

DOI: 10.3901/JME.2016.03.034

双爪式爬杆机器人的夹持性能分析*

江 励¹ 管贻生² 周雪峰³ 杨铁牛¹ 苏满佳² 吴鸿敏²

(1. 五邑大学机电工程学院 江门 529000;

2. 广东工业大学机电工程学院 广州 510006;

3. 广东省自动化研究所现代控制技术重点实验室 广州 510075)

摘要: 双爪式攀爬机器人已成为一类重要的和主流的攀爬机器人,这类机器人中两端手爪对攀爬对象抓夹的安全性和可靠性是攀爬的前提条件和基本要求,也是一个关键问题。基于此,在介绍自行开发的双爪式爬杆机器人 Climbot 之后提出这类机器人抓夹圆杆时的夹持力封闭性问题,对封闭性进行论证。分别分析机器人进行平面攀爬和空间攀爬时对支撑端夹持器产生的负载形式,建立其力平衡模型。基于该模型,计算夹持器的各种尺寸参数对夹持性能的影响,并对计算结果进行系统的分析。通过几组攀爬夹持试验对提出的夹持模型进行验证。结果对夹持器的设计和攀爬安全性的保证具有重要的参考和指导意义。

关键词: 爬杆机器人; 抓夹安全性; 夹持力封闭; 力平衡模型; 夹持器设计

中图分类号: TP242

Grasping Performance Analysis of a Biped-pole-climbing Robot

JIANG Li¹ GUAN Yisheng² ZHOU Xuefeng³ YANG Tieniu¹
SU Manjia² WU Hongmin²

(1. School of Mechanical Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529000;

2. School of Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006;

3. Key Laboratory of Modern Control Technology, Guangdong Institute of Automation, Guangzhou 510075)

Abstract: Biped climbing robots have become an important class of climbing robots, where the reliability of pole-grasping with the end grippers is a basic and critical requirement for safe climbing, and the analysis of grasping reliability is a key issue. A biped pole-climbing robot, the Climbot developed is first introduced. The problem of force-closure of grasping with the robot climbing on a round pole is presented and proved. The dynamic loads generated onto the base gripper when the robot climbs in different climbing gaits are analyzed, and the balance models are proposed, respectively, in 2D and 3D cases. Based on these models, the effect of geometric parameters of the gripper on grasping performance is analyzed. The correctness of the models and effectiveness of the corresponding analysis are verified with several grasping experiments. The results are helpful and valuable to gripper design for biped climbing robots and guarantee of grasp reliability.

Key words: biped pole-climbing robot; grasping safety; force-closure; force balance model; gripper design

0 前言

农业、林业和建筑业将是未来机器人广阔的、极具潜力的新应用领域之一。其中的高空作业,包括果实的采摘、树枝的修剪、路灯灯泡的更换、高压输电设备的检修和大型桁架结构建筑的维修等都是高空危险的环境中完成的。而这些工作本身往

往劳动强度大,工作时间长,工作事故经常发生。因此,采用机器人取代人类去从事这些工作已成为一个迫切的需求。面对这些需求,具有攀爬功能的机器人日益受到各国学者的关注,并已出现许多攀爬机器人样机。这些攀爬机器人大体上可按照抓持杆件的方式分为环抱式、钩爪式和夹持式三类。环抱式攀爬机器人的代表为 CPR^[1]和 UT-PCR^[2]。这种攀爬机器人的优点是抓持时受力均匀,较为牢靠。但有一个致命的缺点,即它们缺乏攀爬过渡河越障的能力,因而应用场合局限于无分叉的树木或是环境单一的灯柱上。钩爪式机器人的代表为 RiSE^[3]

* 广东省自然科学基金(S2013020012797)、国家基金委-广东省联合基金(U1401240)和国家国际科技合作专项(2015DFA11700)资助项目。
20150226 收到初稿,20151028 收到修改稿

和 Treebot^[4]。这类机器人由于采用爪式的抓持模式, 攀爬的介质只能选择一些质地较软、表面粗糙的树木或木杆。夹持式机器人的代表为 3DCLIMBER^[5] 和 Climbot^[6]。这类机器人能够交替抓夹攀爬杆件, 配合机器人本体较多的自由度, 具备较强的机动性。

对于夹持式机器人来说攀爬的安全性是其首要问题, 影响攀爬安全性的一个最为重要的因素即机器人的夹持性能。而考虑机器人夹持性能需要思考两个问题: ① 夹持器能否形成力封闭从而保证它能够平衡机器人在攀爬时所产生的各个方向的负载; ② 夹持器如何平衡外部的负载。

对于夹持力封闭的性质, 已有许多的学者从不同的方面进行了研究^[7-8]。作为对 Climbot 夹持性能研究的第一步, 本文首先对 Climbot 夹持杆件时力封闭性进行证明。接着, 建立 Climbot 夹持圆杆时的受力模型, 并通过该模型对夹持器参数对夹持性能的影响进行深入的分析。

1 夹持圆杆的力封闭分析

1.1 双手爪式爬杆机器人 Climbot

针对一些高空危险性作业的应用需求, 原在华南理工大学现在广东工业大学的仿生与智能机器人实验室(BIRL)开发了一种双手爪式模块化攀爬机器人 Climbot, 实物样机如图 1 所示。



图 1 双手爪攀爬机器人 Climbot 及其示范性应用

该机器人采用模块化设计, 由三种模块搭建而成: I 型关节模块(回转关节模块)、T 型关节模块(摆转关节模块)和末端执行模块(夹持器模块)。机器人在攀爬时依次依靠两端的夹持器交替抓夹杆件, 不断“换手”, 实现攀爬运动。夹持器采用三级传动方式, 第一级为谐波减速器传动, 第二级为涡轮蜗杆传动, 第三级为平行四杆传动, 如图 2 所示。



图 2 夹持器模块

此种夹持器在夹持圆形杆件时, 理论上为 a 、 b 、 c 、 d 处的 4 个线接触, 如图 3 所示。

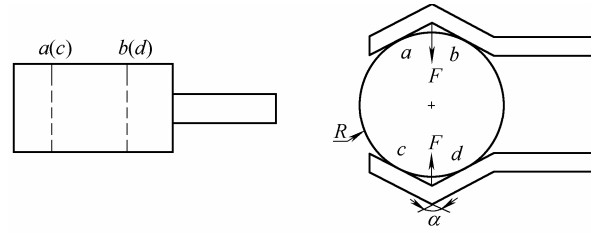


图 3 Climbot 夹持模型

1.2 接触力的等效变换

为了刻画接触力作用在抓持物体上的效果, 需要将施加在物体上的接触力转化到物体的坐标系中。若令 p_o^{ci} 、 R_o^{ci} 分别为接触点的坐标系在物体坐标系中的表示, 根据文献, 那么接触力转化到物体坐标系中可以表示为^[9]

$$F_o = Ad_{g_{oci}^{-1}}^T F_{ci} = \begin{pmatrix} R_o^{ci} & 0 \\ p_o^{ci} R_o^{ci} & R_o^{ci} \end{pmatrix} F_{ci} \quad (1)$$

式中, $Ad_{g_{oci}^{-1}}^T$ 代表接触坐标系到物体坐标系的伴随矩阵。若有 k 个接触点, 则接触力作用在物体上的合力为转化到物体坐标系中单个接触力的和

$$F_o = Ad_{g_{oc1}^{-1}}^T F_{c1} + Ad_{g_{oc2}^{-1}}^T F_{c2} + \dots + Ad_{g_{ock}^{-1}}^T F_{ck} = \begin{pmatrix} Ad_{g_{oc1}^{-1}}^T & \dots & Ad_{g_{ock}^{-1}}^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{c1} \\ \vdots \\ F_{ck} \end{pmatrix} \quad (2)$$

1.3 夹持力封闭性条件

在三维空间中, 施加在物体上任意外力可以表示为一个 6×1 的矢量 F_e 。实现夹持力封闭性即对于任意的 F_e 都有

$$F_o = -F_e \quad (3)$$

若将夹持力封闭问题转化到线性空间中则可将转化到物体坐标系中的接触力看成是一个 6×1 的矢量 v_i , 则力封闭问题转化为是否存在一系列的 $\alpha_i > 0$, 使得式(4)成立

$$\sum_{i=1}^k \alpha_i v_i = -F_e \quad (4)$$

对于这样一个问题, 可利用 GOLDMAN^[10]和 NGUYEN 的研究结论。在三维空间中形成夹持力封闭的一个充分必要条件是下列三个条件同时满足。

- (1) 存在至少 7 个 6×1 的矢量 (v_1, v_2, \dots, v_7) 。
- (2) 它们中存在 6 个矢量线性不相关。
- (3) 存在一系列的 $\alpha_i > 0$, 使得 $\sum_{i=1}^7 \alpha_i v_i = 0$ 。

1.4 夹持力封闭证明

Climbot 在夹持圆形杆件时为 4 个线接触, 若将其简化为 4 个点接触, 并证明上面三个条件同时满足, 则它必为夹持力封闭, 以下为证明。

首先, 考虑每个接触点的摩擦力, 则每个接触点处的接触力可看成为 3 个矢量的矢量和。这三个矢量分别写为

$$\begin{cases} \mathbf{v}_1^1 = (f_1^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0)^T \\ \mathbf{v}_1^2 = (0 & f_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0)^T \\ \mathbf{v}_1^3 = (0 & 0 & f_1^3 & 0 & 0 & 0)^T \end{cases} \quad (5)$$

那么, Climbot 夹持模型可以看成为 12 个矢量的矢量和。于是力封闭的第一个条件得到满足。

若将第一个点的坐标系作为基准坐标系, 此时构成第一个点处的接触力的三个矢量为式(5)中的形式, 它们显然是线性不相关的。于是只需要再找出另外三个线性不相关的矢量。令 $\mathbf{v}_i^1 = (f_i^1 \ 0 \ 0)^T$, $\mathbf{v}_i^2 = (0 \ f_i^2 \ 0)^T$, $\mathbf{v}_i^3 = (0 \ 0 \ f_i^3)^T$, $i = 2, 3, 4$, 则第二点、第三点和第四点的接触力矢量在其自身坐标系中可分别表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i^1 &= (\mathbf{v}_i^1 \ 0 \ 0 \ 0)^T & \mathbf{v}_i^2 &= (\mathbf{v}_i^2 \ 0 \ 0 \ 0)^T \\ \mathbf{v}_i^3 &= (\mathbf{v}_i^3 \ 0 \ 0 \ 0)^T & i &= 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (6)$$

转换到第一点的坐标系中可得到

$$\begin{cases} {}^1\mathbf{v}_i^1 = \mathbf{A} \mathbf{d}_{g1ci}^T \mathbf{v}_i^1 = (\mathbf{R}_1^{ci} \mathbf{v}_i^1 & \mathbf{p}_1^{ci} \times \mathbf{R}_1^{ci} \mathbf{v}_i^1)^T \\ {}^1\mathbf{v}_i^2 = \mathbf{A} \mathbf{d}_{g1ci}^T \mathbf{v}_i^2 = (\mathbf{R}_1^{ci} \mathbf{v}_i^2 & \mathbf{p}_1^{ci} \times \mathbf{R}_1^{ci} \mathbf{v}_i^2)^T \\ {}^1\mathbf{v}_i^3 = \mathbf{A} \mathbf{d}_{g1ci}^T \mathbf{v}_i^3 = (\mathbf{R}_1^{ci} \mathbf{v}_i^3 & \mathbf{p}_1^{ci} \times \mathbf{R}_1^{ci} \mathbf{v}_i^3)^T \end{cases} \quad (7)$$

不失一般性令 $i = 2$, 由于第二个接触点和第一点不重合, 显然 $\mathbf{p}_1^{c2} \times \mathbf{R}_1^{c2} \mathbf{v}_2^1$, $\mathbf{p}_1^{c2} \times \mathbf{R}_1^{c2} \mathbf{v}_2^2$, $\mathbf{p}_1^{c2} \times \mathbf{R}_1^{c2} \mathbf{v}_2^3$ 为三个非零的不相关矢量, 于是 ${}^1\mathbf{v}_2^1$, ${}^1\mathbf{v}_2^2$, ${}^1\mathbf{v}_2^3$ 是线性不相关的, 且 ${}^1\mathbf{v}_2^1$, ${}^1\mathbf{v}_2^2$, ${}^1\mathbf{v}_2^3$ 和 \mathbf{v}_1^1 , \mathbf{v}_1^2 , \mathbf{v}_1^3 也是线性不相关的。于是力封闭的第二个条件得到满足。

最后, 由于四个接触点位置对称, 一种最为简单的情况为各接触点处的接触力大小相等。此时, 对于任意的 $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_{12} > 0$, 有

$$\sum_{i=1}^{12} \alpha_i \mathbf{v}_i = 0 \quad (8)$$

于是力封闭的第三个条件也得到满足。至此便证明了 Climbot 夹持圆杆的力封闭性质。这说明只要夹持力足够大, 采用这种夹持方式是完全能够平

衡机器人攀爬所产生的负载的。

2 平面攀爬夹持力平衡模型

2.1 夹持力平衡模型建立

平面攀爬即机器人攀爬时始终与杆件在一个平面内, 如图 4 所示。这种情况下, 机器人夹持器端所承受的负载可以写成如下形式

$$\mathbf{F}_e = (F_x \ 0 \ F_z \ 0 \ \tau_y \ 0)^T \quad (9)$$

式中, τ_y 的大小与 Climbot 的位形和运动状态相关; F_x 和 F_z 与机器人的位形和运动状态相关。

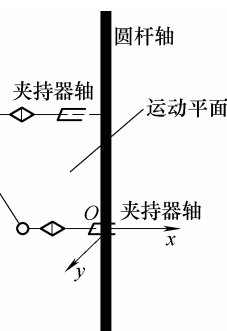


图 4 机器人平面攀爬示意

由于受到尺寸和重量限制, 机器人的夹持器所能够直接提供的夹持力是有限的。考虑到机器人攀爬时负载较大, 夹持力与负载的平衡模型可通过以下两步逐步建立。

第一步, 夹持器将杆件夹紧, 未受到 Climbot 的重力作用。这一阶段称之为夹持阶段, 如图 5 所示。在此阶段中, 只需要考虑夹持力和夹持反作用力间的平衡。

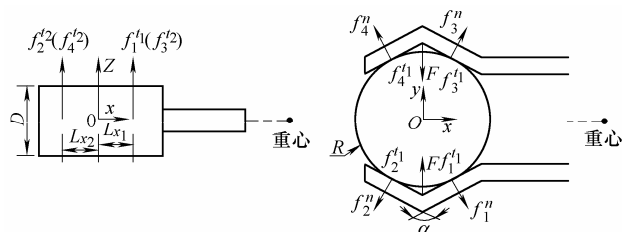


图 5 夹持阶段力平衡

第二步, Climbot 攀爬时所产生的负载施加到夹持端。这一阶段称之为加载阶段, 如图 6 所示。在此阶段, 受到 Climbot 攀爬时产生的负载后, 夹持器端会倾斜一定的角度。在倾斜的过程中, 由于夹持器具有自锁的能力, 它会产生一个很大的反作用力阻止夹子向外张开。于是, 在夹子和杆件间便产生了很大的接触力阻止 Climbot 向继续向外倾覆。在这个过程中, 夹持器结构的自锁保证了接触

点处的接触力始终能保持和外力的平衡, 而原先的夹持力可以看成是自锁力的一部分。

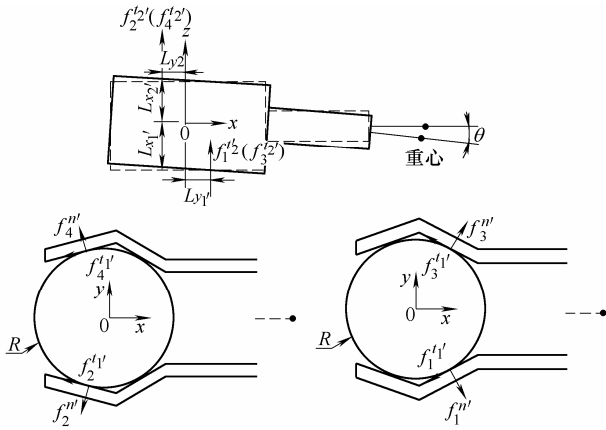


图 6 加载阶段力平衡

基于这种两步力平衡模型的提出, 可对夹持器倾角与夹持器尺寸参数间的关系进行推导。本文的推导过程建立在下面三个合理假设的前提下。

(1) Climbot 攀爬的杆件为刚体, 在理论推导过程中将不考虑它的弹性变形。

(2) Climbot 在加载阶段的倾覆过程中, 夹子会逐渐向外张开并产生变形。这一变形始终在它的弹性变形范围内, 变形量与所受外力符合胡克定律。

(3) 接触点处的摩擦力符合库仑定律。

首先, 在夹持阶段, 只考虑夹持力和接触力的平衡。于是可以简单算出

$$f_1^n = f_2^n = \frac{1}{2} F \sin \frac{\pi - \alpha}{2} \quad (10)$$

由库仑定律, 可以得到每个接触点处法向力和切向摩擦力间的关系

$$\sqrt{(f_i^{t1})^2 + (f_i^{t2})^2} \leq \mu f_i^n \quad i=1,2 \quad (11)$$

在加载平衡阶段, 夹子在两个接触点处的 \$y\$ 方向弹性变形可以由式(12)、(13)表示

$$y_1 = k_2(f_2^{n'} - f_2^n)C_2 + (f_1^{n'} - f_1^n)C_1 \quad (12)$$

$$y_2 = (f_2^{n'} - f_2^n)C_2 + k_1(f_1^{n'} - f_1^n)C_1 \quad (13)$$

式中, \$C_1\$ 和 \$C_2\$ 代表夹持器的柔度系数(或刚度的倒数), 即在单位力作用下的变形, 由夹持器各部分所使用的材料所决定。\$k_1\$ 和 \$k_2\$ 是变形耦合系数, 由接触点的位置以及夹子的几何尺寸决定。由于夹子的形状不规则, 并且夹子和驱动杆使用的材料不一样, 很难直接求解出这几个系数的值。本文中使用了基于有限元软件计算的办法来解决此问题, 如图 7 所示。首先分别在两个接触点处施加额定的载荷, 然后分别测出两接触点处的变形量, 便可得出这四个系数的值。

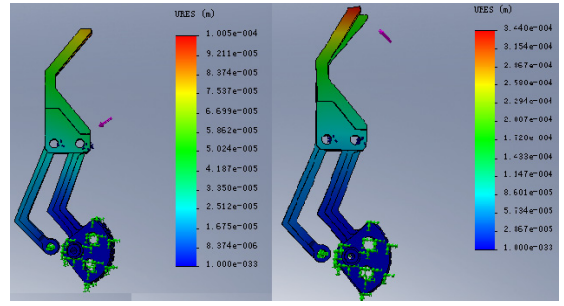


图 7 接触点受力变形的有限元计算

由于圆形杆件在径向方向上的刚度很大, 在夹子发生弹性形变向外张开的过程中, 接触点的位置会在圆杆的表面发生滑动。显然, 接触点在 \$x\$ 和 \$y\$ 方向上滑动的距离必须满足圆杆的几何约束, 而在 \$z\$ 方向上滑动的距离和夹持器的倾角大小有关。由图 8, 不难得出滑动距离之间的几何关系

$$y_i = \sqrt{R^2 - \left(R \sin \frac{\pi - \alpha}{2} - x_i\right)^2} - R \cos \frac{\pi - \alpha}{2} \quad i=1,2 \quad (14)$$

由于两接触点之间的变形耦合, 并不能确定每个接触点在夹持倾角为 \$\theta\$ 时在 \$x\$ 方向的位移。但当夹持倾角很小时, 可以近似得到

$$x_1 + x_2 \approx 2R \sin \frac{\pi - \alpha}{2} \times (1 - \cos \theta) \quad (15)$$

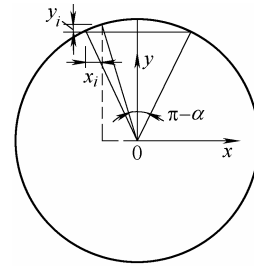


图 8 接触点沿 \$x\$ 和 \$y\$ 方向上移动距离的几何关系

再由夹持力与机器人攀爬负载平衡, 可得到

$$f_2^{n'} \times \sin \beta_2 + f_2^{t1'} \times \cos \beta_2 + f_1^{t1'} \times \cos \beta_1 - f_1^{n'} \times \sin \beta_1 = \frac{1}{2} mg \sin \gamma \quad (16)$$

$$(f_2^{n'} \times \sin \beta_2 + f_2^{t1'} \times \cos \beta_2) \times L_{z2}' + f_1^{t1'} \times L_{x1}' - (f_1^{t1'} \times \cos \beta_1 - f_1^{n'} \times \sin \beta_1) \times L_{z1}' + f_2^{t1'} \times L_{x2}' = \frac{1}{2} \tau_y \quad (17)$$

$$f_2^{t2'} + f_1^{t2'} = \frac{1}{2} mg \quad (18)$$

式中, \$F\$ 为夹持器所输出的夹持力; \$\alpha\$ 为 V 形夹子的开口夹角; \$D\$ 为夹子的宽度; \$R\$ 为圆形杆件的半径; \$m\$ 为 Climbot 的质量; \$\mu\$ 为库仑摩擦因数; \$L_{x1}, L_{y1}, L_{z1}\$ (\$i=1,2,3,4\$) 为夹持阶段接触点的坐标,

可由夹持器尺寸参数和圆杆半径尺寸计算得到; x_i, y_i, z_i 为加载阶段的坐标滑移量; $L'_{x_i}, L'_{y_i}, L'_{z_i}$ 为加载阶段接触点的坐标。

将上面等式进行简化, 最终可以得到 10 个约束方程, 即式(11)~(18)。而需要进行求解的未知数包括 $x_1, x_2, y_1, y_2, f_1'', f_1', f_1^{b2'}, f_2'', f_2', f_2^{b2'}, \theta$ 共 11 个。因此, 该问题是一个非定解问题。这是合理的, 因为接触点处的合力的方向和大小是可以改变的, 通过协调各个接触点处的合力大小和方向, 可以得到无数个达到力平衡的状态。实际上, 由于向外倾的运动很小, 可以将其看成是一个准静态平衡的问题, 认为 Climbot 会在向外倾的过程中达到力平衡第一时间里停止运动。于是整个问题变成了一个以式(11)~(18)为约束, 求最小的 θ 的最优解问题, 对于该问题, 可在 Matlab 中使用优化工具箱中 fmincon solver 进行求解, 便可得出机器人攀爬过程中最小倾角值。可以通过给定可靠夹持的倾角额定值 θ' 来求解出保证攀爬安全时, 机器人所允许施加在夹持端的最大负载。

2.2 计算结果及分析

以一组额定的参数作为参考值, 即 $\alpha = 100^\circ$, $D = 60 \text{ mm}$, $k = 2.33 \times 10^3$, $C_1 = 4.9 \times 10^{-5}$, $F = 276 \text{ N}$, $\mu = 0.7$, $R = 35$ 。其中, k 为刚度系数, 它是 C_2 的倒数。然后在保证其他参数不变的情况下对其中的某一个参数进行变换, 得出的一系列计算结果, 见表 1。通过这些计算结果, 便可得到这些参数对夹持性能所产生的影响。

表 1 平面攀爬计算结果

夹角 $\alpha / (^\circ)$	90	100	110	123
倾角 $\theta / (^\circ)$	8.86	9.67	10.63	11.72
直径 D / mm	40	60	80	100
倾角 $\theta / (^\circ)$	12.13	9.67	8.12	7.64
杆半径 R / mm	25	35	45	55
倾角 $\theta / (^\circ)$	11.32	9.67	8.42	7.37
刚度 $K / (\text{N/mm})$	2.33×10^3	3.03×10^3	4.35×10^3	7.69×10^3
倾角 $\theta / (^\circ)$	12.86	11.25	9.67	8.0
摩擦因数	0.5	0.6	0.7	0.8
倾角 $\theta / (^\circ)$	12.74	11.21	9.67	8.16
夹持力 F / N	176	276	376	476
倾角 $\theta / (^\circ)$	9.75	9.67	9.57	9.41

从以上计算结果可以发现, 通过减小 α 或增大 D, μ, F, k 都能够改善夹持的效果, 提高夹持的可靠性, 但是这些参数的影响效果各不相同。其中, 减小 α 和增大 D, μ, k 都能够较大幅度地减小夹持倾角, 提高夹持性能。考虑到参数 D 和 α 的改变

会增大夹持器尺寸, 从而增加夹持器重量。因此, 增大摩擦因数 μ 和夹持器的刚度 k 是两种最为有效的改善夹持性能的办法。

3 空间攀爬夹持力平衡模型

3.1 夹持力平衡模型建立

与平面攀爬不同, 机器人在三维空间中进行攀爬时各关节的转动方向是任意的。因此, 机器人夹持端的负载应具有以下形式

$$\mathbf{F}_e = (F_x \ F_y \ F_z \ \tau_x \ \tau_y \ \tau_z)^T \quad (19)$$

当 Climbot 以较低的速度和加速度在竖直杆上进行空间攀爬时, F_x, F_y, τ_z 三项的值很小, 基本在零附近徘徊。因此可将空间攀爬的负载近似为

$$\mathbf{F}_e = (0 \ 0 \ F_z \ \tau_x \ \tau_y \ 0)^T \quad (20)$$

将此负载绕 Z 轴旋转 φ , 可得

$$\mathbf{F}_e^R = \mathbf{A} d_{goc}^T \mathbf{F}_e = \begin{pmatrix} R_z(\varphi) & 0 \\ 0 & R_z(\varphi) \end{pmatrix} \mathbf{F}_e \quad (21)$$

特别地, 若 $\varphi = \arctan(\tau_x, \tau_y)$ 时, 可得到与平面攀爬类似的一种形式

$$\mathbf{F}_e^R = (0 \ 0 \ F_z \ 0 \ \tau_y' \ 0)^T \quad (22)$$

式中, $\tau_y' = \sin \varphi \tau_x + \cos \varphi \tau_y$ 。于是, 可把力平衡的模型建立在另一个空间平面内, 称它为平衡面, 如图 9 所示。该平衡面可由 oxz 平面绕 z 轴旋转 φ 得到。机器人在进行空间攀爬时, 加载阶段的倾覆过程可认为发生在此平面内。

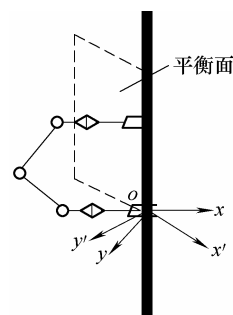


图 9 机器人空间攀爬示意

和平面攀爬所不同的是, 空间攀爬时的夹持倾角可认为由两部分组成。第一部分为夹持器的弹性变形沿 x' 方向的分量所引起, 第二部分为夹持器的弹性变形沿 y' 方向的分量所导致的接触点向 x' 方向的滑动所引起。为了便于计算, 可以把夹持器的弹性变形沿 x' 方向的分量看成是接触点的虚拟

反向滑动, 于是可令

$$X_i^R = -x_i^R + x_i^{R'} \quad (23)$$

便可得到在 $o'x'y'$ 坐标系中

$$X_1^R + X_4^R \approx 2R \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \varphi\right)(1 - \cos\theta) \quad (24)$$

$$X_2^R + X_3^R \approx 2R \cos\left(\frac{\alpha}{2} + \varphi\right)(1 - \cos\theta) \quad (25)$$

然后, 将 4 个接触点处的接触力转化到 $o'x'y'$ 坐标系中, 得到

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_o^R = & \begin{pmatrix} \mathbf{R}_z(\varphi) & 0 \\ \mathbf{p}_o^{ci} \mathbf{R}_z(\varphi) & \mathbf{R}_z(\varphi) \end{pmatrix} (\mathbf{A}d_{goc1}^T \mathbf{F}_{c1} + \\ & \mathbf{A}d_{goc2}^T \mathbf{F}_{c2} + \mathbf{A}d_{goc3}^T \mathbf{F}_{c3} + \mathbf{A}d_{goc4}^T \mathbf{F}_{c4}) \end{aligned} \quad (26)$$

于是, 与平面攀爬模型相似, 通过简化后可以得到共 20 个约束方程, 但需要求解包括 θ 在内共 21 个未知数。

3.2 计算结果及分析

采用类似的方法进行一系列对比计算, 但不同的是将 φ 也作为一个可以调整的参数, 得出的结果见表 2 所示。计算中 φ 的参考值取为 30° 。夹持端的负载的数值大小和平面攀爬中选取的一样, 只是相对的坐标系为平衡面中的坐标系 $ox'y'$ 。

表 2 空间攀爬计算结果

平衡面夹角 $\varphi / (^\circ)$	15	30	45	60
倾角 $\theta / (^\circ)$	9.52	8.61	7.05	6.53
夹角 $\alpha / (^\circ)$	90	100	110	120
倾角 $\theta / (^\circ)$	7.96	8.61	9.44	10.23
直径 D/mm	40	60	80	100
倾角 $\theta / (^\circ)$	11.02	8.61	7.12	6.58
杆半径 R/mm	25	35	45	55
倾角 $\theta / (^\circ)$	10.23	8.61	7.39	6.37
刚度 $K/(\text{N}/\text{mm})$	2.33×10^3	3.03×10^3	4.35×10^3	7.69×10^3
倾角 $\theta / (^\circ)$	12.36	10.49	8.61	6.88
摩擦因数 μ	0.5	0.6	0.7	0.8
倾角 $\theta / (^\circ)$	11.31	9.97	8.61	7.26
夹持力 F/N	176	276	376	476
倾角 $\theta / (^\circ)$	8.71	8.61	8.46	8.22

从计算结果可以发现, 当 φ 变大时, 机器人的夹持倾角会逐渐减小。

当 φ 取参考值 30° 时, 对比表 1 中的数据可以发现, 夹子 V 形开口夹角 α 对夹持倾角的影响有一定的减弱。

当夹持器的刚度系数从 2.33×10^3 变成 7.69×10^3 时, 夹持倾角减小了 5.48° 。在表 1 中, 这一数值为 4.86° 。这说明夹持器刚度系数 k 对夹持性能的影响

在空间攀爬时更为重要。

当摩擦因数从 0.5 变为 0.8 时, 夹持倾角减小了 4.05° , 而在表 1 中, 这一数值为 4.58° , 说明摩擦因数对夹持倾角的影响也有所减弱。主要的原因可认为是随着 φ 的增大, 夹持器滑动的趋势会逐渐变小。其他参数对夹持性能的影响与平面攀爬相比基本一致。

4 试验验证

对比试验使用的夹持器各参数分别为: $\alpha = 100^\circ$, $D = 60 \text{ mm}$, $C_1 = 4.9 \times 10^{-5}$, $C_2 = 2.3 \times 10^{-4}$, $F = 276 \text{ N}$, $\mu = 0.7$, $k_1 = 1.09$, $k_2 = 0.27$ 。试验中选用了两根不同尺寸的圆杆, 分别为直径 75 mm 和直径 60 mm(图 10), 采用了 SCA1800 双轴电压型倾角模块(图 10)对夹持倾角进行测量, 分平面负载和空间负载共进行了 6 组夹持测试, 如图 11、12 所示。

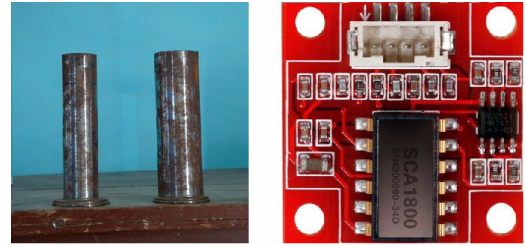


图 10 两种不同直径套筒和倾角传感器

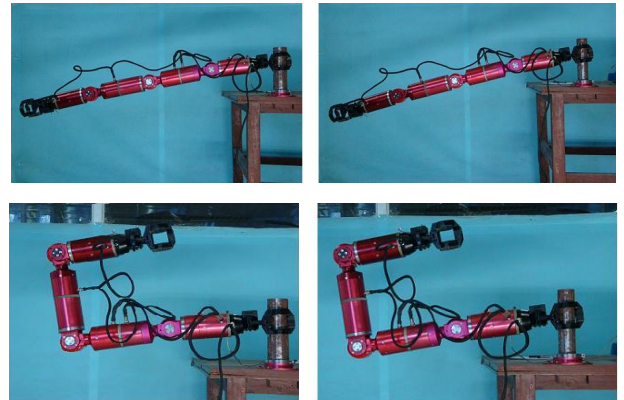


图 11 平面负载测试



图 12 空间负载测试

各种情况下测得的夹持倾角如表 3 所示。

表 3 实际测试与计算结果对比

负载	平衡面夹角	圆杆直	实际倾角	理论倾
	$\varphi /(^{\circ})$	径 D/mm	$\theta' /(^{\circ})$	角 $\theta /(^{\circ})$
$F_e = (0, 0, 171.5, 0, 128, 0)^T$	0	75	6.3	8.1
$F_e = (0, 0, 171.5, 0, 128, 0)^T$	0	60	8.8	10.2
$F_e = (0, 0, 171.5, 0, 80, 0)^T$	0	75	5.5	6.6
$F_e = (0, 0, 171.5, 0, 80, 0)^T$	0	60	6.6	8.3
$F_e = (0, 0, 171.5, 0, 80, 0)^T$	30	75	4.5	5.2
$F_e = (0, 0, 171.5, 0, 80, 0)^T$	30	60	4.7	6.5

从以上数据可以看到, 实际测量的结果比计算所得的数据都要偏小, 但从整体的趋势来说还是基本吻合的。考虑到计算模型中摩擦模型的不精确性, 认为这样的误差是可以接受的。

5 结论

(1) 对 Climbot 夹持圆杆的夹持力封闭的性质进行了证明, 从而从理论上证明了采用该夹持器进行攀爬的可行性。

(2) 提出了一种机器人攀爬时夹持力平衡的模型。它由两个阶段构成: 第一阶段为夹持阶段, 第二阶段为加载阶段。基于该模型, 分别计算了机器人进行平面攀爬和空间攀爬时, 夹持器的各种参数对夹持性能的影响。其中, 利用坐标变化的办法, 将机器人进行空间攀爬时的空间负载转化到一个平衡面中, 使得问题得到了简化。并对计算结果进行了分析和比较。

(3) 分别进行了平面负载和空间负载共 6 组夹持试验测试。结果表明计算值跟实测值基本趋势保持一致, 从而证明了本文所建立的夹持模型的正确性。

参 考 文 献

[1] ALMONACID M, SALTAREN R J, ARACIL R, et al. Motion planning of a climbing parallel robot[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(3): 485-489.

[2] BAGHANI A, AHMADABADI M, HARATI A. Kinematics modeling of a wheel-based pole climbing robot (ut-pcr)[C]// In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan: IEEE, 2005: 2111-2116.

[3] SPENKO M J. Biologically inspired climbing with a hexapedal robot[J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(4-5): 223-242.

[4] LAM T L, XU Y. Climbing strategy for a flexible tree climbing robot—Treebot[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 26(4): 12-23.

[5] TAVAKOLI M, MARQUES L, ALMEIDA T D. 3DClimber: Climbing and manipulation over 3D structures[J]. The Journal of Mechatronics, 2010, 21: 48-62.

[6] 江励, 管贻生, 蔡传武, 等. 仿生攀爬机器人的步态分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 17-22.

JIANG Li, GUAN Yisheng, CAI Chuanwu, et al. Gait analysis of a novel biomimetic climbing robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 17-22.

[7] NGUYEN V D. Constructing force-closure grasps[J]. International Journal of Robotics Research, 1988, 7(3): 3-16.

[8] TRINKLE J C. On the stability and instantaneous velocity of grasped frictionless objects[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(5): 560-572.

[9] RICHARD M M, ZEXIANG L, SASTRY S S. A mathematical introduction to robotic manipulation[M]. Florida: CRC Press, 1994.

[10] GOLDMAN A J, TUCKER A W. Polyhedral convex cones in linear inequality and related systems[M]. Princeton: Princeton Univ. Press, 1956.

作者简介: 江励, 男, 1984 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为仿生机器人。

E-mail: jll198412516@163.com

管贻生, 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为仿生机器人、智能机器人。

E-mail: ysguan@gdut.edu.cn