

变幅轮腿机器人智能越障步态规划与平稳性分析

孙治博, 刘晋浩^{*}, 于春战, 阚江明

(北京林业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了实现机器人林区伐根的智能越障, 保证机器人搭载扫描设备时的越障平稳性, 该文设计了一种主动摆臂六轮腿式机器人结构, 它具备 2 个独立的摆臂轮腿运动单元以及 4 个复合的摆臂轮腿运动单元。该文运用拉格朗日方程建立了机身智能越障过程中的摆臂轮腿动力学模型, 采用最小二乘法拟合推杆的速度函数, 通过 ADAMS 动态仿真以及样机试验, 得到该变幅轮腿机器人在智能越障 10 cm 高度的过程中, 机身的最大侧倾角与纵倾角较被动碰撞越障的右倾 4.5° 和前倾 2.5° 减小到左倾 0.75° 和前倾 0.4°, 验证了智能越障理论建模的正确性以及该系统的可靠性。该研究为该机器人在人工林区扫描作业的平稳越障提供了理论基础。

关键词: 机器人; 模型; 计算机仿真; 轮腿; 动力学; 智能越障; 稳定性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.001

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0001-07

孙治博, 刘晋浩, 于春战, 阚江明. 变幅轮腿机器人智能越障步态规划与平稳性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 1-7. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.001 <http://www.tcsae.org>

Sun Zhibo, Liu Jinhao, Yu Chunzhan, Kan Jiangming. Stability analysis and gait planning for luffing wheel-legged robot during intelligent obstacle-surmounting process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 1-7. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.001 <http://www.tcsae.org>

0 引言

移动机器人根据行走机构的不同, 可分为轮式、履带式 and 腿式三大类^[1-3]。随着科技的进步, 结合了不同的行走结构的机器人得到了发展, 如: 轮腿机器人、履腿机器人、轮履机器人等^[4-5], 这类机器人被统称为混合机器人。轮式机器人具备机动性高, 可靠性强的特点^[6], 腿式机器人则具有多个自由度, 运动灵活, 路面通过性强^[7], 可以调整轮腿的摆动, 来保证自身的稳定性, 以适用于凹凸不平路面的行驶与作业。

美国国家航空航天局研制的 MER-A 为六轮腿机器人, 通过摇臂摆动悬架转向, 已经成功投放到火星, 主要应用于火星探测^[8]。Sherpa rover 是一个四轮腿混合运动机器人, 整个机器人共有 24 个自由度, 主要用于月球环境检测^[9]。HyLoS 系列四轮腿机器人为小型机器人, 主要用于一般崎岖路面的行驶^[10-11]。美国国家航空航天局研制的 ATHLETE 系列机器人是大型六轮腿机器人, 该机器人轮腿伸长高度可达 4 m, 质量为 450 kg, 用于探月工程的服务工作^[12-14]。与此同时, 国内的研究机构也开始了关于轮腿机器人的研究, 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室针对一种六轮腿全地形机器人进行了运动学建模、地形交互运动分析, 得到了该类型

机器人在崎岖路面下的运动关系^[15-17]。王亚等^[18]设计研发了一种八轮的高地面仿形性机器人, 该机器人可保证机器人轮胎与地面的充分接触。谷德明^[19]设计了一种八轮腿野外、非平整地形机器人, 可以跨越 250 mm 的障碍, 但不能实现智能平稳越障功能。田海波等^[20]研究了一种多驱动模式的轮腿机器人, 其越障高度能够达到 200 mm。除此之外 Chariot 系列、NOROS 系列机器人也在相应的领域得到发展与应用^[21-22]。

目前国内外所研究的机器人为保证轮胎与地面的完全接触都为欠驱动冗余机器人, 采用被动越障方法^[23], 不具备智能越障保证车身平稳的功能。本文研究的是针对林区作业的机器人, 在传统的轮腿机器人机构基础上进行改进, 设计了一种双摆动复合轮腿运动机构, 可以分别采用双电动推杆驱动以及电动推杆配合弹簧阻尼的形式进行轮腿的摆动控制。本文主要对双电动推杆作用下智能越障的性能进行分析与研究, 以期实现机身平稳改善立木扫描结果的目的。

1 变幅轮腿机器人结构形式

如图 1 所示, 本文所研究的轮腿式移动机器人采用一种折腰转向六轮腿摆臂变幅行驶的结构形式, 整个轮腿机器人分为前后 2 个部分, 定义前半部分为前机体, 由前机体框架和两组耦合双摆臂轮腿机构组成, 该双摆臂机构的上方摆动臂采用常见的两端铰接摆动形式与框架铰接连接, 下方的摆动臂为“人”字形结构, 前后两端连接驱动轮胎, 中间凸起部分与上方摆臂铰接连接。为了实现智能越障功能, 轮腿的摆动需通过双电动推杆驱动控制。后机体由后机体框架和 2 个独立摆臂轮腿组

收稿日期: 2015-06-04 修订日期: 2015-07-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (TD2013-4); 中国博士后自然科学基金 (2014M550628)

作者简介: 孙治博, 男, 博士生, 研究方向为林业采育装备智能化、自动化。北京 北京林业大学工学院, 100083。Email: szbjtu@163.com

*通信作者: 刘晋浩, 男, 博士生导师, 教授。研究方向: 林业采育装备智能化、自动化。北京 北京林业大学工学院, 100083。Email: liujinhao@vip.163.com

成, 其独立摆臂一端与后机体框架铰接, 另一端连接行驶轮胎, 由电动推杆控制其摆动。前后机体采用 40 mm×40 mm 的铝型材框架箱体结构, 通过一维旋转铰接连接, 为保证其刚度, 铰接处采用厚度为 15 mm 的镂空钢板。前后机体通过一维旋转铰接连接。整个轮腿机器人按照其相对运动部件可以分为 14 个部分: 前机架总成, 后机架总成, 左上摆轮腿、右上摆轮腿、左人形轮腿、右人形轮腿、左后轮腿、右后轮腿, 以及 6 个轮胎。机器人外形尺寸长宽高为: 2 160 mm×1 123 mm×675 mm, 总质量为 370 kg。

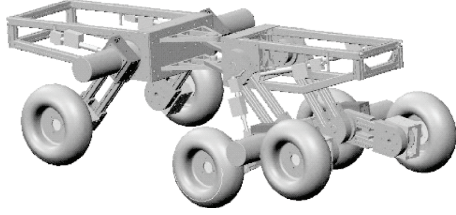


图 1 Pro/e 环境下变幅轮腿机器人虚拟样机图

Fig.1 Virtual prototype of luffing wheel-leg robot in Pro/e

2 变幅轮腿机器人智能越障动力学建模分析

2.1 智能平稳越障最大高度的计算

该轮腿机器人可用于搭载扫描仪完成人工林区的立木扫描作业, 其工作环境为路面较为平坦的人工林实验基地, 在实地运动的过程中会遇到碎石、土包、伐根等障碍物, 其中伐根障碍最为典型, 《森林采伐更新管理办法》^[24]中规定伐根高度不超过 100 mm, 该机器人在扫描行走的过程中, 由于不能转向所以必须从障碍物上跨越过去, 若采用被动越障方式, 其机身定会受到障碍物冲击所带来的影响而产生偏转, 影响机身的稳定性与立木的扫描结果。针对此问题该机器人采取单侧智能越障方式。

变幅轮腿机器人主要应用于林区行驶作业, 其本身速度低, 为了简化步态规划算法提高控制精度, 可以近似认为机器人匀速行驶。如图 2 所示, 智能越障过程可分为 3 个阶段: 人形轮腿前轮主动越障、人形轮腿后轮主动越障以及后轮腿主动越障。人形轮腿主动越障通过上摆轮腿和人形轮腿的配合实现, 后轮腿的越障则通过后轮腿的摆动单独控制。因此人形轮腿耦合运动的控制是完成机器人智能越障的关键。

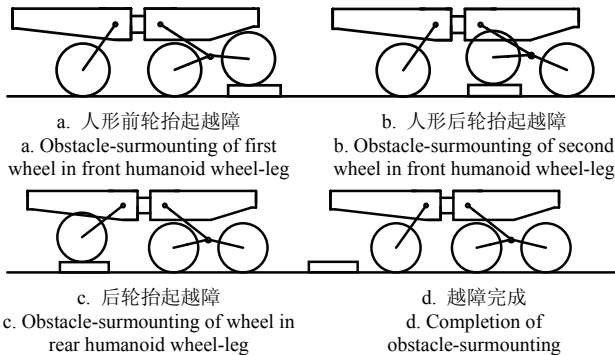
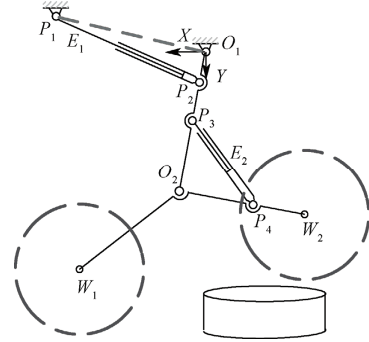


图 2 变幅轮腿机器人智能越障示意图

Fig.2 Schematic diagram of luffing wheel-leg robot intelligent obstacle-surmounting

图 3 为人形腿越障运动学模型结构图。将人字形越障简化为二维运动学模型。在前车架与上摆轮腿铰接点处建立基坐标系, 机器人各关节铰接点和轮心坐标如图 3。



注: O_1 - XY 为基坐标系, O_1 为上摆臂上铰接点坐标, O_2 为上摆臂下铰接点坐标, P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 为上推杆与下推杆铰接点坐标, W_1 、 W_2 为轮心坐标; E_1 、 E_2 为推杆长度, m。

Note: O_1 - XY is base coordinate system. O_1 is upper joint coordinate of pendulum arm. O_2 is lower joint coordinate of pendulum arm. P_1 , P_2 , P_3 and P_4 are joint coordinates of upper and lower actuators. W_1 and W_2 are center coordinates of wheels. E_1 and E_2 are lengths of actuators, m.

图 3 人形腿越障运动学模型结构图

Fig.3 Schematic diagram of humanoid wheel-leg obstacle-surmounting kinematic model

根据三角形余弦定理可以得到摆动角度 θ_1 、 θ_2 与推杆长度的关系为:

$$\begin{cases} \cos(\theta_1 + \alpha) = \frac{s_1^2 + s_2^2 - E_1^2}{2s_1s_2} \\ \cos \theta_2 = \frac{s_3^2 + s_4^2 - E_2^2}{2s_3s_4} \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ_1 为图 3 中的上摆轮腿 O_1O_2 与 X 轴的夹角, ($^\circ$); θ_2 为上摆轮腿 O_1O_2 与人形轮后轮腿 P_4O_2 的夹角, ($^\circ$); α 为上推杆上铰接点与上摆轮腿铰接点距离 O_1P_1 与 X 轴夹角, ($^\circ$); s_1 为上推杆上铰接点与上摆轮腿铰接点距离 O_1P_1 的长度, m; s_2 为上推杆下铰接点与上摆轮腿铰接点距离 P_2O_1 的长度, m; s_3 为下推杆上铰接点与人形轮腿铰接点距离 P_3O_2 的长度, m; s_4 为下推杆下铰接点与人形轮腿铰接点距离 P_4O_2 的长度, m; E_1 和 E_2 分别为上推杆与下推杆的长度, m。

通过平面运动关系可以得到人形轮腿前轮轮心、后轮轮心的 Y 轴坐标为:

$$\begin{cases} y_{w1} = l_1 \cdot \cos \theta_1 + l_2 \cdot \cos(\theta_2 + \varphi - \theta_1) \\ y_{w2} = l_1 \cdot \cos \theta_1 + l_2 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中: y_{w1} 为前轮轮心 y 轴坐标, m; y_{w2} 为后轮轮心 y 轴坐标, m; l_1 为上摆轮腿的长度, m; l_2 为人形轮腿的长度, m; φ 为人形轮腿的夹角, ($^\circ$).

设平稳越障过程中人字形前轮实现最大越障距离为 t_1 时刻, 人字形后轮实现最大越障距离为 t_2 时刻。那么存在以下关系:

$$\begin{cases} H(t_1) = y_{w2}(t_1) - y_{w1}(t_1) \\ H(t_2) = y_{w1}(t_2) - y_{w2}(t_2) \\ y_{w1}(t_2) = y_{w2}(t_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: t_1 表示前轮实现最大越障的时刻, s ; t_2 表示后轮实现最大越障的时刻, s ; $H(t_1)$ 为 t_1 时刻的越障距离, m ; $y_{w1}(t_1)$ 和 $y_{w2}(t_1)$ 表示前轮和后轮轮心在 t_1 时刻的 y 轴坐标, m ; $H(t_2)$ 为 t_2 时刻的越障距离, m ; $y_{w1}(t_2)$ 和 $y_{w2}(t_2)$ 表示前轮和后轮轮心在 t_2 时刻的 y 轴坐标, m 。

结合式 (2)、式 (3) 求解得到最大智能越障高度 H 。

$$H = 2l_2 \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_2(t_2) - \theta_2(t_1)}{2}\right) \quad (4)$$

式中: H 为越障高度, m ; $\theta_2(t_1)$ 和 $\theta_2(t_2)$ 分别表示 t_1 时刻和 t_2 时刻上摆轮腿 O_1O_2 与人形轮后轮腿 P_4O_2 的夹角, $(^\circ)$ 。

2.2 智能平稳越障轮腿运动学建模

实现轮腿机器人智能平稳越障需要满足以下两个条件: 1) 在人字形前轮主动越障阶段保证人字形前轮上升, 人字形后轮的垂直高度不变; 2) 在人字形后轮主动越障阶段保证人字形后轮上升, 人字形前轮的垂直高度不变。

根据运动微分方程, 轮心的提升速度与摆动角摆速之间的关系可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{y}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \dot{\mathbf{y}} = [\dot{y}_{w1} \quad \dot{y}_{w2}]^T \\ \dot{\boldsymbol{\theta}} = [\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2]^T \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$ 为轮腿摆动的雅克比矩阵, $\boldsymbol{\theta}$ 为摆动角角度矩阵。

根据运动微分关系可以得到:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} l_2 \sin(\varphi - \theta_1 + \theta_2) - l_1 \sin \theta_1 & -l_2 \sin(\varphi - \theta_1 + \theta_2) \\ l_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) - l_1 \sin \theta_1 & l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

摆动角摆速与电动推杆之间的关系可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}(\mathbf{E}) \cdot \dot{\mathbf{E}} \\ \dot{\mathbf{E}} = [\dot{E}_1 \quad \dot{E}_2]^T \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{J}(\mathbf{E})$ 为电动推杆与摆腿角速度的雅克比矩阵, \mathbf{E} 为推杆长度矩阵。

根据运动微关系可以得到式 (8)。结合式 (5)、式 (7) 可求解出轮心的提升速度与电动推杆之间的关系, 如式 (9) 所示。

$$\mathbf{J}(\mathbf{E}) = l_2 \cdot \begin{bmatrix} \frac{E_1}{s_1 s_2} \left(1 - \left(\frac{s_1^2 + s_2^2 - E_1^2}{2s_1 s_2} \right) \right)^{-\frac{1}{2}} \\ \frac{E_2}{s_3 s_4} \left(1 - \left(\frac{s_3^2 + s_4^2 - E_2^2}{2s_3 s_4} \right) \right)^{-\frac{1}{2}} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \mathbf{J}(\mathbf{E}) \cdot \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (9)$$

2.3 智能平稳越障轮腿动力学建模

基于拉格朗日方程建立轮腿机器人智能越障的动力学模型^[25]如式 (10) 所示, 人形轮腿摆动的过程中动能可表示为式 (11)。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial E_T}{\partial q_j} = Q_j \quad (10)$$

$$E_T = E_{\theta_1} + E_{\theta_2} + E_{\lambda_1} + E_{\lambda_2} + E_v + E_w \quad (11)$$

式中: E_T 为轮腿机器人的动能, J ; q_j 为广义坐标; \dot{q}_j 为广义速度; Q_j 为广义力; E_{θ_1} , E_{θ_2} 分别为为上摆轮腿摆动动能和人形轮腿摆动动能, J ; E_{λ_1} , E_{λ_2} 为机器人纵向倾斜与侧向倾斜的转动动能, J ; E_v 为机器人行驶的平动动能, J ; E_w 为轮胎转动动能总和, J 。平稳越障过程中假设机器人行驶速度不变, 轮胎的转速不变, 同时由于平稳越障车身摆动轻微, 轮胎变形量变化小, 在进行动力学建模的过程中, 忽略车身扰动和轮胎弹性变形对系统的影响。那么整个系统的广义坐标只有 2 个, 及 $\mathbf{q} = [q_{\theta_1} \quad q_{\theta_2}]$, 广义速度为 $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_{\theta_1} \quad \dot{q}_{\theta_2}]$ 。根据轮腿的摆动关系可以得到:

$$\begin{cases} E_{\theta_1} = \frac{1}{2} m_1 (\dot{\theta}_1 \cdot R_1)^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 \\ E_{\theta_2} = \frac{1}{2} m_2 (\dot{\theta}_2 \cdot R_2 + \dot{\theta}_1 \cdot l_1)^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: m_1 、 m_2 分别表示上摆腿和人字形摆腿的质量, kg ; R_1 、 R_2 分别表示上摆腿质心到 O_1 点的距离和人字形摆腿质心到 O_2 点的距离, m ; I_1 、 I_2 分别表示上摆腿和人字形摆腿旋转轴方向关于质心的转动惯量, $kg \cdot m^2$ 。

根据虚功原理, 系统的广义力可以表示为:

$$Q_j = \frac{\delta W}{\delta q_j} = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i \cdot \delta \mathbf{r}_i}{\delta q_j} = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_j} \cdot \delta q_j \right)}{\delta q_j} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_j} \right) \quad (13)$$

式中: Q_j 为相对于广义坐标 q_j 的广义力; \mathbf{F}_i 为作用到系统的外力矢量, N ; $\delta \mathbf{r}_i$ 为 \mathbf{F}_i 作用点处的虚位移, m ; δW 为外力 \mathbf{F}_i 的虚功求和, J ; δq_j 为广义坐标 q_j 的微分量。

在忽略车身扰动和轮胎弹性变形的影响下, 只有推杆推力与上摆轮腿及人字形轮腿的重力存在虚功, 带入式 (13) 可以得到轮腿机器人在路面行驶过程中的瞬时广义力:

$$\begin{cases} Q_{\theta_1} = \frac{2F_2 s_2 s_3 \sin(2\theta_1 - \theta_2)}{E_2} + \frac{F_1 P_x s_1 \sin \theta_1 - F_1 P_y s_1 \cos \theta_1}{E_1} + \\ m_2 g R_2 \cos\left(\frac{1}{2}\varphi - \theta_1 + \theta_2\right) + m_2 g l_1 \cos \theta_1 + m_1 g R_1 \cos \theta_1 \\ Q_{\theta_2} = m_2 g R_2 \cos\left(\frac{1}{2}\varphi - \theta_1 + \theta_2\right) - \frac{F_2 s_2 s_3 \sin(2\theta_1 - \theta_2)}{E_2} \end{cases} \quad (14)$$

式中: Q_{θ_1} 和 Q_{θ_2} 分别表示外力关于广义坐标 θ_1 和 θ_2 的广义力; P_x 、 P_y 为 P_1 点 XY 的坐标, m ; F_1 、 F_2 为推杆推力, N ; g 为重力加速度, m/s^2 。

根据拉格朗日方程 (10), 联立式 (11)、式 (12) 可以得到机器人智能平稳越障的动力学模型。通过动力学模型可以计算在智能越障初始时, 推杆推力与摆动角加速度以及推杆加速度之间的变化关系。

$$\begin{cases} (m_2 l_1^2 + m_1 R_1^2 + I_1) \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 R_2 \ddot{\theta}_2 = Q_{\theta_1} \\ (m_2 R_2^2 + I_2) \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 R_2 \ddot{\theta}_1 = Q_{\theta_2} \end{cases} \quad (15)$$

3 基于 ADAMS 的机器人越障动力学建模仿真

将 Pro/E 下建立的虚拟样机模型导入 ADAMS 环境, 在 ADAMS 环境下用高度为 100 mm, 截面直径为 180 mm 的圆柱体代替林区伐根作为跨越障碍, 给定障碍与机器人前轮轮心的距离为 400 mm, 机器人的行驶速度为 0.15 m/s, 推杆的额定速度为 15 mm/s, 人形轮腿的初始参数如表 1 所示。

表 1 人形轮腿初始参数表

Table 1 Initial parameter of humanoid wheel-leg

名称 Name	数值 Value	名称 Name	数值 Value
固定夹角 Fixed angle $\alpha/^\circ$	8.92	人形轮腿夹角 Angle of humanoid wheel-leg $\phi/^\circ$	153
上摆轮腿摆动角 Swing angle of swing up wheel-leg $\theta_1/^\circ$	35	人形腿摆动角 Swing angle of humanoid wheel-leg $\theta_2/^\circ$	48.5
上推杆上铰接点与上摆轮腿铰接点距离 Distance from upper link point of upper actuator to link joint of swing up wheel-leg s_1/mm	658	上推杆下铰接点与上摆轮腿铰接点距离 Distance from lower link point of upper actuator to link joint of swing up wheel-leg s_2/mm	363
下推杆上铰接点与人形轮腿铰接点距离 Distance from upper link point of lower actuator to link joint of humanoid wheel-leg s_3/mm	317	下推杆下铰接点与人形轮腿铰接点距离 Distance from lower link point of lower actuator to link joint of humanoid wheel-leg s_4/mm	204
上摆轮腿长度 Length of swing up wheel-leg l_1/mm	476	人形轮腿长度 Length of humanoid wheel-leg l_2/mm	311
上推杆长度 Length of upper actuator E_1/mm	383	下推杆长度 Length of lower actuator E_2/mm	198

根据已知参数进行机器人智能越障动力学计算, 联立式 (14) 和式 (15) 得到, 上推杆初始预紧力为 970 N, 下推杆初始预紧力为 0, 将推杆额定推力 1 200 N 带入动力学模型, 计算得到推杆的加速时间为 0.032 s, 软件设定的时间步长为 0.1 s, 可以忽略初始推杆的加速时间, 将已知参数带入式 (9), 通过最小二乘法用时间的一次函数拟合速度关系表达式, 可以得到快速越障过程中推杆间的速度关系如下:

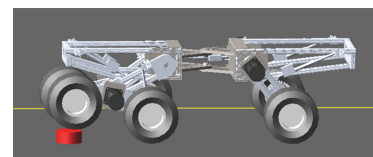
$$v_{E1} = \begin{cases} -15 & 0 < t \leq 2 \\ 0 & 2 < t \leq 4 \\ 15 & 4 < t \leq 6 \\ 0.1129(t-6) - 9.893 & 6 < t \leq 9 \\ 0 & 9 < t \leq 11 \\ -0.1129(t-11) - 9.554 & 11 < t \leq 14 \end{cases} \quad (16)$$

$$v_{E2} = \begin{cases} 1.087t + 2.754 & 0 < t \leq 2 \\ 0 & 2 < t \leq 4 \\ 1.087(t-4) - 4.928 & 4 < t \leq 6 \\ -15 & 6 < t \leq 9 \\ 0 & 9 < t \leq 11 \\ 15 & 11 < t \leq 14 \end{cases} \quad (17)$$

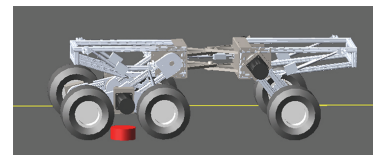
式中: v_{E1} 为上推杆智能越障的速度规划函数, mm/s; v_{E2} 为下推杆智能越障的速度规划函数, mm/s; t 为运行时间, s。

其中速度为正表示推杆伸长, 速度为负表示推杆收缩, 根据计算可以得出人形轮腿前轮主动越障过程中上推杆的速度为额定速度, 下推杆速度根据速度配合关系得出, 人形轮腿后轮主动越障过程中下推杆速度为额定速度, 上推杆速度根据配合关系得出, 根据轮胎半径、障碍直径以及轮胎的行驶速度估算出无推杆调整的越障时间为 2 s, 在整个越障的过程中, 无推杆速度调整越障的时间为 2~4 s 和 9~11 s。该步态规划理论上满足机器人在智能越障的过程中纵倾角与侧倾角近似为 0, 同时保证越障高度与障碍物高度同为 100 mm, 减小轮腿不必要的抬升, 提高智能越障效率。

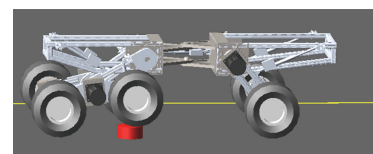
将机器人的行驶速度以及推杆的速度变化作为输入进行 ADAMS 动力学仿真, 机器人越障过程如图 4 所示, 推杆的速度与推力变化如图 5a、5b 所示, 根据 ADAMS 动力学仿真结果可以看出在整个越障过程中上推杆的最大受力为 1 266 N, 下推杆的最大受力为 62 N, 上推杆的受力远远大于下推杆的受力, 上推杆所需功率如图 5c 所示, 在越障过程中的最大功率为 19 W, 所选电动推杆的额定功率为 30 W, 满足机器人平稳越障的要求。



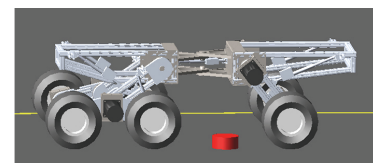
a. 人形腿前轮越障仿真
a. Simulation of first humanoid wheel obstacle-surmounting



b. 人形腿前轮越障完成
b. Completion of first humanoid wheel obstacle-surmounting



c. 人形腿后轮越障仿真
c. Simulation of second humanoid wheel obstacle-surmounting



d. 人形腿后轮越障完成
d. Completion of second humanoid wheel obstacle-surmounting

图 4 ADAMS 环境下人形腿越障示意图

Fig.4 Schematic diagram of humanoid wheel-leg robot intelligent obstacle-surmounting in ADAMS

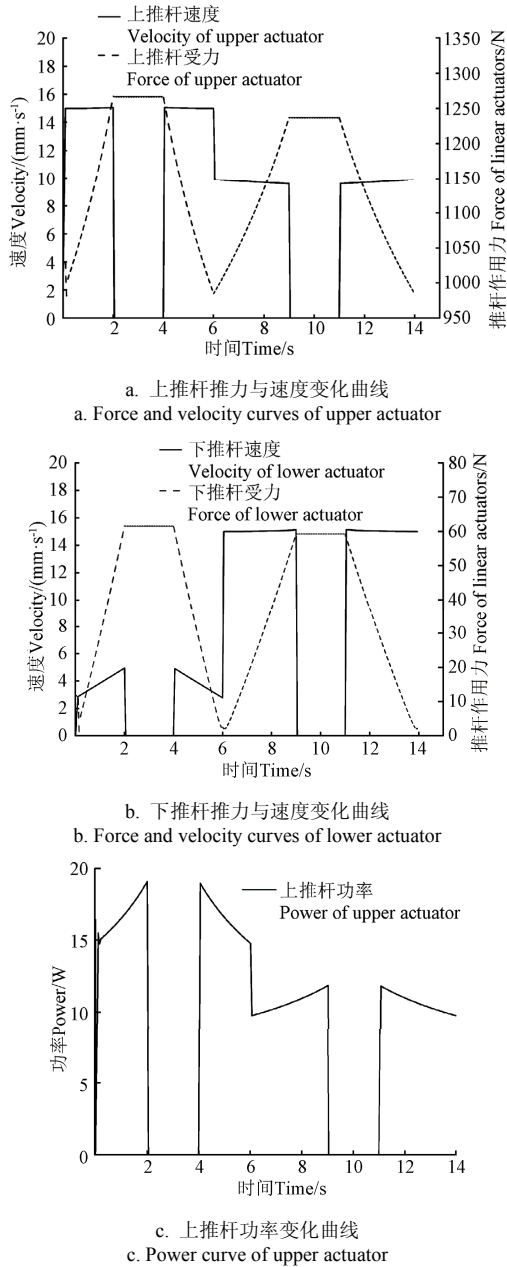


图 5 ADAMS 环境下电动推杆动态特性仿真

Fig.5 Dynamic simulation of actuators in ADAMS

4 智能越障试验与分析

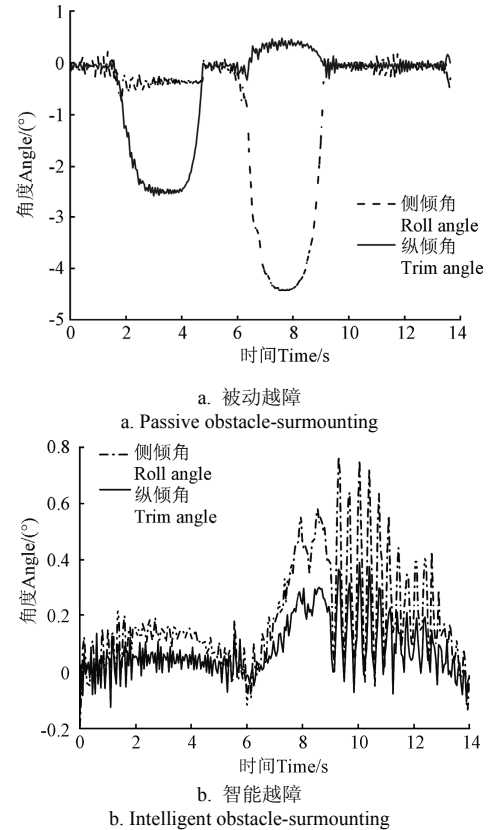
对试验机器人进行平稳越障试验,以 2 块砖头叠加作为越障的障碍物,高度为 10 cm,如图 6 所示。推杆的驱动采用开环控制,首先得到推杆的功率变化规律与对应的脉冲宽度调制输入参数的对应关系,根据 ADAMS 的仿真结果将推杆的功率变化曲线编译到控制程序中,用 ADIS IMU 惯导单元读取机器人框架侧倾角和纵倾角的数值作为平稳越障的检测。

为检验平稳越障效果,对机器人越障进行 2 组试验:针对同样的障碍 100 mm,同样的行驶速度 0.15 m/s,第 1 组试验机器人的轮腿不作调整,采用被动碰撞越障的方式;第 2 组试验加入轮腿调整程序,采用智能越障的方式。分别用 ADIS IMU 惯导单元读取 2 次越障过程中机器人框架侧倾角与纵倾角的变化同变化曲线,如图 7 所示。

a. 人形腿前轮越障试验
a. Test of first humanoid wheel obstacle-surmountingb. 人形腿后轮越障试验
b. Test of second humanoid wheel obstacle-surmounting

图 6 人形轮腿智能越障试验图

Fig.6 Test of humanoid wheel-leg robot intelligent obstacle-surmounting



注:纵倾的正值为前倾,负值为后倾;侧倾的正值为左倾,负值为右倾。
Note: For trim angle, positive number means forward, and negative number means backward; for roll angle, positive number means leftward, and negative number means rightward.

图 7 智能越障与被动越障的纵倾角和侧倾角对比图

Fig.7 Trim angle and roll angle comparison between passive and intelligent obstacle-surmounting

对试验结果进行对比分析,经过主动调整后,机器人在越障的过程中框架的偏转得到了很好的改善。图 7 中,纵倾的正值为前倾,负值为后倾;侧倾的正值为左倾,负值为右倾。被动碰撞越障下,机器人的最大侧倾角为右倾 4.5°,最大纵倾角为前倾 2.5°;主动调整下,机器人的侧倾角最大值为左倾 0.75°,最大纵倾角为前倾 0.4°。该试验验证了之前理论模型与仿真模型的正确性,同时证明了智能越障系统的加入对于机器人机身稳定性提高效果显著。

图 7 中,机器人智能越障 6s 以后侧倾角和纵倾角的角度变化明显大于 6s 前的角度变化数值。由此可见,智能越障下,人形轮腿后轮越障过程中侧倾角与纵倾角的

波动幅值明显大于人形轮腿前轮智能越障,可能产生的原因有 2 个:一是所拟合的速度函数与速度的理论变化存在偏差;二是开环控制程序在推杆的控制中存在的偏差,以上原因导致在轮腿的调整中存在误差,由于误差的累积使人形轮腿后轮越障误差大于前轮越障的误差。

5 结 论

本文采用拉格朗日方程对机器人智能越障进行动力学建模,用最小二乘法拟合了推杆的速度关系,通过动态仿真以及试验结果分析对该机器人的智能越障性能进行了评价,经试验证明越障过程中,该轮腿机器人在智能越障 100 mm 高度过程中,采用智能越障步态规划后机身的侧倾角与纵倾角较被动碰撞越障的右倾 4.5° 和前倾 2.5° 减小到左倾 0.75° 和前倾 0.4° ,智能越障系统的加入对于机器人的侧向以及在纵向稳定性的提高效果显著。

[参 考 文 献]

- [1] Bruzzone L, Quaglia G. Review article: Locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments[J]. *Mechanical Sciences*, 2012, 3(2): 49—62.
- [2] Conduraru A, Doroftei I, Conduraru I. An overview on the design of mobile robots with hybrid locomotion[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 837: 555—560.
- [3] 罗庆生, 魏天骐, 莫洋, 等. 多自由度模块化链节式 8 足机器人三总线控制系统设计[J]. *北京理工大学学报*, 2013, 33(7): 698—703.
Luo Qingsheng, Wei Tianqi, Mo Yang, et al. Three-Bus control system design for centipede-like robot[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(7): 698—703. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李智卿, 马书根, 李斌, 等. 具有自适应能力轮—履复合变形移动机器人的开发[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(5): 1—10.
Li Zhiqing, Ma Shugen, Li Bin, et al. Development of a transformable wheel-track robot with self-adaptive ability[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(5): 1—10. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李允旺, 葛世荣, 朱华, 等. 四履带双摆臂机器人越障机理及越障能力[J]. *机器人*, 2010, 32(2): 157—165.
Li Yunwang, Ge Shirong, Zhu Hua, et al. Obstacle-surmounting mechanism and capability of four-track robot with two swing arms[J]. *Robot*, 2010, 32(2): 157—165. (in Chinese with English abstract)
- [6] Wang Xiaoyun, Yu Hongnian, Wang Hongbo, et al. Kinematics analysis for the leg mechanism of a wheel-leg hybrid rescue robot[C]// *Proceeding of the 2013 International Conference Advanced Mechatronic Systems*, Luoyang, IEEE, 2013: 369—373.
- [7] 刘静, 赵晓光, 谭民. 腿式机器人的研究综述[J]. *机器人*, 2006, 28(1): 81—88.
Liu Jing, Zhao Xiaoguang, Tan Min. Legged robots: A review[J]. *Robot*, 2006, 28(1): 81—88. (in Chinese with English abstract)
- [8] Lindemann A, Bickler B, Harrington D, et al. Mars exploration rover mobility development[J]. *Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(2): 19—26.
- [9] Hidalgo J, Cordes F. Kinematics modeling of a hybrid wheeled-leg planetary rover[C]// *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, IEEE, 2012.
- [10] Grand C. Stability and traction optimization of a reconfigurable wheel-Legged robot[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2004, 23(10/11): 1041—1058.
- [11] Besseron G, Grand C, Ben F. Stability control of an hybrid wheel-legged robot[J]. *8th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, 2005(15): 533—540.
- [12] Smith T, Chavez D. A practical comparison of motion planning techniques for robotic legs in environments with obstacles[C]// *Space Mission Challenges for Information Technology*. Third IEEE International Conference on , 2009: 155—162.
- [13] SunSpiral V, Wheeler D, Chavez D, et al. Development and field testing of the footfall planning system for the ATHLETE robots[J]. *Journal of Field Robotics*, 2012, 29(3): 483—505.
- [14] SunSpiral V, Wheeler D, Broxton M, et al. Footfall: A ground based operations toolset enabling walking for the ATHLETE rover[C]// *AIAA Space 2008 Conference & Exposition*, San Diego, California, 2008.
- [15] 宋小康, 谈大龙, 吴镇炜, 等. 全地形轮式移动机器人运动学建模与分析[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(6): 148—154.
Song Xiaokang, Tan Dalong, Wu Zhenwei, et al. Kinematics modeling and analyses of all-terrain wheeled mobile robots[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(6): 148—154. (in Chinese with English abstract)
- [16] 和永智, 刘伟军, 周船, 等. 轮式移动机器人与地形交互运动仿真研究[J]. *机器人*, 2007, 29(5): 498—504.
He Yongzhi, Liu Weijun, Zhou Chuan, et al. Simulation of mutual motion between wheeled mobile robots and terrains[J]. *Robot*, 2007, 29(5): 498—504. (in Chinese with English abstract)
- [17] 常勇, 马书根, 王洪光, 等. 轮式移动机器人运动学建模方法[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(5): 30—36.
Chang Yong, Ma Shugen, Wang Hongguang, et al. Method of kinematic modeling of wheeled mobile robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(5): 30—36. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王亚, 陈思忠, 李海涛, 等. 高地面仿形性动力底盘的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 2(1): 39—44.
Wang Ya, Chen Sizhong, Li Haitao, et al. Design and experiment of high performance profiling terrain chassis with power train[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 2(1): 39—44. (in Chinese with English abstract)
- [19] 谷德明. 轮腿式移动机器人平台运动学分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2010.
Gu Deming. Wheel-legged Mobile Robot Platform Kinematic Analysis[D]. Tianjin: Hebei University of Technology Mechatronic Engineering, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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[J]. *机器人*, 2010, 32(3): 390—397.
Tian Haibo, Fang Zongde, Gu Yufeng. Dynamic modeling for obstacle negotiation of wheel-legged robot and analysis

- on its influential factors[J]. Robot, 2010, 32(3): 390—397. (in Chinese with English abstract)
- [21] Nakajima S, Nakano E. Adaptive gait for large rough terrain of a leg-wheel robot (third report: step-down gait)[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2009, 21(1): 12.
- [22] Ding Xilun, Li Kejia, Xu Kun. Dynamics and wheel's slip ratio of a wheel-legged robot in wheeled motion considering the change of height[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(5): 1060—1067.
- [23] 张韬懿, 王田苗, 吴耀, 等. 全地形无人车的设计与实现[J]. 机器人, 2013, 35(6): 657—664.
Zhang Taoyi, Wang Tianmiao, Wu Yao, et al. Design and realization of an all-terrain unmanned ground vehicle[J]. Robot, 2013, 35(6): 657—664. (in Chinese with English abstract)
- [24] 中华人民共和国国家林业局. 森林采伐更新管理办法[EB/OL]. (1987-09-10)[2015-5-31]. <http://www.forestry.gov.cn/portal/main/s/3093/content-459873.html>.
- [25] 牛雪梅, 高国琴, 刘辛军, 等. 三自由度驱动冗余并联机构动力学建模与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 31—41.
Niu Xuemei, Gao Guoqin, Liu Xinjun, et al. Dynamics modeling and experiments of 3-DOF parallel mechanism with actuation redundancy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(16): 31—41. (in Chinese with English abstract)

Stability analysis and gait planning for luffing wheel-legged robot during intelligent obstacle-surmounting process

Sun Zhibo, Liu Jinhao^{*}, Yu Chunzhan, Kan Jiangming

(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Luffing wheel-leg robot is applied to the operation on uneven surface, because of the characteristics such as high mobility, obstacle-surmounting capability and strong stability. In order to guarantee the smoothness of obstacle surmounting, the paper introduces a novel robot with 6 wheel-legs. This robot is a mobile equipment designed to surmount obstacles actively on forest road. The robot is a combination of 2 frameworks, 2 rear wheel-legs and 2 front wheel-legs. Wheel-legs are attached to the frameworks and distributed on both sides symmetrically. Linear actuators connected between wheel-legs and frameworks can lift the wheel-leg up and down through the obstacle-surmounting process. Front wheel-leg consists of a front straight wheel-leg and a front inverse V-shaped wheel-leg which means the front wheel-leg has 2 degrees of freedom. In order to achieve the intelligent obstacle-surmounting skill, 2 linear actuators are applied to the front wheel-leg on each side of the framework. Through analyzing the simplified model, the intelligent obstacle-surmounting process can be divided into 3 stages: obstacle surmounting of the first wheel in front wheel-leg, obstacle surmounting of the second wheel in front wheel-leg and obstacle surmounting of the rear wheel. The former 2 stages are controlled by the composite motion of the front wheel-legs, and the third one is controlled by the rear wheel-leg motion only, which means intelligent obstacle surmounting of the front wheel-leg is the key factor during the process. The kinematic model is established based on the movement relationship of the system. Through the calculation of the kinematic model, the maximum height of the intelligent obstacle-surmounting process is obtained, which is related to the length of the inverse V-shaped wheel-legs, the angle between the 2 legs in the inverse V-shaped wheel-legs and the swing angle range of the inverse V-shaped wheel-legs. According to the motion differential equation, the Jacobian matrix between the velocities on the wheel center of inverse V-shaped wheel-legs and the linear actuators is achieved. Based on the Lagrange equation, the dynamic model of the wheel-legs during the obstacle-surmounting process is established. According to the dynamic model, the force of the linear actuators can be calculated at the beginning of the progress. In ADAMS, the obstacle with 100 mm height and 180 mm diameter is established for the intelligent obstacle-surmounting simulation. Based on the Jacobian matrix and the initial parameter of the wheel-leg, the velocities of the actuators are fitted by the OLS (method of least squares), which is the input of the simulation. After simulation, the dynamic characteristics of the actuators are obtained. The maximum power is less than the rated power of the actuator, which proves the feasibility of the intelligent obstacle-surmounting process. The test of surmounting the obstacle with 10 cm height is conducted for further validation. With the same structure, velocity and obstacle, the tests are conducted twice using the intelligent obstacle-surmounting method and the passive method respectively. The experimental result shows that the roll angle and trim angle by the intelligent obstacle-surmounting system are heavily decreased respectively from 4.5° and 2.5° to 0.75° and 0.4° compared with the passive method. Simulations and tests prove the validity of theoretical model and the effectiveness of intelligent obstacle-surmounting method.

Key words: robots; models; computer simulation; wheel-leg robot; dynamic; intelligent obstacle-surmounting; stability