

张拉整体机器人建模及静态坡面研究^①

赵凯凯^{②*} 常 健^{*} 李 斌^{*} 杜汶娟^{***}

(* 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

(** 中国科学院机器人与智能制造创新研究院 沈阳 110016)

(*** 中国科学院自动化研究所 北京 100190)

(**** 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 张拉整体机器人具有高的强度质量比、良好的减振性以及可变形能力,可以适应多种地形,且具有多种运动步态。为了实现机器人可以在多地形上运动,本文针对张拉机器人静态坡面展开研究,利用 Matlab 图形用户界面(GUI)制作了张拉整体机器人人机界面对处于不同状态的机器人的临界翻滚坡度进行了求解。针对机器人动力学建模较为困难,采用 open dynamic engine (ODE) 仿真平台进行建模。最后搭建实验平台进行实验,并将仿真结果与物理实验结果进行了对比,验证了仿真结果的正确性。同时,这也验证了动力学模型的正确性。

关键词 张拉整体机器人; ODE 仿真; 张拉整体结构; 临界翻滚坡度; 动力学仿真

0 引 言

近些年来,移动机器人多用在军事任务、空间探测、灾后救援等领域。移动机器人通常分为刚体机器人和软体机器人。其中,刚体机器人以刚性结构为主,根据运动形式可大致分为轮式^[1]、腿式^[2]、履带式^[3]等,具有机构刚度大、控制精度高、负载能力强等优点,但是其机械结构复杂、自由度固定、环境适应性较差,多用于已知环境下。而软体机器人由软体材料构成,具有柔顺性好、变形能力强、自由度高,可抓取不规则物体或者易碎物体,但存在制造困难、负载能力差、难以建模的问题^[4]。因此,为了兼顾刚体机器人和软体机器人的优点,将张拉整体结构的概念引入到移动机器人领域中,即在柔性材料中嵌入刚性材料,可实现张拉整体机器人具有较大的强度质量比以及一定的负载能力,同时还具有较

强的可变形能力和减震能力。

张拉整体结构可追溯到 20 世纪 20 年代,其是由一系列连续的弹性拉索和不连续的刚性压杆构成具有稳定体积的力网络结构^[5,6]。其中,弹性拉索仅承受拉力,而刚性压杆仅承受压力。该结构最早应用在艺术、建筑、土木等领域,例如穹顶^[7]、桥梁等。随后又被生物学家用来描述细胞骨架^[8]以及动物肌肉骨骼^[9]等。在工程方面,由于该结构具有展开性,可用于反射天线的结构设计^[10]。

张拉整体结构首次由 Paul 等人^[11]提出,他们研制了 3 压杆和 4 压杆张拉整体机器人,对蠕动步态进行了研究,表明张拉整体机器人具有容错性。由于 6 杆张拉整体机器人结构相对简单且能实现多种步态,因此众多研究人员对其展开研究。日本立命馆大学^[12]提出了基于气动人工肌肉的 6 杆张拉整体机器人,并对其初步形态以及滚动步态进行了研究。美国航空航天局(NASA)^[13,14]、哈尔滨工程

① 国家自然科学基金(61803365)资助项目。
② 男,1995 年生,硕士;研究方向:张拉整体机器人;联系人,E-mail: zhaokaikai@sia.cn
(收稿日期:2019-06-25)

大学^[15]等机构对张拉整体机器人的结构以及步态展开了相关研究,且均在平坦地形下展开研究,而对于张拉整体机器人在斜坡上的运动研究较少。中国科学院沈阳自动化研究所^[16]分析了 6 杆张拉整体机器人位于斜坡上的一种低重心的构型,可避免机器人向下滚落的情况。加州伯克利大学^[17]通过改变致动器的数量对机器人在斜坡上的滚动进行研究,可分别有效实现适合机器人在倾斜表面运动和提升运动速度,并利用仿真和物理实验进行了相关验证,但是并未对机器人与坡度的关系进行研究。本文首先对张拉整体机器人进行数学建模,随后对其临界翻滚角度进行分析,最后利用 open dynamic engine (ODE) 仿真平台对机器人建模并进行了仿真和实验。

1 张拉整体机器人

该机器人为第 2 代电驱动张拉整体机器人(见图 1),一共包含 6 根中空的铝杆和 24 条弹性拉索。其中,铝杆长为 650 mm,外径为 30 mm,内径为 28 mm,它的每一端都设计了一个空心方块体(见图 2),具体尺寸为 80 mm × 80 mm × 120 mm,壁厚为 1 mm,用来保护 2 个舵机及控制单元。中空的铝杆中放置 1 块锂电池,为舵机及控制单元供电。在方块体上添加一个半球形泡沫塑料使机器人始终与地面保持接触,同时还能增加与地面的摩擦力。弹性

拉索(见图 3)是由弹簧和刚性绳索组成,通过动滑轮进行连接,这样的设计使得作用在弹性拉索的力变为舵机输出力的 2 倍。此外,挂有螺母的绳索与舵盘相连,另一根绳索固定在方块体上。

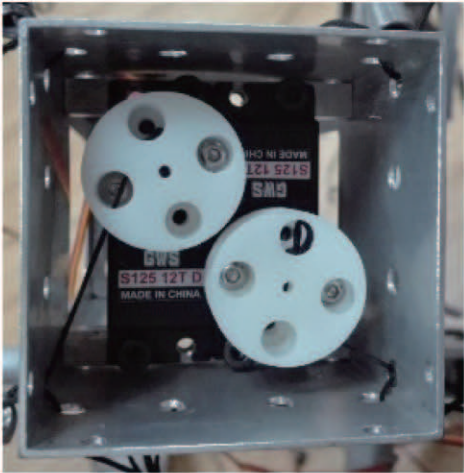


图 2 空心方块体

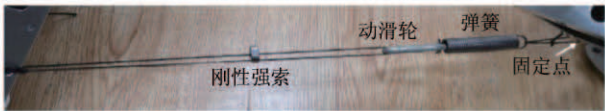


图 3 拉索组成构件

2 张拉整体机器人数学建模

6 杆张拉整体机器人是基于张拉整体结构组成的,因此,可首先描述该结构的数学模型。6 杆张拉整体结构有 6 根压杆和 24 个弹性拉索,如图 4 所示,对节点进行编号。其中,细黑线表示弹性拉索成员,粗线表示压杆成员。

由图 4 可知,张拉整体结构有 12 个节点。在图示坐标系中,对于第 i 个节点,可表示为

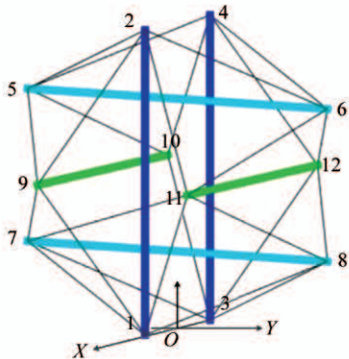


图 4 6 杆张拉整体结构



图 1 6 杆张拉整体机器人样机

$$\mathbf{n}_i = [x_i, y_i, z_i]^T \quad i = 1, 2, \dots, 12 \quad (1)$$

张拉整体结构可通过节点表示出来,其暗含了压杆和弹性拉索的长度以及相邻压杆与弹性拉索的角度等信息。

对于张拉整体结构,压杆和弹性拉索通过节点相互连接,因此均可由节点坐标进行表示。结构中的第 p 个压杆成员定义为 $\mathbf{b}_p$, 可表示为

$$\mathbf{b}_p = \mathbf{n}_{2p} - \mathbf{n}_{2p-1} \quad p = 1, \dots, 6 \quad (2)$$

取结构中第 k 个弹性拉索成员为 $\mathbf{s}_k$, 该弹性拉索的 2 个节点分别为 $\mathbf{n}_{j_k}$ 和 $\mathbf{n}_{i_k}$, 该拉索可表示为

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{n}_{j_k} - \mathbf{n}_{i_k} \quad k = 1, \dots, 24 \quad (3)$$

其中 i_k 和 j_k 的值见表 1。

表 1 i_k 和 j_k 的取值

拉索	节点		拉索	节点	
	i_k	j_k		i_k	j_k
S_1	1	7	S_7	3	3
S_2	7	9	S_8	7	7
S_3	9	1	S_9	10	10
S_4	1	8	S_{10}	3	3
S_5	8	11	S_{11}	8	8
S_6	11	1	S_{12}	12	12
S_{13}	2	5	S_{19}	4	5
S_{14}	5	9	S_{20}	5	10
S_{15}	9	2	S_{21}	10	4
S_{16}	2	6	S_{22}	4	6
S_{17}	6	11	S_{23}	6	12
S_{18}	11	2	S_{24}	12	4

由式(1)~(3)可分别得到张拉整体结构的节点矩阵 $\mathbf{N}$ 、压杆成员矩阵 $\mathbf{B}$ 、弹性拉索成员矩阵 $\mathbf{S}$ 。

$$\mathbf{N} = [\mathbf{n}_1, \dots, \mathbf{n}_{12}]$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_6] \quad (4)$$

$$\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_{24}]$$

张拉整体结构的整个成员矩阵可写为

$$\mathbf{M} = [\mathbf{B}, \mathbf{S}] \quad (5)$$

为了建立结构的节点矩阵与成员矩阵之间的关系,引入了连接矩阵。连接矩阵的每一行表示一个成员与所有节点之间的关系。连接矩阵的每个值可以通过式(2)和式(3)得到。连接矩阵中的元素只包括 -1, 0 和 1。“0”代表节点不是该成员的端点,

“1”代表节点为成员向量的终止点,“-1”表示节点为该成员向量的初始节点。

由于张拉整体结构由压杆和弹性拉索组成,因此连接矩阵可以描述为

$$\mathbf{C} = [\mathbf{C}_B; \mathbf{C}_S] \quad (6)$$

其中, $\mathbf{C}$ 为张拉整体结构的连接矩阵, $\mathbf{C}_B$ 和 $\mathbf{C}_S$ 分别为压杆和弹性拉索的连接矩阵。

由此,根据连接矩阵的定义,可得到如下等式:

$$\mathbf{M} = \mathbf{NC}^T \quad (7)$$

至此,建立起张拉整体机器人的数学模型。

3 临界翻滚坡度分析

3.1 滚动原则

机器人重心与底边三角形投影的关系可分为 2 种情况,如图 5 所示。其中, G 为张拉整体机器人的重心, G' 为机器人重心的投影, ijk 为底边接触的三角形,带有颜色的区域为底边三角形在水平面的投影。当重心的水平面投影在底边三角形的水平面投影区域时,机器人处于稳定状态,如图 5(a) 所示。反之,将发生滚动,如图 5(b) 所示。

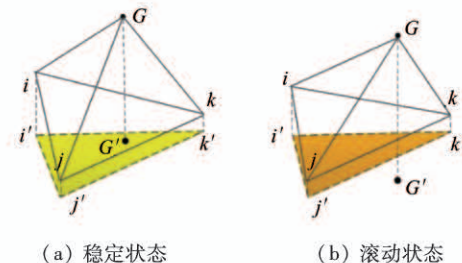


图 5 滚动原则

依据滚动原则,利用 Matlab 图形用户界面(GUI)设计了张拉整体机器人人机交互界面,如图 6 所示。

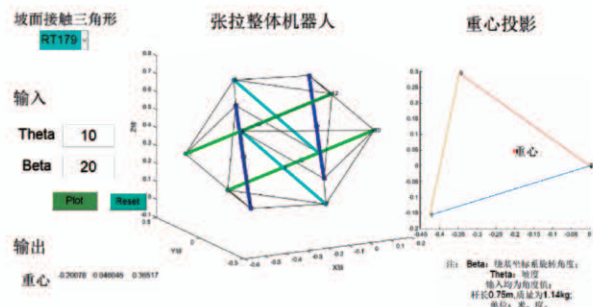


图 6 张拉整体机器人人机交互界面

首先可选择与坡面接触的三角形类型,之后通过输入斜坡的角度 θ 和机器人绕 Z 轴旋转的角度 β ,点击“Plot”,生成张拉整体机器人的结构 3 维图以及重心与坡面接触三角形的 3 维图。

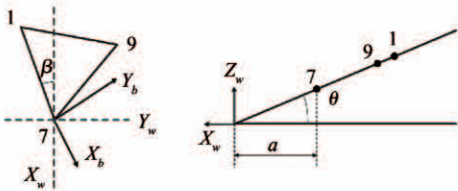
3.2 临界翻滚坡度

张拉整体机器人由于坡度以及摆放姿态的角度不同,其重心会发生变化。当斜坡的角度达到临界坡度时,无论机器人摆放何种姿态,机器人都能稳定在斜坡上,即要保证机器人的重心位于底边三角形在水平面的投影区域内。

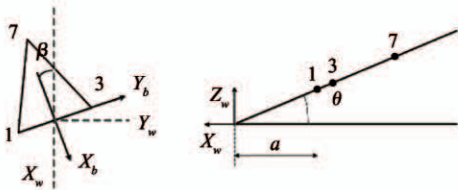
对于张拉整体机器人来说,有 2 种初始状态:

(1) 机器人与坡面接触为 RT 三角形

当机器人与坡面接触的三角形为 RT179 时,如图 7(a)所示,坐标轴下标为 w 的表示基坐标系,下标为 b 的表示体坐标系, θ 为坡度, β 为 X_b 与 X_w 的夹角,且逆时针旋转, a 为 2 个坐标系原点在水平面的距离。此时,机器人关于轴对称,因此, β 的取值范围为 $0 \sim 120^\circ$,为逆时针旋转。



(a) 底边为 RT179



(b) 底边为 IT137

图 7 初始状态

通过在张拉整体机器人人机界面输入不同的 θ 和 β ,可得到张拉整体机器人的不同位姿,观察机器人重心的位置。经过反复计算可知,底边为 RT179 时,机器人临界翻滚坡度在 22° 左右,其中, β 值为旋转 $80 \sim 90^\circ$ 时,机器人的重心的水平面投影靠近 17 边的水平面投影,故机器人有沿底边 17 翻滚的趋势。

(2) 机器人与坡面接触为 IT 三角形

当机器人与坡面接触的三角形为 IT137 时,如图 7 (b)所示,坐标轴下标为 w 的表示基坐标系,下标为 b 的表示体坐标系, θ 为坡度, β 为 X_b 与 X_w 的夹角, a 为 2 个坐标系原点在水平面的距离。此时,机器人关于平面对称,因此, β 的取值范围为 $-90 \sim 90^\circ$,且为逆时针旋转。

分析方法同 RT179,利用张拉整体机器人人机界面可得,底边为 IT137 时,机器人临界翻滚坡度在 17° 左右,其中, β 值为 $5 \sim 45^\circ$ 时,机器人的重心的水平面投影靠近 17 边的水平面投影,机器人有沿底边 17 翻滚的趋势。

4 仿真及实验

4.1 ODE 仿真

ODE 是一个免费的具有工业品质的动力学仿真平台。该平台可以模拟真实环境下物体的动力学。在该平台建立的物体包括 2 部分: body 和 geom。其中, body 包括物体的位姿和材料参数(例如密度、质量)等; geom 包括物体的形状参数,例如直径、长度、位姿信息。相比于 ADAMS 来说,只需要改变机器人的位姿便可对机器人展开研究。对于张拉整体机器人(见图 8),压杆采用两头为半球形的实心构件来模拟真实的杆件,弹性拉索简化为 2 个万向关节,通过滑移关节进行连接来模拟弹簧的伸缩。压杆和弹性拉索的连接采用万向节。ODE 仿真过程如图 9 所示。由于弹性拉索的质量远小于压杆的质量,因此,可以忽略弹性拉索的质量。机器人在 ODE 中建模的其余结构参数见表 2。

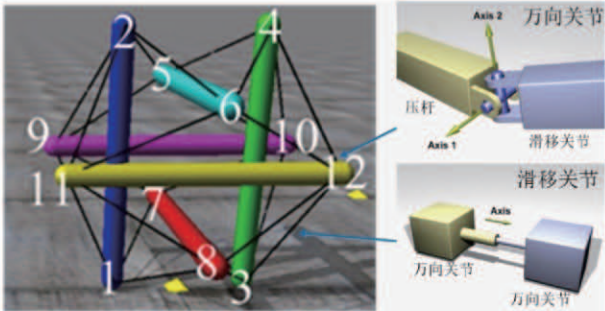


图 8 张拉整体机器人仿真模型

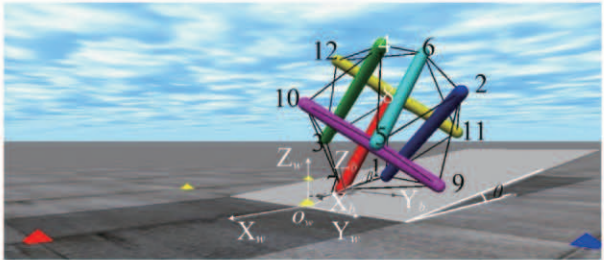


图 9 ODE 仿真过程

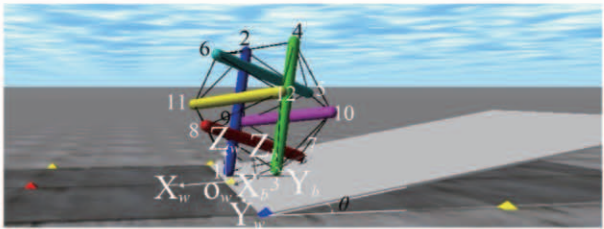
表 2 张拉整体机器人构件参数

构件	长度(m)	半径(m)	质量(kg)
压杆	0.75	0.03	1.14
弹性拉索	0.459	0.003	0.04

随后,通过式(8)进行齐次变换,建立坐标系,如图 10 所示。



(a) 底边三角形为 RT179



(b) 底边三角形为 IT137

图 10 张拉整体机器人模型

$${}^b_w T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cdot \cos(\alpha) & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \cdot \sin(\alpha) & -a \\ \sin(\theta) \cdot \cos(\alpha) & \cos(\theta) & \sin(\theta) \cdot \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & a/\tan(a) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(8)

随后,改变 θ 和 β 的值,可得到如下结果:

(1) 底边为 RT179 时,无论 β 取何值都能稳定在斜坡上的临界翻滚坡度为 18° 。其中, β 值为 $80 \sim 90^\circ$ 时,机器人开始出现不稳定状态,有沿边 17 翻滚的迹象,这与 Matlab 计算得到的结果一致。

(2) 底边为 IT137 时,无论 β 取何值都能稳定在斜坡上的临界翻滚坡度为 14° ,而且 β 取值为 $5 \sim 45^\circ$ 时,机器人有沿边 17 翻滚的迹象,与 Matlab 计算的结果一致。

可以看出,ODE 仿真结果与 Matlab 的计算结果有差异,这是由于机器人在 ODE 仿真平台中压杆的末端为半球形结构,导致拉索变短,使得机器人的重心略有前倾,导致与理论值有所差别。

4.2 实验验证

为了验证上述仿真结果的正确性,搭建了实验平台,如图 11 所示。其中,数显倾角仪可以显示坡度值,分辨率为 0.1° 。海绵垫是为了增大机器人与坡面的摩擦力。

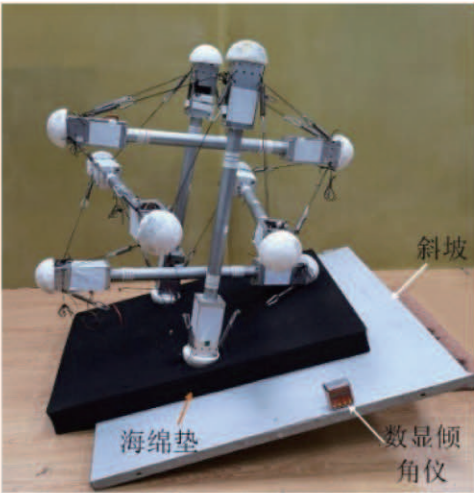


图 11 实验平台搭建

通过反复进行实验,发现张拉整体机器人底边三角形为 RT 时,机器人可以稳定在坡度 17.8° 左右,见图 12。底边三角形为 IT 时,机器人的临界翻滚坡度为 14.7° 左右,见图 13。由此可知实验结果与仿真结果相近验证了建立的仿真模型的正确性。

5 结 论

本文首先对 6 杆张拉整体机器人结构进行了描

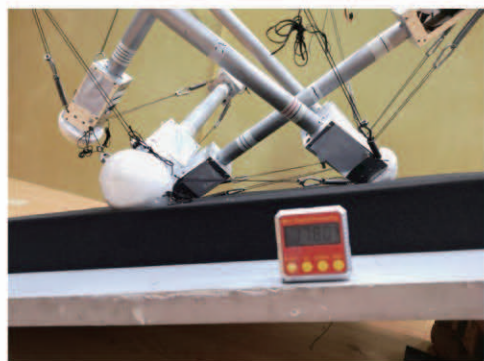


图 12 底边三角形为 RT

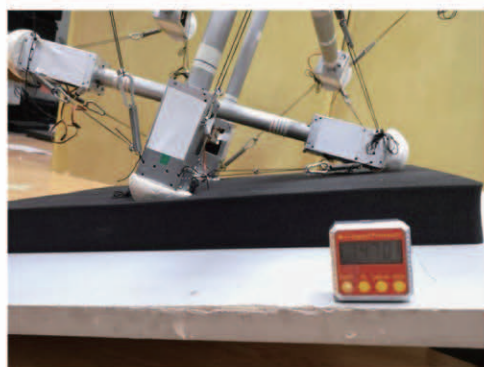


图 13 底边三角形为 IT

述和数学建模。随后利用 Matlab 软件和 ODE 仿真平台对 6 杆张拉整体机器人建立张拉整体机器人的仿真模型,并根据翻滚原则对临界翻滚坡度进行了分析,最后搭建实验平台进行实验,将仿真结果和实验结果进行了对比,验证了临界翻滚坡度仿真结果的正确性和仿真模型的合理性。本文的主要贡献包括:

(1) 建立了张拉整体机器人的数学模型,并设计了张拉整体机器人的人机界面,通过输入参数,可以获得机器人的位姿以及重心的位置。

(2) 利用 ODE 动力学平台建立了仿真模型,对机器人处于静态坡面的情形进行了研究,确定了机器人的临界翻滚坡度,并通过实验进行了验证。

未来将利用 ODE 仿真平台建立的机器人仿真模型对张拉机器人的动力学以及斜坡滚动方向展开研究。

参考文献

- [1] O'halloran D, Wolf A, Choset H. Design of a high-impact survivable robot[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2005, 40(12): 1345-1366
- [2] 陈腾,李贻斌,荣学文. 四足机器人动态下实时足底力优化方法的设计与验证[J]. *机器人*, 2019, 41(3): 307-316
- [3] Edlinger R, Andreas P, Zauner M. Mechanical design and system architecture of a tracked vehicle robot for urban search and rescue operations[C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Research and Education in Robotics, Heidelberg, Germany, 2011: 46-56
- [4] 王田苗,郝雨飞,杨兴帮,等. 软体机器人:结构、驱动、传感与控制[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(13): 1-13
- [5] Lee S, Lee J. A novel method for topology design of tensegrity structures [J]. *Composite Structures*, 2016, 152: 11-19
- [6] Zhang L Y, Zhao H P, Feng X Q. Constructing large-scale tensegrity structures with bar-bar connection using prismatic elementary cells [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2015, 85(3): 383-394
- [7] Hanaor A. Aspects of design of double-layer tensegrity domes [J]. *International Journal of Space Structures*,

- 1992, 7(2):101-103
- [8] Ingber D E. The architecture of life[J]. *Scientific American*, 1998, 278(1):48-57
- [9] Vogel S, Berg H C. Cats' paws and catapults; mechanical worlds of nature and people [J]. *Physics Today*, 1998, 51(12):50-52
- [10] Knight B F. Deployable Antenna Kinematics Using Tensegrity Structure Design[D]. Gainesville: University of Florida, 2000
- [11] Paul C, Roberts J W, Lipson H, et al. Gait production in a tensegrity based robot[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Robotics, Seattle, USA, 2005: 216-222
- [12] Koizumi Y, Shibata M, Hirai S. Rolling tensegrity driven by pneumatic soft actuators[C]//Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, USA, 2012: 1988-1993
- [13] Kim K, Agogino A K, Moon D, et al. Rapid prototyping design and control of tensegrity soft robot for locomotion [C]//Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014), Bali, Indonesia, 2014: 7-14
- [14] Sabelhaus A P, Bruce J, Caluwaerts K, et al. System design and locomotion of superball, an untethered tensegrity robot[C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, USA, 2015: 2867-2873
- [15] Luo A, Liu H, Liu Y. Analyzing the driving method for the ball tensegrity robot [C]//Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Qingdao, China, 2016: 2069-2074
- [16] Du W, Ma S, Li B, et al. A low-CG configuration realization method for increasing the stability of the TR-6 on a slope[C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Beijing, China, 2015: 1834-1839
- [17] Lee-Huang C, Brian C, Edward L Z, et al. Inclined surface locomotion strategies for spherical tensegrity robots [C]//Proceedings of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, Canada, 2017:1708-1714

Research on modeling and slope static state of tensegrity robot

Zhao Kaikai^{* ** ****}, Chang Jian^{* **}, Li Bin^{* **}, Du Wenjuan^{***}

(^{*} State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(^{**} Institute for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(^{***} Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(^{****} University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

Due to its high strength-to-mass ratio, good vibration damping and deformability, the tensegrity robot can adapt to a variety of terrains and has varieties of sports gaits. To achieve the goal that the robot moves on multiple terrains, this paper aims at the static slope of the tensegrity robot, and makes the human machine interface of the tensegrity robot by Matlab graphical user interface (GUI), which is used to solve the critical rolling slope of the robots in different states. The open dynamic engine (ODE) simulation platform is used for modeling because the kinetic modeling for robots is difficult. Finally, the experimental platform is built for experimentation, and the simulation results are compared with the physical experiment results to verify the correctness of the simulation results. At the same time, the correctness of the kinetic model is also verified.

Key words: tensegrity robot, open dynamic engine (ODE) simulation, tensegrity structure, critical rolling slope, dynamic simulation