

# 基于旋量动力学建模的可重构轮手一体机器人越障性能研究<sup>①</sup>

胡亚南<sup>②\*</sup> \*\*\* 马书根<sup>\*\*</sup> 李 斌<sup>\*</sup> 王明辉<sup>\*</sup> 王越超<sup>\*</sup>

(\* 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)

(\*\* 日本立命馆大学工学部机器人学系 滋贺, 日本 525-8577)

(\*\*\* 中国科学院大学 北京 100039)

**摘 要** 为研究可重构轮手一体机器人的越障性能,描述了机器人轮手复合越障过程,基于旋量理论建立了单模块可重构轮手一体移动机器人翻越台阶型障碍的动力学模型。对影响机器人电机力矩的三个因素——台阶高度、手臂长度和机器人运动参数进行了仿真,对越障过程中的稳定性进行了分析,得到了机器人的稳定工作域,最后通过实验得到机器人极限越障高度,为机器人结构的优化和越障性能的提升提供了理论依据。

**关键词** 旋量,可重构轮手一体机器人,越障,动力学

## 0 引言

在移动机器人的发展过程中,以移动机器人为平台,在其上装载机械臂的组合方式得到广泛应用。机械臂不仅可以进行抓取等作业,还可以辅助移动平台运动,增强机器人的越障能力。越障过程的动力学模型是机器人运动控制、优化设计的基础。机械臂和移动平台存在动力学耦合,机械臂的姿态和运动状态影响着机器人越障能力。理论上,得到机器人的动力学方程并不难,因为机器人可以看成由关节连接的多刚体系统,而多刚体系统的动力学已经得到深入研究。因此实际的问题在于如何得到机器人动力学方程的简洁形式,以提高仿真效率<sup>[1]</sup>。

可重构轮手一体机器人是一种具有重构能力的移动机器人,针对不同的任务和环境,多个机器人模块可以组成不同的构形。由于其构形的多样性和运动方式的灵活性,采用传统方法建立动力学模型存在表达复杂和推导过程繁琐等困难,且不易于向多模块扩展,构形改变后需要重新建立模型,不适合构形需要经常变化的场合。而采用旋量理论处理复杂机构可以得到简洁统一的描述,根据指数积公式容易得到雅克比矩阵,适合分析复杂的构形。在处理多自由度复杂刚体系统问题的过程中,以李群为背

景的旋量理论在分析刚体运动和动力学建模方面显示出其独特的优势,因而日益受到关注。本文利用旋量理论对可重构轮手一体机器人越障过程进行动力学建模,分析了影响机器人越障能力的因素,并通过实验得到机器人的实际最大越障高度。

## 1 可重构轮手一体机器人

### 1.1 机构及运动机理

可重构轮手一体机器人的结构简图如图 1 所示。其工作原理是电机 5 驱动输入轮 7 转动,从而带动中心轮 8,再经过过渡轮 2,传递到输出轮 1,通过与输出轮一体的主动带轮带动履带 10,并由履带带动其他的被动带轮。其中输出轮 1、过渡轮 2、中

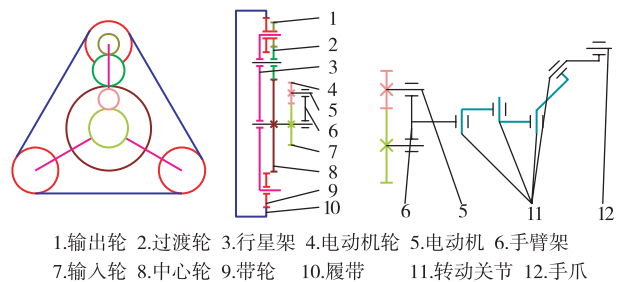


图 1 可重构轮手一体机器人结构图

① 国家自然科学基金(60905058)资助项目。

② 男,1986年生,博士;研究方向:移动机器人,动力学;联系人,E-mail:huyanana@sia.cn  
(收稿日期:2012-11-22)

心轮8的轴都连接在行星架3上,且手臂部分固定在手臂架6上。机器人的单输入构件两输出形式的驱动方式在于电机轮4、输入轮7和手臂架6之间的传动关系,将其简化为图2。

图2中电机轮是唯一输入。当轮手一体机器人在平面移动时,所受的阻力较小,所以手臂架在重力约束下不发生转动。机器人的运动形式表现为:输入轮转动,机器人移动。在遇到障碍物时,履带受到的阻力增大,电机轮受到速度伺服控制,其输入力矩也增大,当超过机器人重力约束后,机器人的运动形式表现为:手臂架转动,而输入轮不发生转动。

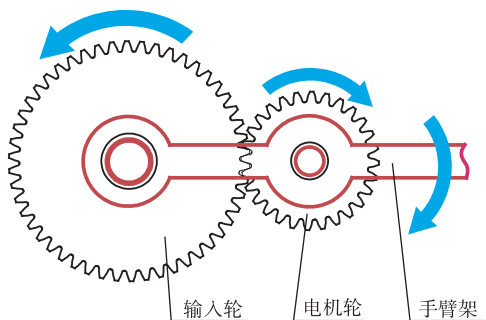


图2 单输入、两输出的驱动方式

### 1.2 多模块群体构形

图3给出了轮手一体机器人群体构形。可重构轮手一体机器人工作模式分为运动模式和操作模式<sup>[2]</sup>。处于运动模式时,履带驱动机器人运动,转



(a) 并形构型



(b) 串形构型

图3 轮手一体机器人群体构形

向可通过控制机械臂的姿态实现;机器人通过机械臂的辅助实现起立进入操作模式。机器人的车体设有连接装置,针对不同的环境和任务可以组成不同的构形。例如,在松软的地面中,机器人采用并形构形,这种构形具有更大的接地面积,如图3(a)所示。面对斜坡时,机器人组成串形构形,这种构形具有更大的驱动力和攀爬能力,如图3(b)所示。机器人的主要参数列于表1。

表1 可重构轮手一体机器人主要参数

车体部分质量 $m_w$ (kg)	5
手臂部分质量 $m_a$ (kg)	1.2
履带单边长 $l$ (mm)	220
电机最大输出力矩 $\tau$ (mN·m)	18.8
电机额定转速 $n$ (rpm)	3600
电机减速器传动比 $i_0$	144 : 1
电机到输入轮传动比 $i_1$	5 : 1
太阳轮到带轮传动比 $i_2$	3 : 8
带轮半径 $r$ (mm)	25
导轮半径 $r_d$ (mm)	30

## 2 越障构形及轮手复合越障

### 2.1 机器人越障构形介绍

针对不同高度的台阶,多个机器人模块可组成不同的构形,如图4所示。单个机器人模块无法顺利越障时,机器人将尝试组成多模块构形实现群体协同越障,如图4(b)所示的环形构形和(c)所示

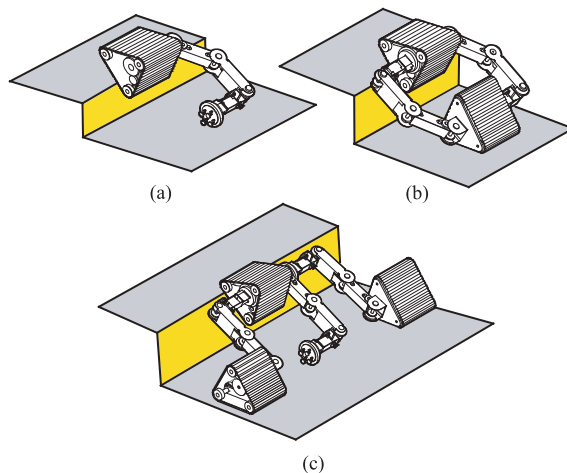


图4 机器人越障构形

的三角构形。

## 2.2 单模块机器人轮手复合越障

单模块可重构轮手一体机器人利用轮手复合越障策略翻越台阶障碍的过程,如图5所示。

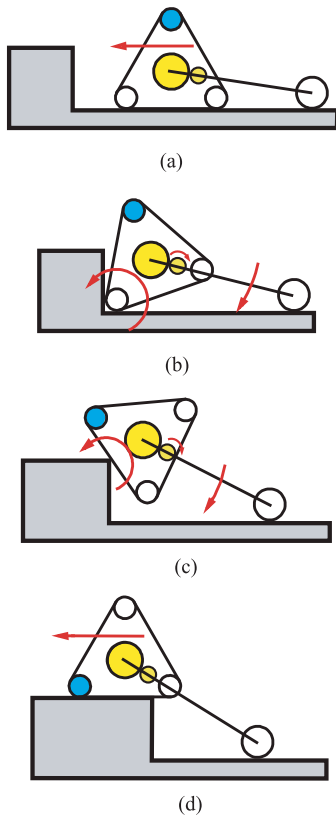


图5 单模块机器人轮手复合越障示意图

(a) 行进:自由移动时履带所受阻力较小,所需电机力矩也较小,故手臂与车体没有相对转动。

(b) 翻转:当机器人前带轮处履带碰到台阶踢面时,履带受到的阻力增大。当阻力足够大时,履带停转,行星轮的转动受到阻碍。受速度伺服控制,驱动电机力矩增加。增大到一定值时,会使车体和手臂产生相对转动,车体的运动表现为绕与台阶接触的带轮的转动。

(c) 爬升:当履带转动到与台阶垂直面完全接触后,车体的转动轴变为台阶的上边缘。在此状态下,履带与台阶可视为线接触,因此履带受到的摩擦阻力减小,恢复转动。机器人在履带的驱动下沿台阶有上升的趋势。其整体运动是沿台阶边缘的平动和绕台阶边缘转动的合成运动。最终车体完全运动到台阶上,完成越障,如图5(d)。

## 3 基于旋量的越障动力学建模

根据以上分析可知,机器人越障主要包含两个阶段:翻转和爬升。翻转过程受力简单,不作分析。下面对爬升过程建立动力学方程。由于机器人工作环境多为野外环境,地形不平坦,为使分析具有一般性,将机器人限定在斜坡上。野外地形表面是复杂的几何曲面,很难获得其精确的模型,为简化分析,机器人所在的局部区域可以用平面近似表示<sup>[3]</sup>。地形起伏在相对机器人尺寸变化较平缓的情况下,以上假设有一定合理性。

在分析过程中假设:车体和手臂均视为刚体;车体重心与几何中心重合;机器人车体与台阶无相对滑动;不考虑传动副间的摩擦。由于手臂上的导轮为可自由转动的钢质被动轮,其与水泥地面之间的摩擦力是滚动摩擦,滚动摩擦系数 $\mu$ 一般较小( $\mu \approx 0.01$ ),因此这里不考虑导轮与地面间的滚动摩擦。

机器人运动状态如图6所示。全局坐标系为 $Oxyz$ ,机器人车体坐标系为 $Ox_r y_r z_r$ ,台阶坐标系为 $Ox_s y_s z_s$ 。机器人所在斜面的倾斜角为 $\alpha$ ,机器人运动方向——偏航角为 $\beta$ ,台阶高度为 $h$ 。

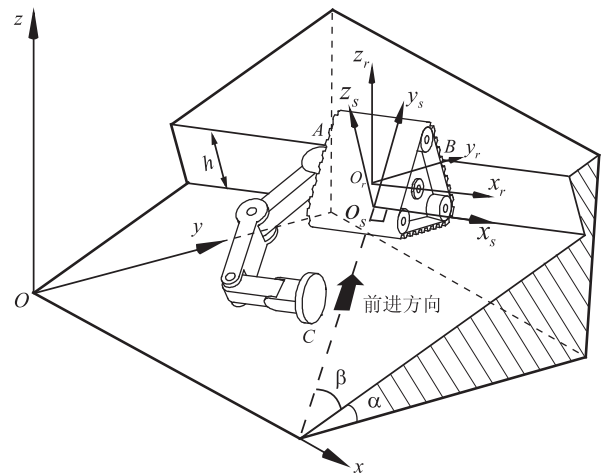


图6 机器人运动示意图及坐标系

利用旋量理论分析复杂机构可以统一处理转动副和移动副,使问题变得简洁统一。正向运动学由指数积公式给出,能非常方便地得到其雅克比矩阵<sup>[4-6]</sup>。由于旋量理论具有的独特优势,非常适合结构复杂且构形变化频繁的场所。可重构轮手一体机器人因其重构特性使得旋量法成为描述其运动和重构过程的最佳选择。

和基座固定的机械臂不同,移动机器人属于浮动基座机器人,其动力学建模通常采用虚设机构法,即选择一个部件做浮动基座,用虚拟的关节将惯性系和浮动基座连接,将其转化成固定基座机器人。虚拟关节没有质量,也不对机器人运动产生任何约束,只用来确定浮动基座的位姿<sup>[7]</sup>。在机器人爬台阶的对称截面内,如图7(a)所示,机器人与台阶和地面形成闭环运动链,可等价为一个与大地相连的三关节机械臂,其中两个是转动关节,一个是平动关节,对应位移分别为 $\varphi$ 、 $\theta$ 和 $s$ ,如图7(b)所示。

用指数积公式 $g(t) = \exp(\hat{\xi}t)g(0)$ 表示刚体运动的含义是,映射 $\exp(\hat{\xi}t)$ 将刚体的初始位姿 $g(0)$ 按旋量坐标 $\xi$ 映射到运动 $t$ 时间后的位姿 $g(t)$ ,其中 $\hat{\xi} \in se(3)$ , $\exp(\hat{\xi}t) \in SE(3)$ 。

利用指数积公式可得机器人前向运动学方程:  
车体:

$$g_{sw} = \exp(\hat{\xi}_1\alpha)\exp(\hat{\xi}_2\beta)\exp(\hat{\xi}_3\varphi)\exp(\hat{\xi}_4s)g_{sw0} \quad (1)$$

手臂:

$$g_{sa} = \exp(\hat{\xi}_1\alpha)\exp(\hat{\xi}_2\beta) \cdot \exp(\hat{\xi}_3\varphi)\exp(\hat{\xi}_4s)\exp(\hat{\xi}_5\theta)g_{sa0} \quad (2)$$

其中 $g_{sw0}$ 和 $g_{sa0}$ 分别是车体和手臂的初始位姿。关节旋量的矩阵表示为

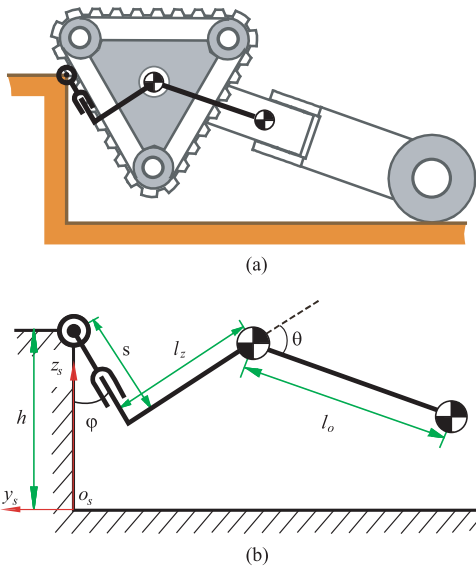


图7 机器人越障对称截面示意图

$$\hat{\xi}_i = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_i & v_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \hat{\omega}_i \in so(3), v_i \in \mathbb{R}^3 \quad (3)$$

各个关节对应的旋量坐标为 $\xi_i = [v_i; \omega_i] \in \mathbb{R}^6$ ,其中 $v_i = r_i \times \omega_i$ 。各旋量的运动轴和位置见表2。

表2 可重构轮手一体机器人旋量坐标

关节 $i$	$r_i$	$\omega_i$
1	$(0,0,0)^T$	$(1,0,0)^T$
2	$(0,0,0)^T$	$(0,0,1)^T$
3	$(0,0,h)^T$	$(-1,0,0)^T$
4	$(0,0,1)^T$	$(0,0,0)^T$
5	$(0, -l_z, l/2)^T$	$(1,0,0)^T$

定义关节广义坐标 $q = [\alpha, \beta, \varphi, s, \theta]^T$ 。在爬台阶过程中假设斜坡倾斜角不变,即 $\alpha$ 恒定,且机器人运动方向不变,即 $\beta$ 恒定,利用基于旋量推导出的雅克比矩阵的特殊性质,只需计算变化的关节对应的雅克比矩阵中的项。而且 $\alpha$ 和 $\beta$ 对应虚设机构,其质量和转动惯量为0,对动能没有贡献,无需计算其对应的雅克比矩阵。车体和手臂的速度在各自刚体坐标系下的描述分别为 $V_{sw}^b = J_{sw}^b \dot{q}$ 和 $V_{sa}^b = J_{sa}^b \dot{q}$ 。  $J_{sw}^b$ 、 $J_{sa}^b$ 是车体和手臂的身体雅克比,均为 $6 \times 3$ 阶矩阵。

车体对应的雅克比矩阵为

$$J_{sw}^b = [\xi_{w3}^T, \xi_{w4}^T, 0_{6 \times 1}] \quad (4)$$

其中第 $i$ 列为 $\xi_{wi}^T = Ad_{(\exp(\hat{\xi}_{i1}) \dots \exp(\hat{\xi}_{i4}))}(\xi_{wi}^T)$ ,  $3 \leq i \leq 4$ 。

手臂对应的雅克比矩阵为

$$J_{sa}^b = [\xi_{a3}^T, \xi_{a4}^T, \xi_{a5}^T] \quad (5)$$

其中第 $i$ 列为 $\xi_{ai}^T = Ad_{(\exp(\hat{\xi}_{i1}) \dots \exp(\hat{\xi}_{i5}))}(\xi_{ai}^T)$ ,  $3 \leq i \leq 5$ 。

车体绕其质心的转动惯量为 $I_w$ ,手臂绕其质心的转动惯量为 $I_a$ ,构造机器人广义惯性矩阵

$$M_w = \begin{bmatrix} m_w E & 0 \\ 0 & I_w \end{bmatrix}, M_a = \begin{bmatrix} m_a E & 0 \\ 0 & I_a \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 $E$ 为 $3 \times 3$ 单位矩阵。

机器人总动能为

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2}(V_{sw}^b)^T M_w V_{sw}^b + \frac{1}{2}(V_{sa}^b)^T M_a V_{sa}^b \\ &= \frac{1}{2} \dot{q}^T (J_{sw}^b{}^T M_w J_{sw}^b + J_{sa}^b{}^T M_a J_{sa}^b) \dot{q} \\ &= \frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $M$ 为机器人关节空间惯性矩阵。

机器人总势能为

$$E_p = m_w g h_w + m_a g h_a \quad (8)$$

质心高度 $h_w$ 、 $h_a$ 分别对应于各自质心位姿矩阵的第3行第4列。

拉氏函数 $L = E_k - E_p$ ,带入拉格朗日方程可得动力学方程



$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + N(q) = Q \quad (9)$$

广义力  $Q = [0, 0, \tau_\varphi, F_s, \tau_\theta]'$ 。由虚功原理

$$\begin{aligned} \Sigma \delta W_F &= Q_h \delta q_h = \sum_{h=1}^k \vec{F}_i \delta \vec{r}_i \text{ 可得} \\ \tau_\varphi \delta \varphi + F_s \delta s + \tau_\theta \delta \theta &= \tau i_1 \delta \theta - m_w g \delta z_w - m_a g \delta z_a \end{aligned} \quad (10)$$

求得电机力矩<sup>[8]</sup>

$$\tau = (\tau_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + F_s \frac{\partial s}{\partial \theta} + \tau_\theta + m_w g \frac{\partial z_w}{\partial \theta} + m_a g \frac{\partial z_a}{\partial \theta}) / i_1 \quad (11)$$

等效机械臂关节变量  $\varphi$  和  $s$  依赖  $\theta$ :

$$\begin{cases} v_d = \frac{d\theta}{dt} r / i_2 \\ s = h - \frac{l}{2} - \int_0^t v_d dt \\ l_a \sin(\theta - \varphi) + r_d - h = l_z \sin \varphi - s \cos \varphi \end{cases} \quad (12)$$

对式(12)中三式求导即可求得  $\frac{\partial \varphi}{\partial \theta}$ 、 $\frac{\partial s}{\partial \theta}$ 。 $z_w$  和  $z_a$  分别是车体和手臂重心到斜坡面的垂直距离,均可表示为  $\theta$  的函数,故  $\frac{\partial z_w}{\partial \theta}$  和  $\frac{\partial z_a}{\partial \theta}$  也可得到。 $l_a$  是手臂长度。所有量已知,电机力矩可求。

## 4 越障过程仿真

对影响机器人越障能力的因素进行分析。除台阶高度外,机器人越障时的速度和加速度会影响到电机力矩;此外,手臂在跃升阶段起到支撑作用,手臂的长度也会对越障能力产生影响。

### 4.1 台阶高度

环境变量为  $\alpha = 0, \beta = 0$ 。固定手臂角速度  $\dot{\theta} = 0.5 \text{ rad/s}$  和手臂长度  $l_a = 0.3 \text{ m}$ 。得到不同台阶高度对应的电机力矩变化,如图8所示。随着台阶高

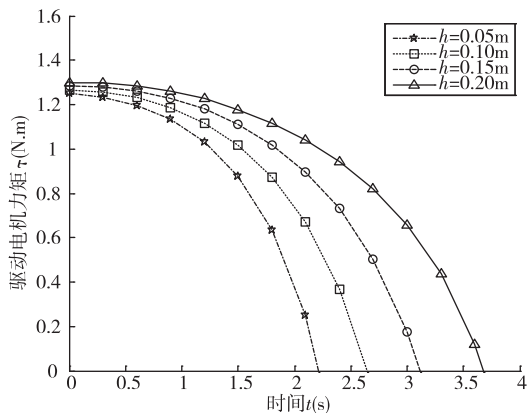


图8 台阶高度对电机力矩的影响

度增加,所需电机力矩也增加,但力矩最大值始终未超过电机最大力矩。

### 4.2 机器人运动参数

在  $h = 0.15 \text{ m}$ , 手臂长度  $l_a = 0.3 \text{ m}$ , 环境变量同上的条件下,得到手臂转动速度  $\dot{\theta}$  对电机力矩的影响,如图9所示。可以看出手臂速度越大,机器人爬台阶时间越短,而力矩最大值持平,说明电机转速仅影响机器人的越障速度,而对电机力矩最大值并无影响。

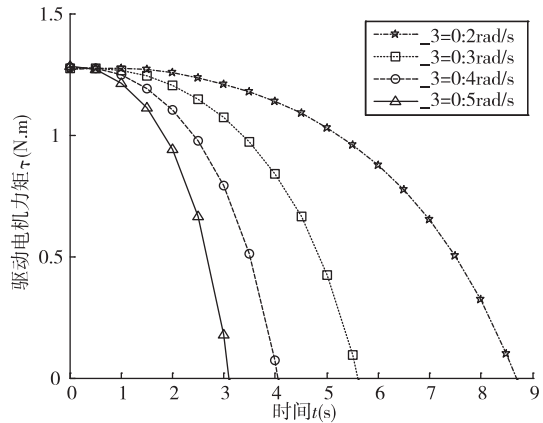


图9 手臂转速对电机力矩的影响

### 4.3 手臂长度

手臂长度也是影响机器人越障能力的因素之一。在其他条件相同的情况下,改变手臂的长度  $l_a$ , 得到其与电机力矩的关系,如图10所示。从图中可以看出,手臂长度越长,所需力矩越小,越容易越障。由于手臂在全程起支撑作用,至少应保证手臂长度满足  $l_a \geq l_z + h$ 。

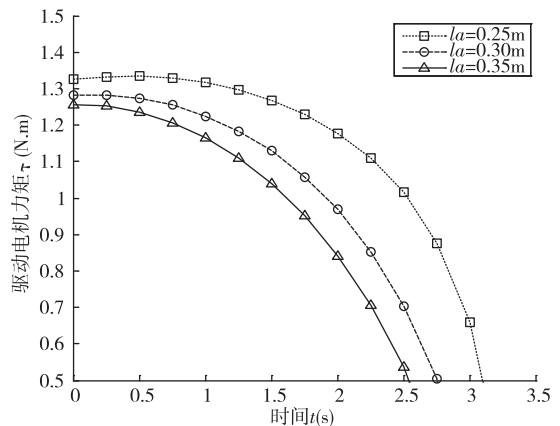


图10 手臂长度对电机力矩的影响

仿真结果说明机器人越障的理论最大高度为其

三角形车体的边长,即  $h_{\max 1} = l$ 。但从几何约束条件考虑<sup>[9]</sup>,机器人越障时翻转必须借助台阶上尖点,即  $h_{\max 2} = l - r$ 。因此,理论极限越障高度为  $h_{\max} = \min(h_{\max 1}, h_{\max 2}) = 0.195\text{m}$ 。

### 5 越障稳定性分析

对于在野外环境中运行的移动机器人来说,稳定性是一个重要指标。在越障过程中,机器人面临伤害最大的是倾翻,因此首要考虑机器人的抗倾翻能力。

早期针对腿式机器人和装载机械臂的移动机器人,定义了各种衡量机器人倾翻稳定性的准则,如稳定性裕量<sup>[10]</sup>,力—角度稳定性准则<sup>[11]</sup>等。利用稳定性裕量准则判断发生倾翻的条件是机器人重心在水平面的投影落在支撑多边形之外。

机器人越障时,手臂与斜坡地面可视为点接触,接触点记为  $C$ ,履带与台阶可视为线接触,记为线段  $AB$ ,如图6所示。 $\Delta A'B'C'$  顶点分别是其在水平面的投影,如图11。 $\Delta A'B'C'$  之外,如果机器人发生倾翻,只能是绕  $AC$  边或  $BC$  边翻转。出于安全考虑,当机器人重心落在三角形  $\Delta A'B'C'$  之内一定安全裕量  $d_{\text{mar}}$  时,即图所示的阴影三角形内才视为稳定的,此时如果机器人受到微幅扰动能回复到稳定姿态。

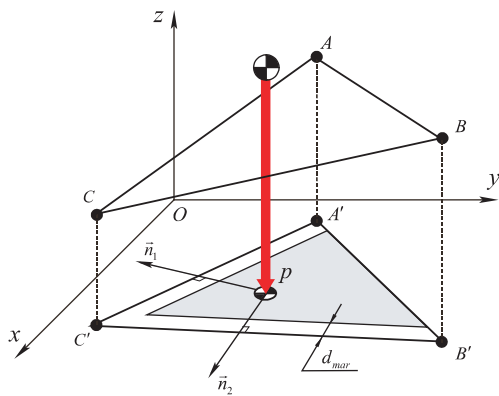


图11 支撑多边形

图11中,  $\vec{n}_1$ 、 $\vec{n}_2$  是与  $A'C'$  和  $B'C'$  垂直的单位向量,可由水平面的法向量  $[0,0,1]'$  与  $A'C'$  和  $B'C'$  作叉积得到。重心投影  $\vec{p}$  位于三角形的两边  $A'C'$  和  $B'C'$  之内的一定裕量表示为

$$\begin{cases} \vec{n}_1 \cdot \vec{p} + d_{\text{mar}} \leq \vec{n}_1 \cdot \vec{A}' \\ \vec{n}_2 \cdot \vec{p} + d_{\text{mar}} \leq \vec{n}_2 \cdot \vec{C}' \end{cases} \quad (13)$$

根据上述稳定性判据对机器人在不同环境变量  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $h$  下的稳定性进行仿真,得到机器人的稳定区域,如图12。取不同的台阶高度对应着不同的稳定边界,令  $h = 0 \sim 0.2\text{m}$  遍历台阶高度得到一组曲线。对这组曲线进行曲面拟合得到的曲面与坐标平面围成的曲边多面体是稳定区域,当机器人所处地形参数在多面体内部时,在受到扰动幅度不大的情况下不会发生倾翻。随着机器人越障高度的增加,机器人的稳定域缩小。如果机器人正对斜坡,此时机器人的越障稳定域最大。当斜坡坡度大于  $66^\circ$  时,机器人在斜坡上已不能保持稳定。

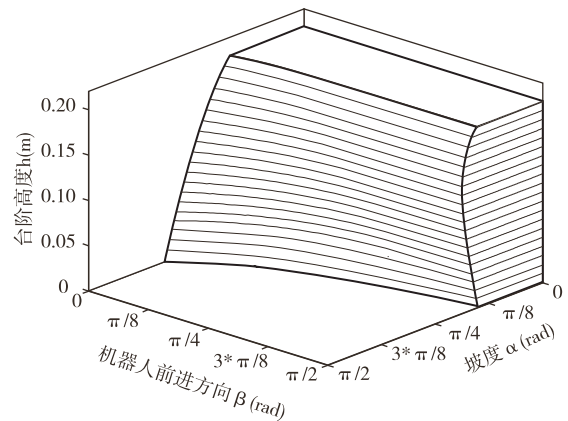


图12 机器人越障稳定域

### 6 越障实验及分析

为验证机器人的极限越障高度,在实验室搭建高度可调的台阶,越障过程如图13所示。实验条件如下:机器人手臂长度为  $0.3\text{m}$ ,偏航角为  $0$ ,前进速度为  $3\text{cm/s}$ ,越障中手臂转速为  $0.3\text{rad/s}$ 。实验得到机器人实际可翻越台阶的最大高度为  $17\text{cm}$ 。台阶高度超过  $17\text{cm}$  后,机器人仍可越障,但失败的几率增大。为验证机器人在实际环境中的越障能力,选取高度相近的楼梯台阶进行实验。实际的台阶高度为  $15\text{cm}$ ,越障过程如图14所示,机器人能顺利越障。

通过对实验分析发现存在以下问题

(1) 手臂与地面接触面积较小,机器人越障伴着重心的升高,造成稳定性变差,接触处的微小扰动对平稳越障会造成干扰。

(2) 履带的弹性、张紧力和与台阶的作用力共同影响着履带与台阶接触区域的形状。而履带的形

状对机器人越障能力有很大影响。动力学建模中假设履带不发生形变。而实际履带受到台阶边缘的挤

压产生不可忽略的变形,使作用力的方向发生偏转,从而造成仿真与实验结果的误差。

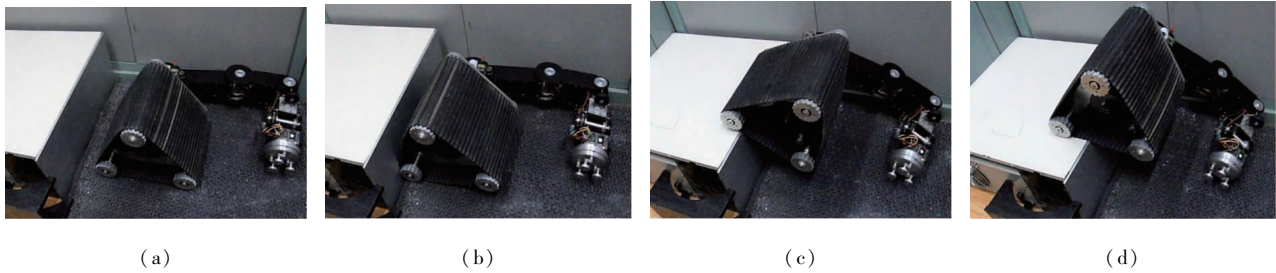


图 13 实验室搭建台阶上的越障实验

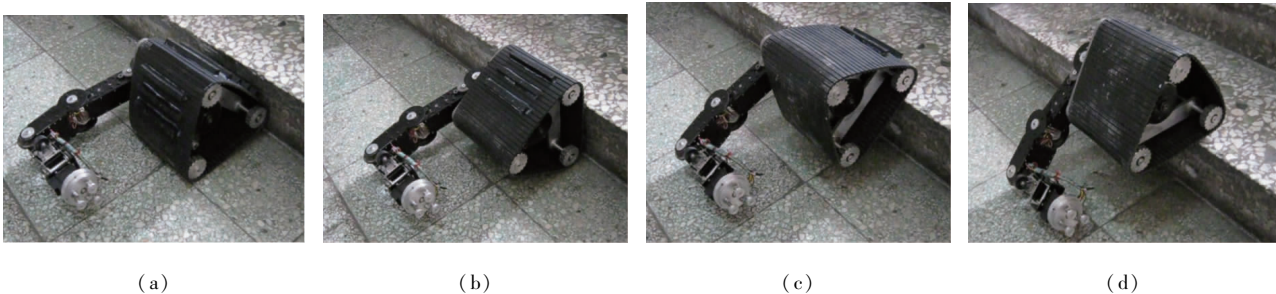


图 14 水泥楼梯上的越障实验

## 7 结论

基于旋量理论建立了单模块可重构轮手一体移动机器人翻越台阶型障碍的动力学模型,对影响电机力矩的三类因素——台阶高度、运动参数和手臂长度进行了分析,通过仿真得到其与力矩的定量关系,结合实验得到单模块机器人的极限越障高度,为机器人结构的优化和越障性能的提升提供了理论依据。

单模块机器人受自身几何条件的约束,越障能力有限。而多模块机器人可针对障碍的高度变换构形,将显著提高机器人的越障能力。面对高度超过17cm的障碍,可考虑采取多机器人协同越障策略。因此,下一步将分析多模块构型的机器人联合越障。找到满足一定条件下的最佳越障构形,并用实验验证计算的正确性。

### 参考文献

- [ 1 ] Featherstone R. Robot Dynamics Algorithms. Kluwer Academic Publishers, 1987. 89-99
- [ 2 ] 贺鑫元,马书根,李斌等. 可重构星球探测机器人的机构设计. 机械工程学报, 2005, 41(12): 190-195
- [ 3 ] Gustavo F, Fernando L, Liu H, et al. Kinematic reconfigurability of mobile robots on irregular Terrains. In: Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009. 1340-1345
- [ 4 ] Murray R M. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. CRC Press, 1994. 39-45
- [ 5 ] 于靖军,刘辛军. 机器人机构学的数学基础. 北京:机械工业出版社, 2008. 102-117
- [ 6 ] 李永刚,宋轶民,张策. 基于现代微分几何的机器人研究现状. 中国机械工程, 2007, 18(2): 238-243
- [ 7 ] Featherstone R. Robot dynamics. [http://www.scholarpedia.org/article/Robot\\_dynamics](http://www.scholarpedia.org/article/Robot_dynamics); Scholarpedia, 2007
- [ 8 ] 贺鑫元,马书根,李斌等. 可重构单体机器人动力学分析与控制. 中国机械工程, 2005, 16(21): 1889-1894
- [ 9 ] 田海波,方宗德,古玉锋. 轮腿式机器人越障动力学建模与影响因素分析. 机器人, 2010, 32(3): 390-397
- [ 10 ] McGhee R, Frank A. On the stability properties of quadruped creeping gait. *Mathematical Bioscience*, 1968, 3: 331-351
- [ 11 ] Papadopoulos E G, Rey D A. A new measure of tipover stability margin for mobile manipulators. In: Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, USA, 1996. 3111-3116

## Research on obstacle-negotiation performance of a reconfigurable wheel-manipulator robot based on screw's dynamics formulation

Hu Yanan \* \*\* , Ma Shugen \* \*\* , Li Bin \* , Wang Minghui \* , Wang Yuechao \*

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

( \*\* Department of Robotics, College of Science and Engineering,  
Ritsumeikan University, Kusatsu-Shi, Shiga 525-8577, Japan)

( \*\*\* University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

### Abstract

To study the obstacle negotiation capacity of reconfigurable wheel-manipulator robots, the combined wheel-manipulator obstacle negotiation process was described, and based on the screw theory, the dynamic formulation of stair-climbing on a slope for reconfigurable wheel-manipulator robots was established by using the virtual mechanism method. Because of the diversity of configuration and the flexibility of motion, the dynamic formulation using conventional approaches is complex, moreover, it is difficult to expansion to multiple modules. Whereas adopting the screw theory, concise and unified description of complex mechanisms can be derived, and the Jacobian matrix is easily obtained by exponential product formula. Three factors affecting the motor torque mainly, such as stair height, arm length and kinematic parameters, were simulated, and the stability in the obstacle-negotiation process was analyzed and the result of stable working range was obtained. The maximum stair-height that the robot can negotiate was achieved by simulation and experiment.

**Index Terms:** screw, reconfigurable wheel-manipulator robot, obstacle negotiation, dynamics