

液压驱动型四足机器人对角小跑步态本体水平位置控制方法*

郎琳, 许佳奇, 张献鹏, 王剑, 马宏绪, 韦庆
(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 为了对对角小跑中四足机器人本体的水平位置进行控制, 建立基于沿支撑线方向运动分解的机器人近似动力学模型, 将本体和对角支撑腿简化为一个七连杆结构和一个线性倒立摆, 并且基于线性倒立摆解析模型提出摆动腿落足点位置计算方法, 进而实现对本体水平位置的控制。针对液压作动器伸缩速度受限的问题, 利用单腿冗余关节将关节角速度优化问题转化为标准二次型规划问题, 通过设计二次型规划问题解法, 降低对摆动腿关节角速度的需求, 并且避免了传统伪逆方法可能产生的腿部奇异位型。仿真和实验结果表明: 该方法能够实现在关节角速度受限的情况下, 有效跟踪本体水平位置的期望轨迹。

关键词: 四足机器人; 对角小跑; 动力学模型; 落足点控制; 关节角速度优化

中图分类号: TP13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)01-142-06

Horizontal body position control method of a trotting hydraulic driven quadruped robot

LANG Lin, XU Jiaqi, ZHANG Xianpeng, WANG Jian, MA Hongxu, WEI Qing

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to control the horizontal body position of a trotting hydraulic quadruped robot, an approximated dynamical model was built based on the motion decomposition along the support line, which simplifies the body and the stance legs to a seven-link mechanism and a linear inverted pendulum. A calculation method for landing positions of swing feet was proposed based on the analytic solution of the linear inverted pendulum model. It was realized to control the horizontal position of the body. For the velocity limitations of the hydraulic cylinders pushing and pulling, an optimization problem for the joint angular velocities was formatted as a QP problem, and a QP solver was designed to decrease the demands for the joint angular velocities. In comparison to the conventional pseudo-inverse optimization algorithm, the proposed algorithm could avoid the singular state of the leg more effectively. The simulation and experiment results show that the desired horizontal body position trajectories can be tracked accurately by using the proposed algorithms, even the joint angular velocities being limited.

Key words: quadruped robot; trotting gait; dynamical model; landing position control; joint angular velocity optimization

四足机器人本体的水平位置控制主要分为两种方法: 基于模型控制方法和无模型控制方法。其中基于模型控制方法的主要思想是将机器人等效为一个参考模型, 基于参考模型对机器人本体进行规划和控制。Raibert 提出将对角小跑中的四足机器人简化为一个三维弹簧负载倒立摆 (Spring Loaded Inverted Pendulum, SLIP) 模型, 基于模型提出了用步长调整本体速度的直觉控制算法, 并将其应用于 Bigdog^[1-2], LS3^[3] 系列四足机器人, 取得了良好的实验效果, 使得 Bigdog 成为机器人领域中具有划时代意义的巅峰之作^[4]。Ugurlu 等提出将对角小跑中的四足机器人等效为一个倒立摆模型, 基于模型在线生成本体质心轨

迹, 在 HyQ 四足机器人平台上实现了在不平整地面上对本体位置轨迹的跟踪^[5-6]。阻抗控制是一种应用广泛的基于模型的控制方法, 其主要思想是通过设计控制器使得四足机器人本体和腿部等效为弹性阻尼模型, 使得机器人在受到外力冲击的情况下体现出良好的柔顺性^[7-9]。在一个独立的支撑期内, 四足机器人本体的动力学模型可以分为静态稳定子系统和静态不稳定子系统。以上参考模型的不足之处在于忽略了本体位姿变量中静态稳定的分量, 不能完全反映对角小跑步态的动力学特性。增强学习方法, 作为一种无模型控制方法, 广泛应用于四足机器人的运动控制。其优点在于不依赖系统模型, 缺点在于训练过程的

* 收稿日期: 2015-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473304); 国家 863 计划资助项目(2015AA042202)

作者简介: 郎琳(1985—), 男, 辽宁丹东人, 博士研究生, E-mail: langlin850214@sina.com;

王剑(通信作者), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, E-mail: jianwang-12@163.com

效率以及稳定性难以得到保证^[10-12]。本文建立了基于沿支撑线方向运动分解的四足机器人对角小跑步态动力学模型,将本体的六维位姿变量分解为静态稳定分量和静态不稳定分量。之后设计落足点控制算法使得静态稳定分量匹配静态不稳定分量,实现对本体期望水平位置轨迹的跟踪。

机器人腿部关节驱动系统是实现四足机器人运动的重要单元。而伺服液压驱动作为一种高能量密度的驱动方式,是解决四足机器人高负载能力和高机动性高动态问题的有效研究方法^[13]。但是液压作动器的最大伸缩速度的受限导致腿部关节的角速度受限,影响摆动腿足端跟踪期望轨迹,进而影响本体水平位置的控制性能。

1 落足点控制算法

1.1 四足机器人对角小跑步态动力学模型

在对角小跑步态中,两组对角腿周期性地地在摆动期和支撑期之间切换,使得机器人本体位姿动态稳定。本节以图1所示相位为例(左前腿和右后腿处于支撑期,右前腿和左后腿处于摆动期),建立本体与支撑腿的动力学模型。

首先,定义本体坐标系 ΣO :原点 O 位于支撑腿足端连线的中点, X 轴的方向为机器人的前进速度方向, Y 轴与重力加速度方向相反, Z 轴的方向符合右手法则。其次,定义两个平面: V 平面通过支撑腿足端连线且垂直于水平面, L 平面同时垂直于 V 平面和水平面且通过 O 点。

将四足机器人分别投影到 V 平面和 L 平面,可以将本体和支撑腿近似等效为一个七连杆结构和一个线性倒立摆,如图1所示。基于拉格朗日方程,七连杆结构的动力学方程为:

$$\mathbf{M}_{11}\ddot{\mathbf{q}}_{11} + \mathbf{C}_{11}\dot{\mathbf{q}}_{11} + \mathbf{M}_{12}\ddot{\mathbf{q}}_{12} + \mathbf{C}_{12}\dot{\mathbf{q}}_{12} + \mathbf{N}_{11} = \mathbf{J}_{11}\mathbf{F}_{e1} \quad (1)$$

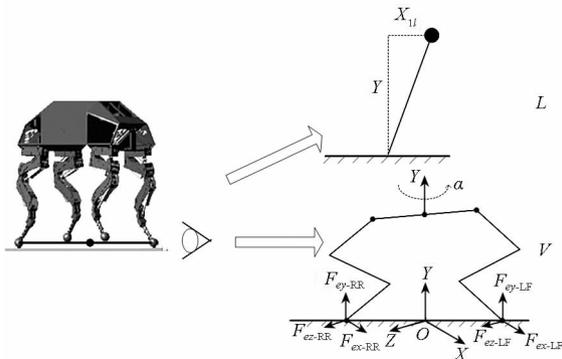


图1 对角小跑步态四足机器人近似模型

Fig. 1 Approximate model of a trotting quadruped robot

$$\mathbf{M}_{14}\ddot{\mathbf{q}}_{12} + \mathbf{C}_{14}\dot{\mathbf{q}}_{12} + \mathbf{M}_{13}\ddot{\mathbf{q}}_{11} + \mathbf{C}_{13}\dot{\mathbf{q}}_{12} + \mathbf{N}_{12} = \boldsymbol{\tau}_{12} + \mathbf{J}_{12}\mathbf{F}_{e1} \quad (2)$$

其中: $\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11,5 \times 5} & \mathbf{M}_{12,5 \times 8} \\ \mathbf{M}_{21,8 \times 5} & \mathbf{M}_{22,8 \times 8} \end{bmatrix}$ 为惯性矩阵;

$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11,5 \times 5} & \mathbf{C}_{12,5 \times 8} \\ \mathbf{C}_{21,8 \times 5} & \mathbf{C}_{22,8 \times 8} \end{bmatrix}$ 为哥式力矩阵; $\begin{bmatrix} \mathbf{N}_{1,5 \times 1} \\ \mathbf{N}_{2,8 \times 1} \end{bmatrix}$ 为重力

项矩阵; $[X \ Y \ Z]^T$ 为坐标系 ΣO 中本体的位置; α, β, γ 分别为本体的方位角、俯仰角和滚动角; $\mathbf{q}_{11} = [X \cos\varphi - Z \sin\varphi \ Y \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$, φ 为支撑线与机器人前向速度之间的夹角; \mathbf{q}_{12} 为支撑腿关节角向量; $\boldsymbol{\tau}_{12}$ 为支撑腿关节驱动力矩向量; $[\mathbf{J}_{11,5 \times 6} \ \mathbf{J}_{12,8 \times 6}]^T$ 为雅克比矩阵; $\mathbf{F}_{e1,6 \times 1}$ 为支撑腿足端与地面之间的接触力向量。

线性倒立摆模型的解析解为:

$$X_{1l}(t) = X_{1l}(0) \cosh\left(\frac{t\sqrt{g}}{\sqrt{Y}}\right) + \sqrt{\frac{Y}{g}} \dot{X}_{1l}(0) \sinh\left(\frac{t\sqrt{g}}{\sqrt{Y}}\right) \quad (3)$$

其中, $X_{1l} = X \sin\varphi + Z \cos\varphi$, g 为重力加速度。

类似地,当机器人处于另一个相位(右前腿和左后腿处于支撑期,左前腿和右后腿处于摆动期),本体和支撑腿的近似动力学模型为:

$$\mathbf{M}_{21}\ddot{\mathbf{q}}_{21} + \mathbf{C}_{21}\dot{\mathbf{q}}_{21} + \mathbf{M}_{22}\ddot{\mathbf{q}}_{22} + \mathbf{C}_{22}\dot{\mathbf{q}}_{22} + \mathbf{N}_{21} = \mathbf{J}_{21}\mathbf{F}_{e2} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{24}\ddot{\mathbf{q}}_{22} + \mathbf{C}_{24}\dot{\mathbf{q}}_{22} + \mathbf{M}_{23}\ddot{\mathbf{q}}_{21} + \mathbf{C}_{23}\dot{\mathbf{q}}_{22} + \mathbf{N}_{22} = \boldsymbol{\tau}_{22} + \mathbf{J}_{22}\mathbf{F}_{e2} \quad (5)$$

$$X_{2l}(t) = X_{2l}(0) \cosh\left(\frac{t\sqrt{g}}{\sqrt{Y}}\right) + \sqrt{\frac{Y}{g}} \dot{X}_{2l}(0) \sinh\left(\frac{t\sqrt{g}}{\sqrt{Y}}\right) \quad (6)$$

其中, $\mathbf{q}_{21} = [X \cos\varphi + Z \sin\varphi \ Y \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$, $X_{2l} = X \sin\varphi - Z \cos\varphi$ 。

1.2 落足点控制算法

四足机器人在一个对角小跑步态周期内的动作时序如图2所示,其中 T 为步态周期。

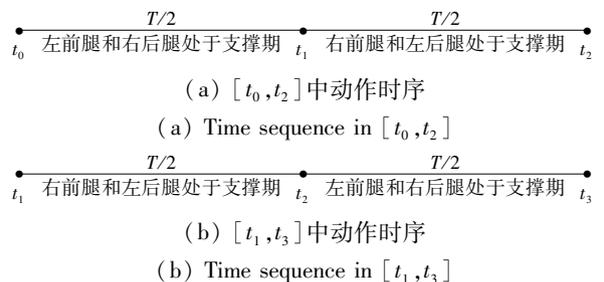


图2 四足机器人在一个对角小跑步态周期内的动作时序

Fig. 2 Time sequence of quadruped robot in a trotting gait cycle

如图 2(a) 所示, 落足点控制算法的思路是在 t_0 时刻设计 t_1 时刻摆动腿落足位置 (即 $X_{2l}(t_1)$), 使得 t_2 时刻本体水平位置误差 ($e_x = X - X_d$ 和 $e_z = Z - Z_d$, 下标 d 表示期望值) 收敛到 0。

在 t_1 时刻, 应用文献[14]中提出的双环接触力分配/控制策略, 能够实现 V 平面内本体的位置跟踪期望轨迹, 即式(7)。由于篇幅所限, 本节不重复论述。

$$X(t_1) \cos\varphi - Z(t_1) \sin\varphi = X_d(t_1) \cos\varphi - Z_d(t_1) \sin\varphi \quad (7)$$

根据式(3), 可以估计 t_1 时刻机器人本体在 L 平面内的位置。

$$\begin{aligned} & X(t_1) \sin\varphi + Z(t_1) \cos\varphi = \\ & X_{1l}(t_0) \cosh\left(\frac{T\sqrt{g}}{2\sqrt{Y}}\right) + \frac{\sqrt{Y}}{\sqrt{g}} \dot{X}_{1l}(t_0) \sinh\left(\frac{T\sqrt{g}}{2\sqrt{Y}}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

综合式(7)和式(8), 求解出 $X(t_1)$ 和 $Z(t_1)$, 通过微分计算, 可以得到 $\dot{X}(t_1)$ 和 $\dot{Z}(t_1)$ 。进一步地, 可以求解出 $\dot{X}_{2l}(t_1)$ 的估计值。

$$\dot{X}_{2l}(t_1) = \dot{X}(t_1) \sin\varphi - \dot{Z}(t_1) \cos\varphi \quad (9)$$

类似于支撑期(t_0, t_1], t_2 时刻 V 平面内机器人本体的位置为:

$$X(t_2) \cos\varphi + Z(t_2) \sin\varphi = X_d(t_1) \cos\varphi + Z_d(t_1) \sin\varphi \quad (10)$$

为了保证本体水平位置误差在 t_2 时刻收敛到 0, 根据线性倒立摆模型 (式(6)), $X_{2l}(t_1)$ 需要满足式(11)。

$$\begin{aligned} & X(t_2) \sin\varphi - Z(t_2) \cos\varphi = X_d(t_2) \sin\varphi - Z_d(t_2) \cos\varphi \\ & = X_{2l}(t_1) \cosh\left(\frac{T\sqrt{g}}{2\sqrt{Y}}\right) + \frac{\sqrt{Y}}{\sqrt{g}} \dot{X}_{2l}(t_1) \sinh\left(\frac{T\sqrt{g}}{2\sqrt{Y}}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

将式(9)代入式(11), 得到 t_1 时刻摆动腿落足点位置。

$$X_{2l}^+(t_1) = \frac{X_d(t_2) \sin\varphi - Z_d(t_2) \cos\varphi - \frac{\sqrt{Y}}{\sqrt{g}} [\dot{X}(t_1) \sin\varphi - \dot{Z}(t_1) \cos\varphi] \sinh\left(\frac{T\sqrt{g}}{2\sqrt{Y}}\right)}{\cosh\left(\frac{T\sqrt{g}}{2\sqrt{Y_0}}\right)} \quad (12)$$

机器人的动作时序如图 2(b) 所示, 经过与以上推导过程相类似的计算, 可以在 t_1 时刻设计摆动腿在 t_2 时刻落足点位置 (结果为式(13)), 使得 t_3 时刻机器人本体水平位置误差收敛到 0。

$$X_{1l}^+(t_2) = \frac{X_d(t_3) \sin\varphi + Z_d(t_3) \cos\varphi - \frac{\sqrt{Y}}{\sqrt{g}} [\dot{X}(t_2) \sin\varphi + \dot{Z}(t_2) \cos\varphi] \sinh\left(\frac{T\sqrt{g}}{2\sqrt{Y}}\right)}{\cosh\left(\frac{T\sqrt{g}}{2\sqrt{Y_0}}\right)} \quad (13)$$

2 摆动腿关节角速度优化算法

伺服液压驱动是一种高能量密度的驱动方式, 所以液压驱动型四足机器人具有高负载能力、高机动性的特点。但是液压作动器的伸缩速度受到液压缸结构、液压油种类等条件的限制, 这导致机器人腿部关节的最大角速度受到限制, 影响落足点控制的性能, 进而影响本体水平位置误差的收敛性。为了降低腿部关节角速度, 在机器人腿部结构中增加一个前向冗余关节, 如图 3 所示, 设计优化算法, 在线计算摆动腿期望关节角度, 降低对最大关节角速度的需求。

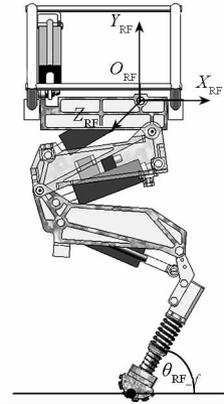


图 3 包含一个前向冗余关节的腿部结构

Fig. 3 Leg structure including a sagittal redundant joint

定义单腿坐标系 $\sum O_{LF}$, $\sum O_{RF}$, $\sum O_{LR}$, $\sum O_{RR}$, 原点分别位于各个腿部髋部安装点, 坐标轴方向与坐标系 $\sum O$ 相同, 下标 f 表示踝关节入射角, 如图 3 所示, θ_{RF} 为右前腿踝关节入射角。根据在第 1 节中计算得到的摆动腿期望落足点位置, 加入足端点在抬腿和落足时刻相对于地面速度为 0 的约束条件, 以右前腿为例, 采用正弦函数曲线, 足端点在 $\sum O_{RF}$ 中的规划轨迹为:

$$x_{e_RF} = x_{e_RF}(t_0) + 0.5 [x_{e_RF}(t_1) - x_{e_RF}(t_0)] \cdot \left\{ 1 + \sin\left[\frac{2\pi}{T}(t - t_0) + \frac{3\pi}{2}\right] \right\} \quad (14)$$

$$y_{e_RF} = y_{e_RF}(t_0) + 0.5 [y_{e_RF}(t_1) - y_{e_RF}(t_0)] \cdot \left\{ 1 + \sin\left[\frac{2\pi}{T}(t - t_0) + \frac{3\pi}{2}\right] \right\} \quad (15)$$

$$z_{e_RF} = z_{e_RF}(t_0) + 0.5 [z_{e_RF}(t_1) - z_{e_RF}(t_0)] \cdot \left\{ 1 + \sin\left[\frac{2\pi}{T}(t - t_0) + \frac{3\pi}{2}\right] \right\} \quad (16)$$

其中, $[x_{e_RF}(t_0) \ y_{e_RF}(t_0) \ z_{e_RF}(t_0)]^T$ 和 $[x_{e_RF}(t_1) \ y_{e_RF}(t_1) \ z_{e_RF}(t_1)]^T$ 为 t_0 和 t_1 时刻足端点在 $\sum O_{RF}$ 中的位置向量, $y_{e_RF}(t_1) -$

$y_{e_RF}(t_0)$ 为抬腿高度, $x_{e_RF}(t_1)$ 和 $z_{e_RF}(t_1)$ 由式(17)、式(18) 计算得到。

$$x_{e_RF}(t_1) = -X_{2l}(t_1) \sin\varphi \quad (17)$$

$$z_{e_RF}(t_1) = X_{2l}(t_1) \cos\varphi \quad (18)$$

单腿关节角速度优化指标为:

$$Q = \min \frac{\dot{\theta}_{RF}^T \dot{\theta}_{RF}}{2} \quad (19)$$

其中, $\theta_{RF} = [\theta_{RF_1} \ \theta_{RF_2} \ \theta_{RF_3} \ \theta_{RF_4}]^T$ 为右前腿关节角, 下标 1, 2, 3, 4 表示踝关节、膝关节、髌部前向关节和髌部侧向关节。

在右前腿摆动过程中, 关节角速度需要满足足端点轨迹约束和关节运动范围约束。

$$J\dot{\theta}_{RF} = \dot{r} \quad (20)$$

$$\xi_i^- \leq \dot{\theta}_{RF_i} \leq \xi_i^+, i = 1, 2, 3, 4 \quad (21)$$

其中: $r = [x_{e_RF} \ y_{e_RF} \ z_{e_RF}]^T$; ξ_i^- 和 ξ_i^+ 表示物理条件限制下关节角速度的下限和上限, 其定义如式(22)、式(23) 所示, 物理条件限制主要包括腿部的几何构型和液压作动器的安装方式、最大伸缩速度等。

$$\xi_i^- = \max[\mu_p(\theta_{RF_i}^- - \theta_{RF_i}), \dot{\theta}_{RF_i}^-] \quad (22)$$

$$\xi_i^+ = \min[\mu_p(\theta_{RF_i}^+ - \theta_{RF_i}), \dot{\theta}_{RF_i}^+] \quad (23)$$

其中: $[\theta_{RF_i}^-, \theta_{RF_i}^+]$ 为关节角的最大运动范围; $\dot{\theta}_{RF_i}^+$ 和 $\dot{\theta}_{RF_i}^-$ 分别为关节角速度的上限和下限; $\mu_p \geq 0$ 为减速系数, 用以实现当关节运动到极限位置附近时自动减速。

至此, 式(19) ~ (21) 组成了一个二次型规划(Quadratic Program, QP) 问题。

采用文献[15] 中提出的针对 QP 问题的解法, 利用冗余关节对摆动腿关节角速度进行优化。

定义向量 u 及其边界。

$$\begin{cases} u = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{RF} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \\ u^+ = \begin{bmatrix} \xi^+ \\ \dot{r}^+ \end{bmatrix} \\ u^- = \begin{bmatrix} \xi^- \\ \dot{r}^- \end{bmatrix} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\xi^+ = [\xi_1^+ \ \xi_2^+ \ \xi_3^+ \ \xi_4^+]^T$, $\xi^- = [\xi_1^- \ \xi_2^- \ \xi_3^- \ \xi_4^-]^T$; \dot{r}^+ 和 \dot{r}^- 分别为摆动腿足端点的最大速度和最小速度, 由式(14 ~ 16) 微分得到。

满足式(19) ~ (21) 的最优解为微分方程(25) 的解^[13]。

$$\dot{u} = \eta(I + M^T) \{P_\Omega[u - (Mu + q)] - u\} \quad (25)$$

其中: $\eta > 0$ 为优化参数; M, q 和 P_Ω 的定义为:

$$\begin{cases} M = \begin{bmatrix} I & -J^T \\ J & 0 \end{bmatrix} \\ q = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 1} \\ -\dot{r} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (26)$$

$$P_\Omega(u_i) = \begin{cases} u_i^-, & u_i < u_i^- \\ u_i, & u_i^- \leq u_i \leq u_i^+ \\ u_i^+, & u_i > u_i^+ \end{cases}, \forall i \in \{1, \dots, 7\} \quad (27)$$

文献[15] 中证明了从式(25) 的任何初始状态出发, u 必定收敛到唯一解 u^* , 而且 u^* 为式(19) ~ (21) 描述 QP 问题的最优解, 所以 u^* 的前四行(即 $\dot{\theta}^*$) 为摆动腿最优角速度。结合初始条件, 经过一次积分, 即可得到摆动腿最优期望关节角度。之后设计控制器实现实际关节角度对期望轨迹的跟踪, 使用的关节角度控制器为线性 PD 控制器。

3 实验

实验平台是由国防科学技术大学机器人研究室研发的全液压驱动型仿生四足机器人平台, 如图4 所示, 包括本体和四条仿生腿, 每条仿生腿包含四个主动关节, 分别为踝关节、膝关节、髌部前向关节和髌部侧向关节。踝关节长度为 0.3 m, 膝关节长度为 0.3 m, 髌部前向关节长度为 0.25 m。机器人自重约为 80 kg, 长度为 1.2 m, 宽度为 0.55 m, 最大高度为 1 m。

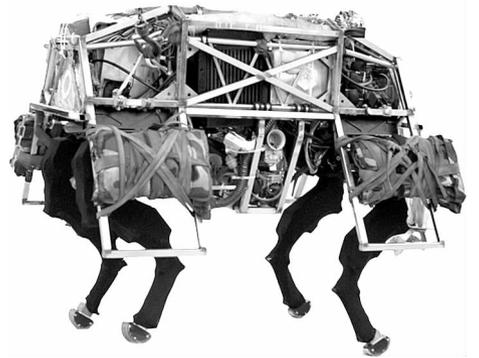
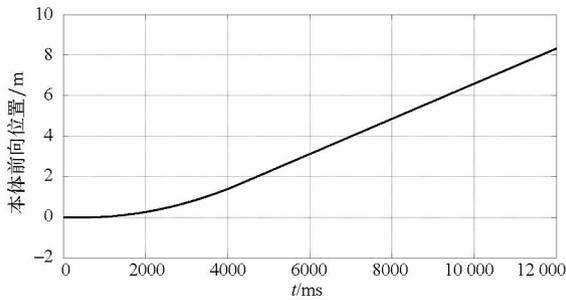


图4 液压驱动型四足机器人平台

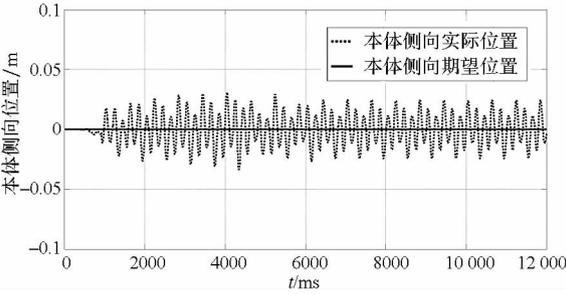
Fig. 4 Hydraulic driving quadruped robot platform

3.1 本体水平位置控制实验

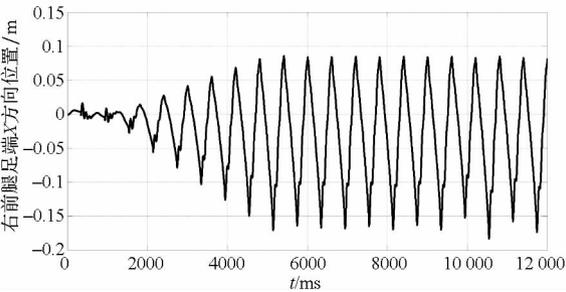
实验中, 机器人以对角小跑步态行进。前向期望速度为 3 km/h, 加速过程为 6 s。侧向期望位置为 0 m。单腿前向关节角度约束为踝关节入射角为 78.54°, 实验结果如图5 所示。



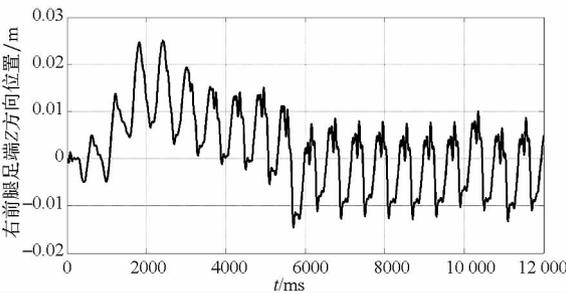
(a) 本体前向位置
(a) Forward position of body



(b) 本体侧向位置
(b) Lateral position of body



(c) 右前腿足端 X 方向位置
(c) Potion of RF foot along X-axis



(d) 右前腿足端 Z 方向位置
(d) Potion of RF foot along Z-axis

图 5 本体水平位置控制实验结果

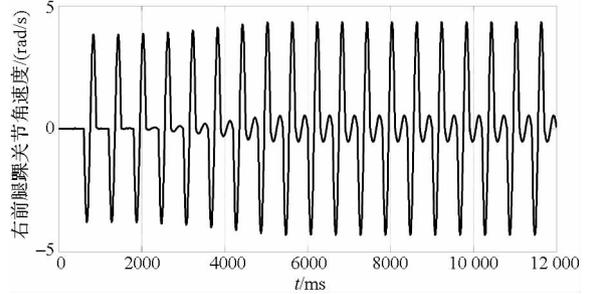
Fig.5 Experiment results of body horizontal position control

从图 5(a)可以看出,机器人在前 6 s 内加速至 3 km/h,并且之后保持匀速运动。从图 5(b)可以看出,机器人本体侧向跟踪误差为 ± 3 cm。右前腿落足点位置由式(12)计算得到,运动轨迹符合式(14)~(16),从图 5(c)和图 5(d)中可以看出,机器人进入匀速运动阶段之后,摆动腿足端轨迹呈周期性变化,符合提出的四足机器人对角

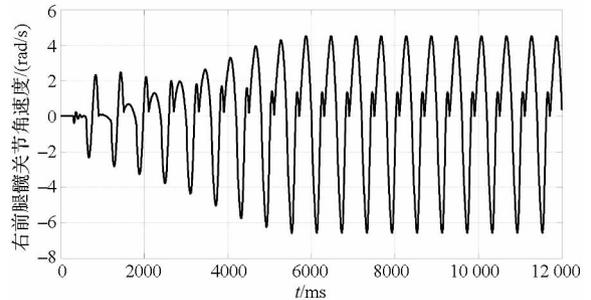
小跑步态近似模型的动力学特性。实验结果证明了落足点控制算法的有效性。

3.2 关节角速度优化实验

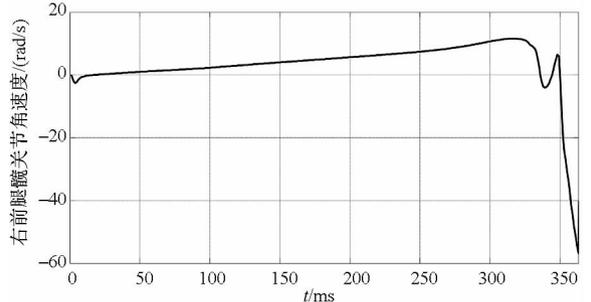
分别使用不同的单腿关节角约束条件(式(25),固定入射角约束,伪逆约束)进行四足机器人对角小跑实验,实验条件与 3.1 节相同。实验结果对比如图 6 所示。



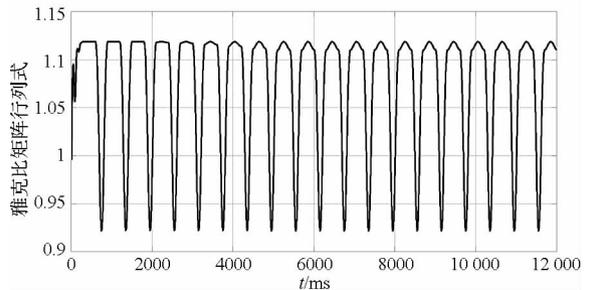
(a) 式(25)优化方法作用下踝关节角速度
(a) Angular velocity of ankle joint with eq. (25) optimization method



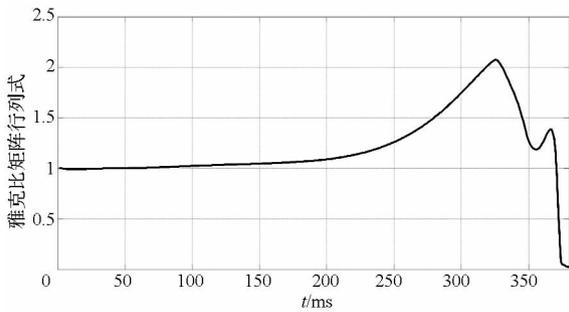
(b) 固定踝关节入射角条件下髋关节角速度
(b) Angular velocity of hip joint with fixed incident angle



(c) 伪逆方法作用下髋关节角速度
(c) Angular velocity of hip joint with pseudo-inverse method



(d) 式(25)优化方法作用下单腿雅可比矩阵行列式
(d) Determinant of Jacobian matrix about single leg with eq. (25) optimization method



(e) 伪逆方法作用下单腿雅克比矩阵行列式

(e) Determinant of Jacobian matrix about single leg with pseudo-inverse method

图6 关节角速度优化实验结果

Fig.6 Experiment results of joint angular velocity optimization

应用式(25)进行关节角速度优化时,单腿踝关节角速度大于其他三个关节,最大关节角速度为 4.333 rad/s ,如图6(a)所示。当踝关节入射角固定为 78.54° 时,髌部前向关节角速度大于其他三个关节,最大角速度为 -6.568 rad/s ,如图6(b)所示。比较图6(d)和图6(e),可以看出应用式(25)进行关节角速度优化时,单腿雅克比矩阵行列式保持在 0.92 和 1.12 之间;而在伪逆方法作用下,在 380 ms 时间点,腿部出现奇异位型,雅克比矩阵行列式为 0.02。图6(c)表示应用伪逆方法得到的右前腿踝关节角速度曲线,由于产生奇异点,不能计算得到唯一的期望关节角,导致实验失败。实验结果的对比验证了应用式(25)优化方法可以有效降低对关节角速度的需求,并且能够避免腿部出现奇异位形。

4 结论

针对四足机器人对角小跑步态本体水平位置控制问题,通过分解本体位姿变量中静态稳定分量和静态不稳定分量,建立了新的参考动力学模型,并且基于参考模型提出了落足点控制方法,实现了对本体水平位置的准确控制。进一步地,提出了关节角速度优化算法,相对于固定入射角约束算法,降低了摆动腿关节角速度,并且避免了腿部奇异位形。实验结果证明了算法的有效性。

参考文献 (References)

[1] Raibert M. Legged robots that balance[M]. US: MIT Press, 2006.
 [2] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10822 - 10825.

[3] Michael K. Meet boston dynamics' LS3—the latest robotic war machine [Z/OL]. The Conversation: Science and Technology. (2012 - 10 - 10) [2015 - 06 - 21] <http://works.bepress.com/kmichael/291/>.
 [4] Ding L H, Wang R X, Feng H S, et al. Brief analysis of a Big-Dog quadruped robot[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(5): 505 - 514.
 [5] Boaventura T, Semini C, Buchli J, et al. Dynamic torque control of a hydraulic quadruped robot [C]//Proceedings of IEEE Conference on Robotic and Automation, 2012: 1889 - 1894.
 [6] Ugurlu B, Havoutis I, Semini C, et al. Dynamic trot-walking with the hydraulic quadruped robot-HyQ: analytical trajectory generation and active compliance control[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013: 6044 - 6051.
 [7] Park J. Impedance control of quadruped robot and its impedance characteristic modulation for trotting on irregular terrain [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012: 175 - 180.
 [8] Boaventura T, Gustavo A, Medrano C, et al. Stability and performance of the compliance controller of the quadruped robot HyQ [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013: 1458 - 1464.
 [9] Lee J, Dong J, Ahn J, et al. On the dynamics of a quadruped robot model with impedance control: self-stabilizing high speed trot-running and period-doubling bifurcations [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014: 4907 - 4913.
 [10] Deisenroth M, Calandra R, Seyfarth A, et al. Toward fast policy search for learning legged locomotion [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012: 1787 - 1792.
 [11] Fankhauser P, Gehring M, Bloesch M, et al. Reinforcement learning of single legged locomotion [C]//Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013: 1346 - 1357.
 [12] Kormushev P, Calinon S, Caldwell D, et al. Challenges for the policy representation when applying reinforcement learning in robotics [C]//Proceedings of IEEE World Congress on Computational Intelligence, 2012: 2816 - 2819.
 [13] Semini C, Tsagarakis G, Guglielmino E, et al. Design of HyQ—a hydraulically and electrically actuated quadruped robot[J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2011, 225(6): 831 - 849.
 [14] Lang L, Wang J, Ma H, et al. Compliant landing control of a trotting quadruped robot on unknown rough terrains [C]//Proceedings of IEEE International Conference Information Automation, 2015: 1 - 6.
 [15] Zhang Y, Ge S S, Lee T H. A unified quadratic-programming-based dynamical system approach to joint torque optimization of physically constrained redundant manipulators [J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics, 2004, 34(5): 2126 - 2132.