并与

之形成可靠约束。其能够对多种材质物体进行夹持操作,且不会对物体表面造成损伤,可为食品分拣、海洋生物研究、混流生产等领域提供有益的参考。

参 考 文 献

- [1] MARCHESE A D, KATZSCHMANN R K, RUS D. A recipe for soft fluidic elastomer robots[J]. *Soft Robotics*, 2015, 2(1): 7-25.
- [2] 曹玉君, 尚建忠, 梁科山, 等. 软体机器人研究现状综述[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(3): 25-33.
CAO Yujun, SHANG Jianzhong, LIANG Keshang, et al. Review of soft-bodied robots[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(3): 25-33.
- [3] TRIVEDI D, RAHN C D, KIER W M, et al. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research[J]. *Applied Bionics & Biomechanics*, 2008, 5(3): 99-117.
- [4] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 467-475.
- [5] FESTO. FlexShapeGripper[EB/OL]. <https://www.festo.com/group/zh/cms/10217.htm>, 2015-2017.
- [6] ILIEVSKI F, MAZZEO A D, SHEPHERD R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. *Angewandte Chemie*, 2011, 123(8): 1930-1935.
- [7] STOKES A, SHEPHERD F, MORIN A, et al. A hybrid combining hard and soft robots[J]. *Soft Robotics*, 2013, 1(1): 70-74.
- [8] Octopus-inspired robot 'hands' delicate enough to grasp a tomato[EB/OL]. <http://www.betaboston.com/news/2015/06/07/soft-robotics-octopus-inspired-robot-hands-delicate-enough-to-grasp-a-tomato/>
- [9] 朱晓强, 何国田, 吴姣娇, 等. 基于磁流变液的柔性夹持装置及夹持方法: 中国, CN103831837A[P]. 2014.
ZHU Xiaoliang, HE Guotian, WU Jiaojiao, et al. Flexible gripping device and clamping method based on magnetorheological fluid: Chinese Patent, CN103831837A[P]. 2014.
- [10] 叶敏, 熊俊涛, 罗承宇, 等. 一种多类型果蔬采摘的磁流变适型夹持器及机器人: 中国, CN 102550215 A[P]. 2012.
YE Min, XIONG Juntao, LUO Chengyu, et al. A kind of multi-type garden stuff picking of the magnetorheological fit gripper and robot: China, CN 102550215 A[P]. 2012.
- [11] LIU A J, NAGEL S R. Nonlinear dynamics: Jamming is not just cool any more[J]. *Nature*, 1998, 396(6706): 21-22.
- [12] HUIJIBEN F, HERWIJNEN F, NIJSSE R V. 3D-Formwork Systems: Customized free-form solidification[C]// *International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*, 2009: 1-4.
- [13] LI M, RANZANI T, SAREH S, et al. Multi-fingered haptic palpation utilizing granular jamming stiffness feedback actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(9): 639-650.
- [14] CIANCHETTI M, RANZANI T, GERBONI G, et al. STIFF-FLOP surgical manipulator: mechanical design and experimental characterization of the single module[C]// *proceedings of the Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2013 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2013: 3576-3581.
- [15] CHENG N G, LOBOVSKY M B, KEATING S J, et al. Design and analysis of a robust, low-cost, highly articulated manipulator enabled by jamming of granular media[C]// *proceedings of the Robotics and Automation (ICRA)*, 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012: 4328-4333.
- [16] STELTZ E, MOZEIKAA, RODENBERG N, et al. Jsel: Jamming skin enabled locomotion[C]// *proceedings of the Intelligent Robots and Systems*, 2009 IROS 2009 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2009: 5672-5677.
- [17] WALL V, DEIMEL R, BROCK O. Selective stiffening of soft actuators based on jamming[C]// *proceedings of the Robotics and Automation (ICRA)*, 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 252-257.
- [18] BROWN E, RODENBERG N, AMEND J, et al. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(44): 18809-18814.
- [19] AMEND J, BROWN E, RODENBERG N, et al. A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(2): 341-350.
- [20] BROWN E, RODENBERG N, AMEND J, et al. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material [J]. *PNAS*, 2010, 107(44): 18809-18814.

作者简介: 郭钟华(通信作者), 女, 1983年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为气动及机电一体化技术。

E-mail: gzh@njust.edu.cn

李小宁, 男, 1957年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为气动及机电一体化技术。

E-mail: xnli@139.com

林浩鹏, 男, 1991年出生, 硕士。主要研究方向为气动及机电一体化技术。

E-mail: 261412735@qq.com