

柔顺外骨骼康复机械手的研究现状*

项世传^{1,2,4} 孟巧玲^{1,2,4,5} 喻洪流^{1,2,4} 孟青云³

据统计,我国现有40岁以上脑卒中患者已达到1036万人,每年新发病在200万人以上^[1]。脑卒中是最常见的致残疾病之一,其会造成不同程度的后遗症以及中枢神经的损伤,其中70%—85%的患者会伴有偏瘫。脑卒中偏瘫患者可通过康复训练进行一定程度的功能恢复以及神经系统的重塑,在偏瘫患者的康复治疗中,手因其动作精细程度高、神经控制复杂等因素,导致了手功能康复治疗最为困难^[2]。

传统的物理康复治疗有康复医师劳动量大、康复效率低以及康复训练成本高等缺陷,康复训练机器人则可以高效率地辅助康复医师对患者进行康复训练。研究表明,患者通过外部机械辅助进行手部康复训练的康复效果比进行传统的物理治疗的效果要好^[3-6]。外骨骼康复机械手结合人的智能和机器手的机械能量,可以辅助患者进行实时、精确运动康复训练。同时对于手功能无法完全恢复的患者,其也可辅助患者进行日常生活。因此,外骨骼康复机械手逐渐成为手功能康复机构研究中的热门课题^[7]。

目前,外骨骼康复机械手有刚性外骨骼康复机械手和柔顺外骨骼康复机械手。刚性外骨骼康复机械手主要是由连杆机构、齿轮机构或绳轮机构等传统刚性构件与其连接的运动副组成五指联动机构来实现手部抓握动作。现存的外骨骼康复机械手主要以刚性传动机构为主,虽然刚性外骨骼康复机械手已经实现穿戴、康复训练及生活活动辅助的需要,但其还未被应用到临床康复中^[7]。最主要的原因是刚性外骨骼康复机械手由于通过刚性机械传动的方式实现手指各关节的活动而存在结构复杂,体积及重量较大,且穿戴适应性较差等缺点,如柏林工业大学Wege等^[35]研制的刚性外骨骼康复机械手,见图1。柔顺外骨骼康复机械手则是采用柔顺机构(通过利用材料的弹性变形来传递或转换运动、力或能量的新型机构^[8])设计理念,利用弹性体在驱动下的变形来形成手部抓握动作。相比刚性外骨骼康复机械手,柔顺穿戴式外骨骼康复机械手便携、较强的穿戴适应性、较强的柔顺性、结构简单、低成本以及安全的人机交互等特点更加适合执行

日常生活活动操作和具体任务康复训练,如美国伍斯特理工学院Nycz等^[9-10]研制的柔顺外骨骼康复机械手,见图2。柔顺外骨骼康复机械手是为解决刚性外骨骼机械手在临床应用的瓶颈问题所提出的。本文对柔顺外骨骼康复机械手的研究现状进行综述。

图1 Wege^[36]

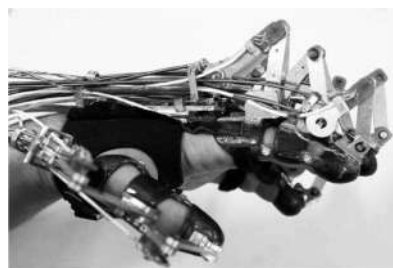


图2 Nycz^[9-10]



柔顺外骨骼康复机械手的研究目标是为手功能患者提供更加便携、舒适、有效、安全的康复训练与辅助设备。柔顺外骨骼康复机械手作为康复领域的一个新的方向,其全世界的产品数量有限,并且多数还是处于实验室研究阶段,目前还没有明确的分类。下面按照柔顺外骨骼康复机械手的驱动方式和控制信号对现有柔顺外骨骼康复机械手进行分类阐述。

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2018.04.018

*基金项目:上海市科技支撑项目(14441904402);上海市工程技术研究中心建设专项(15DZ2251700);上海市教委高校青年教师资助计划项目

1 上海理工大学医疗器械与食品学院康复工程与技术研究所,上海市,200093; 2 上海康复器械工程技术中心; 3 上海健康医学院;

4 民政部神经功能信息与康复工程重点实验室; 5 通讯作者

作者简介:项世传,男,硕士研究生; 收稿日期:2017-05-18

1 柔顺外骨骼康复机械手的驱动方式

柔顺外骨骼康复机械手按照原动机的类型,可以分为电机驱动、气压驱动和液压驱动三种驱动方式。按驱动方式进行分类的柔顺外骨骼康复机械手的主要研究成果见表1。

表1 柔顺外骨骼康复机械手驱动方式及其分类

驱动类型	优点	实验室阶段或样机
电机驱动型	体积小,动力大,响应速度快	Gauthier ^[11] 、Nycz ^[9-10] 、Delph ^[12] 、Moromugi ^[13] 、Popov ^[14] 、Nilsson ^[18] 、In ^[16-18] 、Biggar ^[19]
气压驱动型	气源方便,成本低,速度快	Sakaki ^[20] 、Hong ^[21-23] 、Lyne ^[24] 、Tze Hui.Koh ^[25]
液压驱动型	功率大,速度快,工作平稳	Polygerinos ^[26-28]

1.1 电机驱动型

电机驱动的柔顺外骨骼康复机械手的工作原理主要是由电机通过传动机构带动机械手指结构弯曲与伸展,从而带动用户进行手指抓握运动。电机驱动型的优点在于电机体积小,动力大,操作简便,响应速度快,并且宜于微机控制,适合柔顺外骨骼康复机械手的驱动与控制。电机驱动型柔顺外骨骼康复机械手的柔顺手部分主要是采用柔顺手套或者柔顺杆构成,如美国伍斯特理工学院Nycz等^[9-10]采用的是柔顺杆结构(图2),日本长崎大学Moromugi等^[13]采用的就是柔顺手套结构(图3)。电机驱动型的传动机构主要是采用绳索传动,绳索连接电机与柔顺手部分,通过电机带动绳索的伸缩从而带动柔顺手的弯曲和伸展,如Popov^[14]和Gauthier等^[11]研制的柔顺外骨骼康复机械手。

瑞典皇家理工学院Nilsson等^[15]研制的一款用于提升用户日常生活抓握能力的柔顺外骨骼康复机械手就是采用电机驱动绳索带动柔顺手套运动的方式。其电机和电源都安装在远离柔顺手端的背包里,通过绳索将电机与柔顺手相连,这样能够减轻用户手掌端的负重,更加适宜用户穿戴以及日常生活辅助,但是通过绳索机构进行远程传动时,其传动效率会有损失,如图4所示。与Nilsson等^[15]类似的还有In^[16-18]、Moromugi^[13]、Delph等^[12]的研究。Popov^[14]的研究则不同于Nilsson等^[15],其电机直接安装在了柔顺手套的手背侧,这样不会对手臂的其他关节如腕关节造成约束,同时绳索传动距离短,传动效率高。但是,这样就会造成机械手端配件过多,体型过于笨重,不满足便携穿戴的需求,如图5所示。这些研究采用的都是柔顺手套结构,具有较高的柔度,能够满足患者对穿戴适应性的需求,同时具有安全的人机交互,但是其刚度较低,无法较好的实现力量的补偿与控制,因此无法较好的实现对力量有一定要求的肌肉功能训练以及日常生活辅助。与上述研究不同,Nycz等^[9-10]的柔顺手部分采

用的是柔顺杆结构,该结构具有一定的刚度,有较好实现力量补偿与控制的潜能,但是该样机的指尖施加力量只有8.7N左右,难以满足肌肉功能训练以及日常生活辅助的需求。该研究手部机构重量在113g左右,同时其整体重量在867g左右,能够满足患者对设备轻便易携的需求。

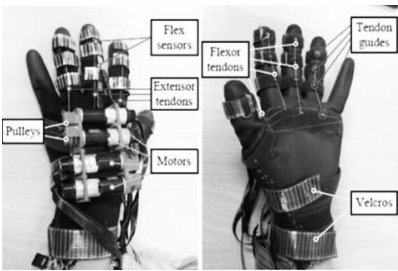
图3 Moromugi^[13]



图4 the SEM Glove^[15]



图5 GraspyGlove^[14]



1.2 气压驱动型

气压驱动的柔顺外骨骼康复机械手的工作原理是通过控制气压泵的增减压来控制带气体通道弹性变形单元的屈曲和伸展,从而带动与弹性变形单元固定的手指的屈曲和伸展运动。气压驱动型的优点是其气源方便,成本低,不存在泄露污染,同时其响应速度快,操作比较简单。采用的气压驱动系统的柔顺外骨骼康复机械手的研究有日本国立冈山大学的Sakaki等^[20]、新加坡国立大学的Hong等^[21-23]、哈佛大学的Lyne等^[24](图6)以及新加坡国立大学的Tze Hui.Koh等^[25](图7)。

图6 Lyne^[24]

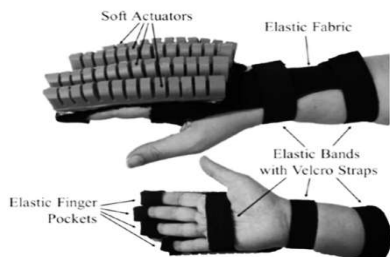
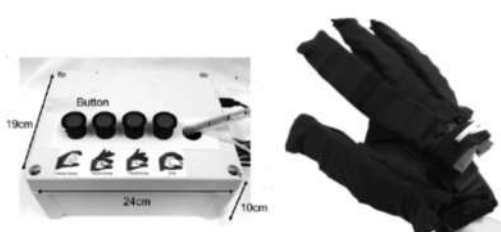


图7 Tze Hui.Koh^[25]



Sakaki^[20]、Hong^[21-23]、Lyne^[24]和Tze Hui.Koh等^[25]都是通过研制特定的气动肌肉作为弹性变形单元,这些弹性变形单元在气压泵的增减压变化下能够完成与手指运动相对应的弯曲伸展运动。气压驱动的柔顺外骨骼康复机械手由于采用的是弹性变形单元,因此,柔顺手部分具有更大的柔顺度以及更好的穿戴适应性。但是由于这些设备采用气压泵的方式来驱动弹性变形单元,因此外设驱动单元体积结构较大,只能实现康复训练或固定位置的生活活动辅助。同时,由于采用的是气压传动的传动方式,因为空气的可压缩性,所以不易实现准确的速度控制和很高的定位精度,负载变化对系统的稳定性影响较大。

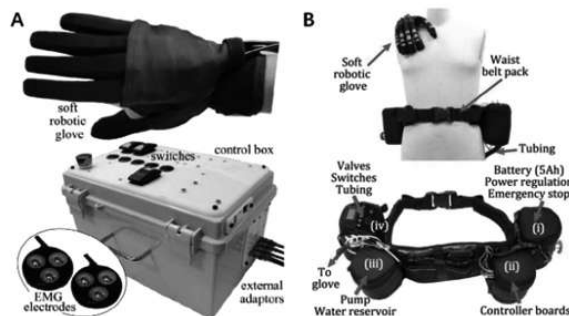
1.3 液压驱动型

液压驱动的柔顺外骨骼康复机械手机构的工作原理与气压驱动的柔顺外骨骼康复机械手机构工作原理类似,区别在于其是通过控制液压泵的增减压来控制带液压油通道弹性变形单元的屈曲和伸展,从而带动与弹性变形单元相固定的相应手指的屈曲和伸展运动。液压驱动型的优点在于其输出功率大,响应速度快,工作平稳,易于实现自动化及过载保护。如哈佛大学的Polygerinos等^[26-28]研制的用于患者康复和进行功能性抓握的柔顺外骨骼康复机械手。

Polygerinos等^[26-27]通过对特定的弹性变形单元进行研制,使其在液压泵增减压的过程中能够实现与患者手指相对应的弯曲与伸展运动。其研制的弹性变形单元是多段的,在液压驱动下可以引起特定复杂的弯曲、扭转和伸展轨迹。Polygerinos等^[26-27]前期是计划患者在轮椅上进行康复训练,如图8A所示,因此将液压泵和机电组件都安置在了一个置

于轮椅背侧的控制箱中,减轻患者手部重量,但是这样患者只能在轮椅上进行康复训练和日常生活辅助,不够便携。在后期研究中,Polygerinos等^[28]又将液压泵和机电组件集成为四组安装在腰部系带包中,方便用户携带,见图8B。但是由于液压组件较多,此手部机构重量仍有285g左右,不够轻便。

图8 Polygerinos^[26-28]



2 柔顺外骨骼康复机械手的控制信号

柔顺外骨骼康复机械手常见的输入控制信号主要有生物电信号,运动学信号以及动力学信号三种。按控制信号进行分类的柔顺外骨骼康复机械手的主要研究成果见表2。

表2 柔顺外骨骼康复机械手控制信号及其分类

控制信号	优点	实验室阶段或样机
生物电信号	采集方便及时,有益于改善机电系统的滞后效果	Nycz ^[9-10] 、Tze Hui.Koh ^[25] 、Zhao ^[30] 、Kadowaki ^[31] 、Saleem ^[32]
运动学信号	采集方便,易于控制,能够对系统进行简单的控制	Popov ^[14] 、In ^[16-18] 、Toya ^[33] 、Tze Hui.Koh ^[25]
动力学信号	及时反馈运动情况,提高控制训练效果	Moromugi ^[13] 、Nilsson ^[15] 、Baker ^[34]

2.1 生物电信号

人体生物电信号通常指脑电(Electroencephalogram, EEG)、心电(Electrocardiogram, ECG)、肌电(Electromyogram, EMG)、眼电(Electrooculogram, EOG)以及各种自发和诱发神经电位等^[29]。在康复机器人控制领域,采用最多的还是肌电信号(EMG),有些还会采用脑电信号(EEG)进行控制。

肌电信号(EMG)是实时变化的,然而这些变化是有规律的。不同手部动作对应的特征不同,只有捕捉到不同的特征并有效区分这些特征,就能实现对手部动作良好的控制。如新加坡国立大学的Tze Hui.Koh等^[25]就是通过两个肌电信号(EMG)传感器来检测患者控制手指运动的前臂肌肉信号,从而判断患者的运动意图,再由柔顺外骨骼机械手带动患者患肢进行运动,见图7。与Tze Hui.Koh等^[25]研究类似

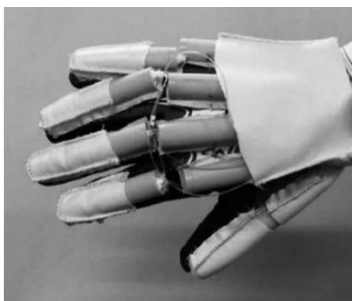
的还有Nycz^[9-10]、Zhao等^[30]研制的用于康复训练的柔顺外骨骼康复机械手。

苏丹卡布斯大学Saleem等^[32]研制了一款用于运动神经元损伤病人的脑电控制柔顺外骨骼康复机械手。对于那些肌电信号(EMG)不稳定的患者,脑电信号(EEG)是一个可行的方案。Saleem等^[31]通过置于患者头皮的电极来采集脑电信号(EEG),通过程序判断患者的运动意图,从而带动患者手进行运动。生物电信号控制的优点在于其即时性控制可以减轻机电系统的滞后效果,使得柔顺外骨骼康复机械手的动作自然,仿生性能好,康复训练效果更加明显^[34]。

2.2 运动学信号

运动学信号主要是设备特定部位或手指关节处与位置、方向、速度和加速度相关的信号。运动学信号控制原理主要是通过传感器采集特定部位的初始运动学信号变化,从而判断患者运动意图,由柔顺外骨骼机械手带动患者患肢进行运动。如日本东芝公司Toya等^[32]研制的一款力量辅助柔顺外骨骼机械手,其就是通过置于机械手指处的角度传感器检测到的角度初始变化,从而判断患者意图带动患者运动,如图9所示。与Toya等^[32]研究类似的还有韩国首尔国立大学In等^[16-18]研制的SNU Exo-Glove,其采用的也是弯曲角度传感器,不过其不是检测手指的角度变化,而是通过监测腕关节的运动来识别患者的运动意图进行控制。

图9 Power-Assist Glove^[32]



新加坡国立大学Tze Hui.Koh等^[25]研制的柔顺外骨骼机械手除了运用肌电信号(EMG)进行控制外,其还采用了运动学信号控制。Tze Hui.Koh等^[25]的运动学信号控制模式是通过弯曲传感器采集健侧手的运动信息,从而带动患肢进行运动。韩国技术教育大学Popov等^[14]同时采用了弯曲传感器和红外测距传感器,通过弯曲小指进行运动意向控制,同时通过红外测距传感器反馈与物体之间的距离,提升了控制训练的精度,如图5所示。运动学信号控制方法的优点就是其运动学信号采集方便,易于控制。

2.3 动力学信号

动力学信号主要是表现在设备各个关节或末端操纵装置的与力矩或力相关的信号。其控制原理与运动学信号控

制相似,都是通过传感器采集相应的信号,然后通过采集到的动力学信号对患者手部进行辅助控制。如日本长崎大学Moromugi等^[13]研制的用于辅助康复手指功能的柔顺外骨骼机械手,如图3所示,其通过可检测肌肉收缩的触觉传感器来进行控制。患者可通过收缩传感器所检测的肌肉向驱动系统传达驱动意图,再由柔顺外骨骼机械手带动患者手进行运动。

瑞典皇家理工学院的Nilsson等^[15]研制的用于提升用户日常生活抓握能力的The SEM Glove不同于Moromugi等^[13]的研究,其面向的用户是具有一定的抓握能力的患者。该柔顺外骨骼机械手的作用是通过指尖的触觉传感器和手掌端的力传感器判断患者抓握物体所需的力,再由驱动系统提供所需的辅助力,从而提升用户的日常生活抓握能力。与Nilsson等^[15]研究类似的还有美国新泽西大学的Baker等^[33]研制的辅助矫形外骨骼机械手,其面向的用户同样是具有一定抓握能力的患者。Baker等^[33]在柔顺机械手每根手指的指尖和手指底端分别装了力传感器,从而在用户抓握过程中,根据传感器的力的反馈提供不同力量的辅助。动力学信号普遍是用于辅助控制的,通过运动过程中动力学信号的反馈,能对柔顺外骨骼康复机械手进行更好的控制。

3 小结

通过对本文列举的研究成果进行分析,现在柔顺外骨骼康复机械手大部分仍然处于实验室研究阶段。这些柔顺外骨骼康复机械手基本实现了轻便易携,可用于康复训练并能够协助患者进行康复训练以及日常生活辅助,但是在舒适性及安全性上还需进一步验证与优化。因此,还需要对以下三方面进行进一步的研究:①柔顺变形单元材料性能的改进。研制一种具有合理的刚度和柔度的材料,使柔顺单元能够满足患者对柔顺度以及力量辅助的需求。②柔顺变形单元的变形特性与人手手指关节的运动耦合研究。使柔顺外骨骼康复机械手能与人手指的生物力学结构更加的匹配,使患者佩戴进行康复训练与日常生活辅助时更加舒适与有效。③柔顺外骨骼康复机械手体积重量的改进。对于手功能障碍的偏瘫患者,训练设备越轻便,越有助于患者进行康复训练以及日常生活辅助。

随着全世界脑卒中发病率的逐年升高,人们对康复和辅助技术的实际应用需求将会持续增长。由于手部功能的重要性,手部功能康复不只局限在康复训练,还应考虑生活活动辅助。因此具有轻便易携,结构简单,穿戴适应性强等优点的柔顺外骨骼康复机械手在手功能康复的临床应用中具有广阔的发展前景。相信在不久的将来,柔顺外骨骼康复机械手会成为手功能康复中必不可少的一环,让更多的患者能够独立生活,重获健康。

参考文献

- [1] 贾晓宏. 40岁以上脑卒中患者过千万[N]. 北京晚报, 2013-10-27 (2).
- [2] 贾杰. 脑卒中后手功能康复现状[J]. 老年医学与保健, 2015, 21(3):129—131.
- [3] Takahashi CD, Der-Yeghiaian L, Le V, et al. Robot-based hand motor therapy after stroke[J]. Brain, 2008, 131(Pt 2): 425—437.
- [4] Wolf SL, Winstein CJ, Miller JP, et al. Effect of constraint-induced movement therapy on upper extremity function 3 to 9 months after stroke: the excite randomized clinical trial [J]. JAMA, 2006, 296(17):2095—2104.
- [5] Ueki S, Kawasaki H, Ito S, et al. Development of a hand-assist robot with multi-degrees-of-freedom for rehabilitation therapy[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(1):136—146.
- [6] Kutner NG, Zhang R, Butler AJ, et al. Quality-of-life change associated with robotic-assisted therapy to improve hand motor function in patients with subacute stroke: A randomized clinical trial[J]. Physical Therapy, 2010, 90(4):493—504.
- [7] Heo P, Gu GM, Lee SJ, et al. Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2012, 13(5):807—824.
- [8] Howell LL. Compliant Mechanisms[J]. Encyclopedia of Nanotechnology, 2013, (10):457—463.
- [9] Arata J, Ohmoto K, Gassert R, et al. A new hand exoskeleton device for rehabilitation using a three-layered sliding spring mechanism[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2013:3902—3907.
- [10] Nycz CJ, Bützer T, Lamercy O, et al. Design and characterization of a lightweight and fully portable remote actuation system for use with a hand exoskeleton[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2016, 1(2):1—1.
- [11] Nd DM, Fischer SA, Gauthier PW, et al. A soft robotic exomusculature glove with integrated sEMG sensing for hand rehabilitation[C]. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 2013:1—7.
- [12] Nycz CJ, Delph MA, Fischer GS. Modeling and design of a tendon actuated soft robotic exoskeleton for hemiparetic upper limb rehabilitation[C]. International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE, 2015:3889—3892.
- [13] Moromugi S, Kawakami K, Nakamura K, et al. A tendon-driven glove to restore finger function for disabled[C]. Iccas-Sice. IEEE, 2009:794—797.
- [14] Popov D, Gaponov I, Ryu JH. Portable exoskeleton glove with soft structure for hand assistance in activities of daily living[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016 (99):1—1.
- [15] Nilsson M, Ingvast J, Wikander J, et al. The soft extra muscle system for improving the grasping capability in neurological rehabilitation[C]. Biomedical Engineering and Sciences. 2012:412—417.
- [16] Jeong U, In HK, Cho KJ. Implementation of various control algorithms for hand rehabilitation exercise using wearable robotic hand[J]. Intelligent Service Robotics, 2013, 6 (4):181—189.
- [17] In H, Kang BB, Sin MK, et al. Exo-Glove: A wearable robot for the hand with a soft tendon routing system[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2015, 22(1):97—105.
- [18] In H, Cho KJ. Evaluation of the antagonistic tendon driven system for SNU Exo-Glove[C]. International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. IEEE, 2012:507—509.
- [19] Biggar, S, Yao, W. Design and evaluation of a soft and wearable robotic glove for hand rehabilitation[J]. IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering, 2016:1—1.
- [20] Noritsugu T, Yamamoto H, Sasaki D, et al. Wearable power assist device for hand grasping using pneumatic artificial rubber muscle[C]. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. 2004:420—425.
- [21] Hong Kai Yap, James Cho Hong Goh, Raye Chen Hua Yeow. Design and Characterization of Soft Actuator for Hand Rehabilitation Application[M]// 6th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering. Springer International Publishing, 2015:367—370.
- [22] Hong KY, Nasrallah F, Lim JH, et al. MRC-glove: A fMRI compatible soft robotic glove for hand rehabilitation application[C]. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. 2015.
- [23] Yap HK, Lim JH, Nasrallah F, et al. Characterisation and evaluation of soft elastomeric actuators for hand assistive and rehabilitation applications[J]. Journal of Medical Engineering & Technology, 2016:1.
- [24] Polygerinos P, Lyne S, Wang Z, et al. Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation[C]. IEEE/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013:1512—1517.
- [25] Hong KY, Knin PM, Koh TH, et al. A fully fabric-based bi-directional soft robotic glove for assistance and rehabilitation of hand impaired patients[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2017, 2(3):1383—1390.

(下转第 474 页)