doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.041

基于速度逆运动学的六足步行机器人位姿闭环控制*

陈　刚　金　波　陈　鹰
（浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室，杭州 310027）

摘要：六足步行机器人位姿控制系统是强耦合冗余非线性系统，对单腿速度逆运动学进行研究，建立六足步行机器人速度逆运动学模型，对六足步行机器人位置和姿态进行解耦控制。对机器人位置和姿态采用比例控制策略，建立机器人位置控制闭环和姿态控制闭环实现六足步行机器人位姿闭环控制。基于六足步行机器人平台，由 MATLAB 和 ADAMS 建立六足步行机器人仿真模型，并对六足步行机器人位姿闭环控制进行联合仿真，仿真结果验证了六足步行机器人位姿闭环控制方法的正确性。

关键词：六足步行机器人　速度逆运动学　位姿　闭环控制
中图分类号：TP242　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2014)05-0265-06

引言

现有果实采摘机器人多采用轮式或履带式行走方式[1]，多足步行机器人具有优越的行走灵活性同时可以有效减小对走过地面的破坏作用，因此在崎岖复杂地形的农田环境中多足步行机器人具有更强的优势。然而要使多足步行机器人成功行走于崎岖复杂环境中，还需对多足步行机器人的运动进行详细的规划和控制[2-5]。在崎岖复杂地形环境中，多足步行机器人需要不断调整其机体重心位置和姿态，以保证机器人稳定的同时具有有效的运动空间，以使机器人能够成功通过崎岖地形，因此对多足步行机器人位置和姿态的精确控制尤为重要。

de Santos 等在 RIMHO 四足步行机器人行进过程中采用间断性的姿态及位置修正的控制策略，以提高机器人对崎岖地形的适应性，此方法一定程度上提高了机器人对复杂地形的适应性，但是其控制精度受限[6-8]。Lee 和 Orin 对 ASV 六足步行机器人在斜面上的运动进行了研究，其根据支撑面倾斜程度调整机器人机体达到特定的高度和姿态，此方法一定程度上提高了机器人的行走能力，然而由于机体位置和姿态控制仍为开环，因此不能最大限度提高机器人对地面的适应性[9]。Grand 等将机体位置和姿态闭环控制应用于轮腿式机器人 Hylos 中，然而其机体位置控制误差偏大，一定程度上限制了其应用[10-12]。

本文基于六足步行机器人平台对机器人单腿速度逆运动学进行研究，在此基础上建立六足步行机器人速度逆运动学模型，实现六足步行机器人位置和姿态的解耦控制，通过机器人位置闭环和姿态闭环实现强耦合驱动冗余非线性六足步行机器人系统的位姿闭环控制，并由 MATLAB 和 ADAMS 进行联合仿真，验证提出的六足步行机器人位姿闭环控制方法的正确性。

1　速度逆运动学

1.1　六足步行机器人结构

图 1 是设计完成的六足步行机器人平台，由机器人机体及 6 条腿组成，分别为前腿 1、2，中腿 3、4 和后腿 5、6[13]，其中机体长 0.595 2 m，宽 0.395 m。6 条腿的机械结构完全相同，均匀分列于机器人机体的两侧，其中大腿长0.15m，小腿长0.1491m。

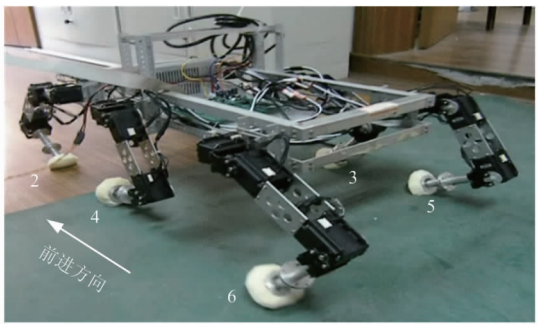


图 1　六足步行机器人平台

Fig. 1　Six-legged walking robot platform

收稿日期：2013-04-08　修回日期：2013-06-07
*国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金资助项目(51221004)和浙江省重点科技创新团队计划资助项目(2010R50036)
作者简介：陈刚，博士生，主要从事智能机器人控制和电液控制研究，E-mail：gchen@zju.edu.cn
通讯作者：金波，副教授，主要从事电液控制、智能机器人控制、深海机电装备研究，E-mail：bjin@zju.edu.cn

机体为规则的长方体,六足步行机器人重量集中在机体上,因此可近似认为机器人重心、机体形心和机体重心重合。每条腿具有 3 个关节,分别为根关节、髋关节和膝关节,每个关节由一个 Dynamixel 的 RX-64系列伺服舵机驱动[14]。此舵机自带驱动器,可根据角度指令自动完成位置闭环控制,位置控制精度为 0.3°。通过 6 条腿中 18 个关节的有效协调可以实现六足步行机器人灵活行走的同时,保证机器人机体具有 6 个自由度——3 个平动、3 个转动,因此六足步行机器人在行走过程中可以任意控制机体重心位置和机体姿态[15]。

1.2 机器人单腿速度逆运动学

根据图 1 所示的六足步行机器人平台建立六足步行机器人 D-H 模型[16],如图 2 所示,其中 D-H 参数如表 1、2 所示。其中,坐标系 $\{W\}$ 为世界固定坐标系,与地面固定;坐标系 $\{B\}$ 为机体坐标系,与六足步行机器人机体固联,坐标原点位于机体形心,其中 x 轴垂直于机体右侧面,z 轴垂直于机体上表面。

六足步行机器人第 i 条腿足端在坐标系 $\{W\}$ 中的位置可以由第 i 条腿足端在坐标系 $\{B\}$ 中的位置通过坐标变换得到

$$^{W}\boldsymbol{P}_{A_i} = {}^{W}\boldsymbol{P}_{G} + {}^{W}_{B}\boldsymbol{R}\,{}^{B}\boldsymbol{P}_{A_i} \tag{1}$$

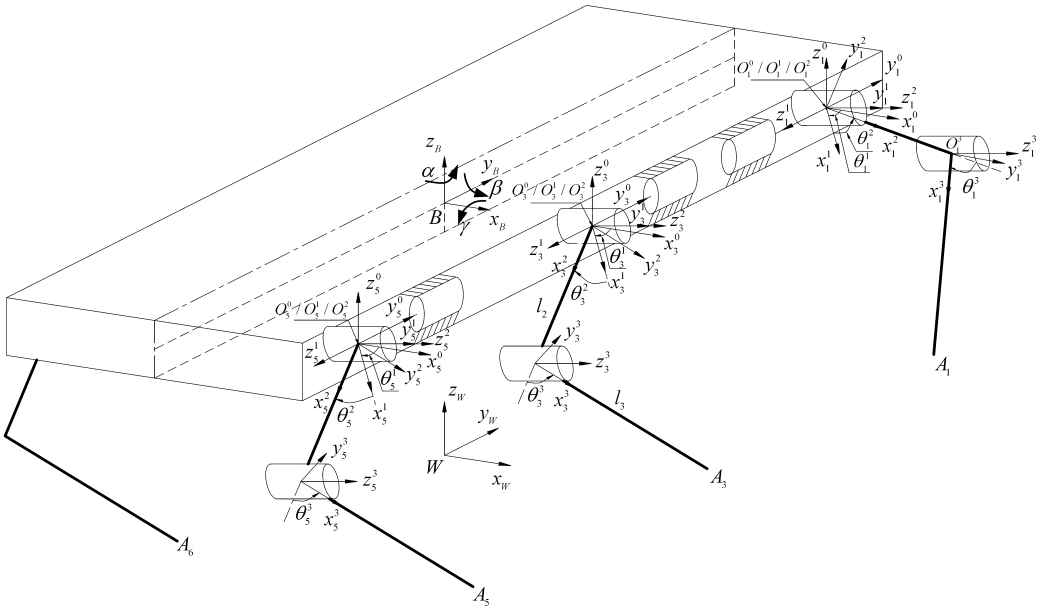


图 2 六足步行机器人 D-H 模型

Fig. 2 D-H model of six-legged walking robot

表 1 腿 1、2 的 D-H 参数

Tab. 1 D-H parameters of leg 1 and leg 2

连杆 i	连杆转角 α_{i-1}/(°)	连杆长度 a_{i-1}/m	连杆偏距 d_i/m	关节角 θ_i/(°)
1	90	0	0	(-120, -30)
2	-90	0	0	(-60, 120)
3	0	l_2	0	(-120, 0)

表 2 腿 3、4、5、6 的 D-H 参数

Tab. 2 D-H parameters of leg 3, leg 4, leg 5 and leg 6

连杆 i	连杆转角 α_{i-1}/(°)	连杆长度 a_{i-1}/m	连杆偏距 d_i/m	关节角 θ_i/(°)
1	90	0	0	(-120, -30)
2	-90	0	0	(-120,60)
3	0	l_2	0	(0, 120)

公式两边对时间求导得

$$^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_{A_i} = {}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_{G} + {}^{W}_{B}\dot{\boldsymbol{R}}\,{}^{B}\boldsymbol{P}_{A_i} + {}^{W}_{B}\boldsymbol{R}\;{}^{B}\dot{\boldsymbol{P}}_{A_i}$$

坐标系 $\{B\}$ 中第 i 条腿足端的速度为

$$^{B}\dot{\boldsymbol{P}}_{A_i} = \boldsymbol{J}_i\dot{\boldsymbol{\theta}}_i$$

第 i 条腿的雅可比矩阵为

$$\boldsymbol{J}_i = \begin{bmatrix} -l_3\sin\theta_{i,1}\cos(\theta_{i,2}+\theta_{i,3}) - l_2\sin\theta_{i,1}\cos\theta_{i,2} & -l_3\cos\theta_{i,1}\sin(\theta_{i,2}+\theta_{i,3}) - l_2\cos\theta_{i,1}\sin\theta_{i,2} & -l_3\cos\theta_{i,1}\sin(\theta_{i,2}+\theta_{i,3}) \\ 0 & l_3\cos(\theta_{i,2}+\theta_{i,3}) + l_2\cos\theta_{i,2} & l_3\cos(\theta_{i,2}+\theta_{i,3}) \\ l_3\cos\theta_{i,1}\cos(\theta_{i,2}+\theta_{i,3}) + l_2\cos\theta_{i,1}\cos\theta_{i,2} & -l_3\sin\theta_{i,1}\sin(\theta_{i,2}+\theta_{i,3}) - l_2\sin\theta_{i,1}\sin\theta_{i,2} & -l_3\sin\theta_{i,1}\sin(\theta_{i,2}+\theta_{i,3}) \end{bmatrix}$$

第 i 条腿 3 个关节的关节角速度矢量为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_i = [\,\dot{\theta}_{i,1} \quad \dot{\theta}_{i,2} \quad \dot{\theta}_{i,3}\,]^{\mathrm{T}}$$

旋转矩阵的导数为

$$^{W}_{B}\dot{\boldsymbol{R}} = \boldsymbol{S}(\boldsymbol{\omega})\;{}^{W}_{B}\boldsymbol{R}$$

旋转矩阵为

$$ {}^{W}_{B}\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} c\alpha c\beta & -s\alpha c\gamma+c\alpha s\beta s\gamma & s\alpha s\gamma+c\alpha s\beta c\gamma \\ s\alpha c\beta & c\alpha c\gamma+s\alpha s\beta s\gamma & -c\alpha s\gamma+s\alpha s\beta c\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} $$

其中，α、β、γ 分别为六足步行机器人姿态的航向角、横滚角和俯仰角。$s\alpha=\sin\alpha$，$c\alpha=\cos\alpha$，依此类推。

关于姿态角速度矢量的反对称矩阵为

$$ \boldsymbol{S}(\boldsymbol{\omega})=\begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} $$

式中　ω_z——航向角速度　　ω_y——横滚角速度

ω_x——俯仰角速度

因此式(1)可写为

$$ {}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_{A_i}={}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_{G}+\boldsymbol{S}(\boldsymbol{\omega})\ {}^{W}_{B}\boldsymbol{R}\ {}^{B}\boldsymbol{P}_{A_i}+{}^{W}_{B}\boldsymbol{R}\boldsymbol{J}_i\dot{\boldsymbol{\theta}}_i $$

从而第 i 条腿的关节角速度矢量可表示为

$$ \dot{\boldsymbol{\theta}}_i=({}^{W}_{B}\boldsymbol{R}\boldsymbol{J}_i)^{-1}({}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_{A_i}-{}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_{G}-\boldsymbol{S}(\boldsymbol{\omega})\ {}^{W}_{B}\boldsymbol{R}\ {}^{B}\boldsymbol{P}_{A_i})= $$

$$ \boldsymbol{J}_i^{-1}({}^{W}_{B}\boldsymbol{R})^{\mathrm{T}}({}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_{A_i}-{}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_{G}-\boldsymbol{S}(\boldsymbol{\omega})\ {}^{W}_{B}\boldsymbol{R}\ {}^{B}\boldsymbol{P}_{A_i}) \quad (2) $$

当六足步行机器人第 i 条腿为支撑腿时，其足端与地面接触没有位移，因此足端速度 ${}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_{A_i}=0$，则式(2)可简化为

$$ \dot{\boldsymbol{\theta}}_i=\boldsymbol{J}_i^{-1}\ ({}^{W}_{B}\boldsymbol{R})^{\mathrm{T}}(-{}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_{G}-\boldsymbol{S}(\boldsymbol{\omega})\ {}^{W}_{B}\boldsymbol{R}\ {}^{B}\boldsymbol{P}_{A_i}) \quad (3) $$

式(3)表明了当机器人第 i 条腿作为支撑腿时关节角速度矢量与机器人机体重心速度矢量、机体姿态角速度矢量之间的关系。

2　位姿闭环控制模型

多足步行机器人以静稳定步态行走时，每时每刻至少有 3 条腿作为支撑腿，每条腿都有 3 个自由度，总共具有 9 个自由度，机器人位姿控制中有 6 个目标量：3 个位置分量、3 个姿态分量，因此位姿控制为驱动冗余控制，同时位姿目标量和关节角被控量之间是非线性耦合关系。

如前所述，六足步行机器人速度逆运动学可以建立机器人关节角速度与机器人机体重心速度、机体姿态角速度之间的联系。由此基于六足步行机器人速度逆运动学模型构建相应的控制策略就可以实现对机器人位置和姿态的控制[11]。本文所提出的基于速度逆运动学的六足步行机器人位姿闭环控制框图如图 3 所示。六足步行机器人位姿闭环控制包括两个闭环：六足步行机器人位置闭环和姿态闭环，将对机器人位置控制和姿态控制分别构建闭环从而实现对机器人位置和姿态的解耦控制。

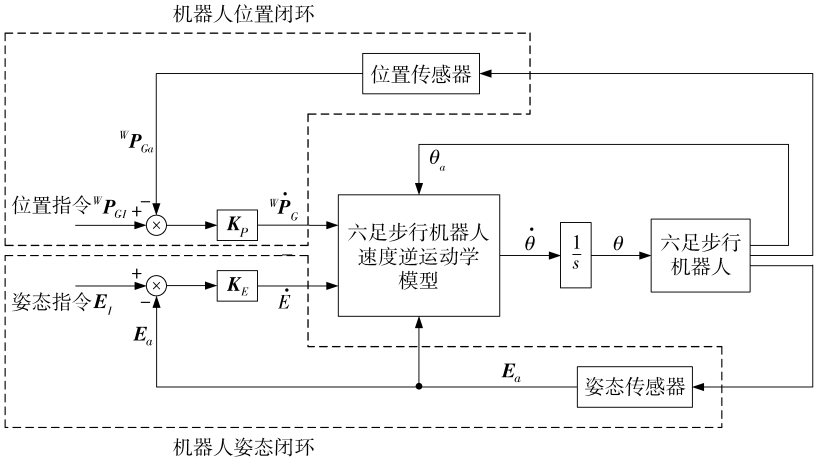


图 3　六足步行机器人位姿闭环控制框图

Fig. 3　Diagram of closed-loop control on position-posture of six-legged walking robot

六足步行机器人位姿闭环控制思路为：通过机器人速度逆运动学模型建立机器人位置姿态与机器人各条支撑腿关节角度的关系，通过位置闭环和姿态闭环实时得到机器人各条支撑腿关节角度值，机器人将得到的关节角度值作为控制指令控制机器人各个关节运动，从而实现机器人位姿的闭环精确控制。

机器人位置闭环：通过位置传感器检测六足步行机器人机体重心位置并作为反馈实现机体重心位置的闭环控制。机器人位置闭环控制采用比例控制策略：${}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_{G}=\boldsymbol{K}_P({}^{W}\boldsymbol{P}_{G_I}-{}^{W}\boldsymbol{P}_{G_a})$，其中 $\boldsymbol{K}_P$ 为位置闭环比例系数矩阵，${}^{W}\boldsymbol{P}_{G_I}=[{}^{W}x_{G_I}\quad {}^{W}y_{G_I}\quad {}^{W}z_{G_I}]^{\mathrm{T}}$ 为机器人目标位置矩阵，${}^{W}\boldsymbol{P}_{G_a}=[{}^{W}x_{G_a}\quad {}^{W}y_{G_a}\quad {}^{W}z_{G_a}]^{\mathrm{T}}$ 为通过位置传感器检测得到的机器人实际位置矩阵，${}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_{G}=[{}^{W}v_{xG}\quad {}^{W}v_{yG}\quad {}^{W}v_{zG}]^{\mathrm{T}}$ 为机器人速度矩阵。

机器人姿态闭环：通过姿态传感器检测六足步行机器人机体姿态并作为反馈实现机体姿态的闭环控制。机器人姿态闭环控制同样采用比例控制策略：$\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{K}_E(\boldsymbol{E}_I-\boldsymbol{E}_a)$，其中 $\boldsymbol{K}_E$ 为姿态闭环比例系数

矩阵，$\boldsymbol{E}_I=[\alpha_I \quad \beta_I \quad \gamma_I]^{\mathrm{T}}$ 为机器人目标姿态矩阵，$\boldsymbol{E}_a=[\alpha_a \quad \beta_a \quad \gamma_a]^{\mathrm{T}}$ 为通过姿态传感器检测得到的机器人实际姿态矩阵，α_I、α_a 为航向角，β_I、β_a 为横滚角，γ_I、γ_a 为俯仰角，$\boldsymbol{\omega}=[\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^{\mathrm{T}}$ 为姿态角速度矩阵。

本文以机器人 6 条腿全部为支撑腿的情况为例，根据式(3)建立六足步行机器人速度逆运动学模型：$\dot{\boldsymbol{\theta}}=-\boldsymbol{J}^{-1}\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{V}_G+\boldsymbol{S}\boldsymbol{R}\,{}^{B}\boldsymbol{P})$，其根据机器人位置闭环和姿态闭环的输出计算得到六足步行机器人各个关节的角速度，通过积分获得控制机器人各个关节运动的角度指令，从而实现六足步行机器人位姿闭环控制。其中，六足步行机器人关节角速度矩阵为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}=[\dot{\boldsymbol{\theta}}_1^{\mathrm{T}} \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_2^{\mathrm{T}} \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_3^{\mathrm{T}} \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_4^{\mathrm{T}} \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_5^{\mathrm{T}} \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_6^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$$

六足步行机器人雅可比矩阵为

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{J}_1&0&0&0&0&0\\0&\boldsymbol{J}_2&0&0&0&0\\0&0&\boldsymbol{J}_3&0&0&0\\0&0&0&\boldsymbol{J}_4&0&0\\0&0&0&0&\boldsymbol{J}_5&0\\0&0&0&0&0&\boldsymbol{J}_6\end{bmatrix}$$

六足步行机器人旋转矩阵为

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}{}^{W}_{B}\boldsymbol{R}&0&0&0&0&0\\0&{}^{W}_{B}\boldsymbol{R}&0&0&0&0\\0&0&{}^{W}_{B}\boldsymbol{R}&0&0&0\\0&0&0&{}^{W}_{B}\boldsymbol{R}&0&0\\0&0&0&0&{}^{W}_{B}\boldsymbol{R}&0\\0&0&0&0&0&{}^{W}_{B}\boldsymbol{R}\end{bmatrix}$$

六足步行机器人机体重心速度矩阵为

$$\boldsymbol{V}_G=\begin{bmatrix}{}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_G&0&0&0&0&0\\0&{}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_G&0&0&0&0\\0&0&{}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_G&0&0&0\\0&0&0&{}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_G&0&0\\0&0&0&0&{}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_G&0\\0&0&0&0&0&{}^{W}\dot{\boldsymbol{P}}_G\end{bmatrix}$$

六足步行机器人机体姿态角速度反对称矩阵为

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}(\boldsymbol{\omega})&0&0&0&0&0\\0&\boldsymbol{S}(\boldsymbol{\omega})&0&0&0&0\\0&0&\boldsymbol{S}(\boldsymbol{\omega})&0&0&0\\0&0&0&\boldsymbol{S}(\boldsymbol{\omega})&0&0\\0&0&0&0&\boldsymbol{S}(\boldsymbol{\omega})&0\\0&0&0&0&0&\boldsymbol{S}(\boldsymbol{\omega})\end{bmatrix}$$

机体坐标系$\{B\}$中六足步行机器人足端位置矩阵为

$${}^{B}\boldsymbol{P}=[{}^{B}\boldsymbol{P}_{A_1} \quad {}^{B}\boldsymbol{P}_{A_2} \quad {}^{B}\boldsymbol{P}_{A_3} \quad {}^{B}\boldsymbol{P}_{A_4} \quad {}^{B}\boldsymbol{P}_{A_5} \quad {}^{B}\boldsymbol{P}_{A_6}]^{\mathrm{T}}$$

3 位姿闭环控制验证

本文以六足步行机器人 6 条腿全部为支撑腿的情况为例，根据第 2 节所述的基于速度逆运动学的位姿闭环控制理论，通过 MATLAB 建立六足步行机器人速度逆运动学模型、机体位置闭环模型、机体姿态闭环模型；通过 ADAMS 建立六足步行机器人模型如图 4 所示，其中世界固定坐标系$\{W\}$、机体坐标系$\{B\}$建立方式与图 2 相同，此六足步行机器人模型为理想模型，其没有考虑机器人各个关节驱动舵机的动态特性。MATLAB 中计算得到的各个关节的关节角度输送至 ADAMS 中所建立的六足步行机器人模型，六足步行机器人根据各个关节角度运动，同时输出机器人位置、姿态及各个关节的关节角度作为反馈，从而实现 MATLAB 与 ADAMS 对六足步行机器人位姿闭环控制的联合仿真，如图 5 所示，其中 MATLAB Function 为第 2 节所述的六足步行机器人速度逆运动学模型。在 MATLAB 与 ADAMS 对六足步行机器人位姿闭环控制的联合仿真中六足步行机器人初始位置、目标位置及初始姿态和目标姿态如表 3、4 所示。在位姿闭环控制的联合仿真中，位置闭环比例系数矩阵设置为

$$\boldsymbol{K}_P=\begin{bmatrix}80&0&0\\0&80&0\\0&0&7\end{bmatrix}$$

姿态闭环比例系数矩阵设置为

$$\boldsymbol{K}_E=\begin{bmatrix}15&0&0\\0&5&0\\0&0&6\end{bmatrix}$$

基于 MATLAB 与 ADAMS 联合仿真的六足步行机器人位姿闭环控制结果如图 6、7 所示，其中虚线表示六足步行机器人位姿闭环控制中各个控制参数的目标值，实线表示位姿闭环控制中各个控制参数

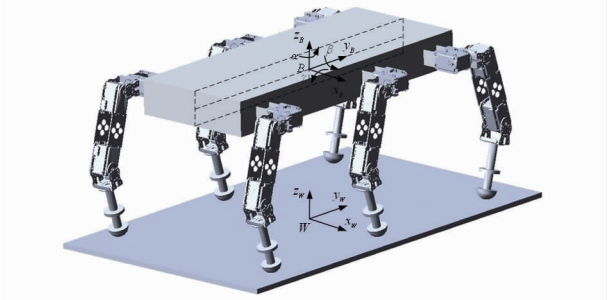


图 4 ADAMS 中建立的六足步行机器人模型

Fig. 4 Six-legged walking robot model in ADAMS

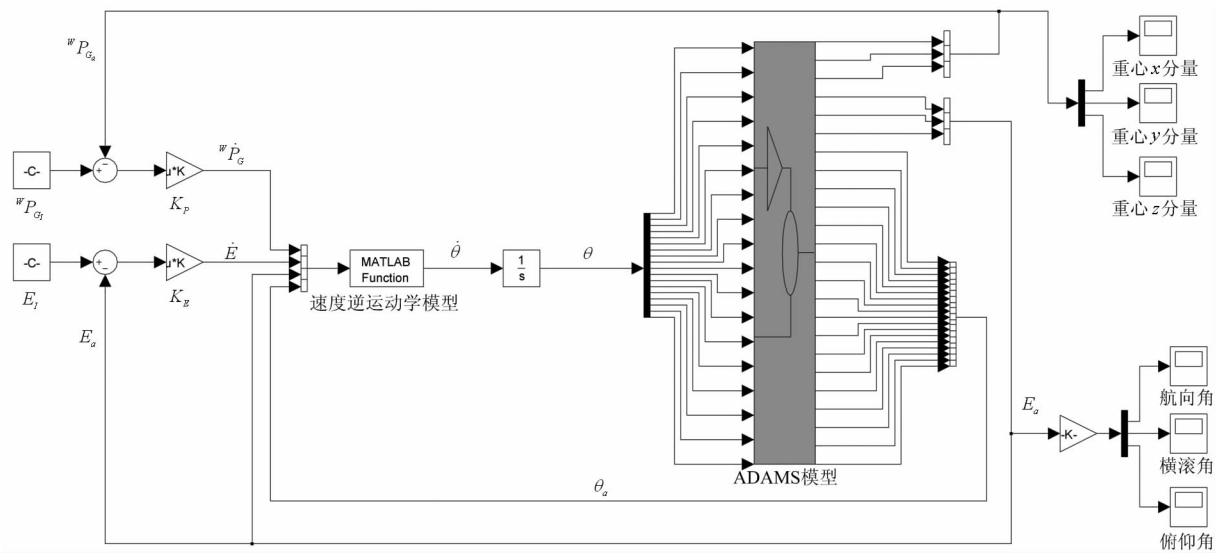


图 5　MATLAB 与 ADAMS 联合仿真图

Fig. 5　Co-simulation diagram of MATLAB and ADAMS

的实际值。由仿真结果可知六足步行机器人位姿闭环控制系统响应时间为 0.8 s,0.8 s 后六足步行机器人位姿闭环控制系统达到稳定,位姿闭环控制系统中各个控制参数的跟踪误差(目标值与初始值差值的绝对值)如表 5 所示,其控制精度满足要求。

表 3　六足步行机器人位姿闭环仿真中位置参数

Tab. 3　Position parameters in simulation of position-posture closed-loop control of six-legged walking robot

参数	x 分量/mm	y 分量/mm	z 分量/mm
初始位置	0	0	299.1
目标位置	5	8	250

表 4　六足步行机器人位姿闭环仿真中姿态参数

Tab. 4　Posture parameters in simulation of position-posture closed-loop control of six-legged walking robot

参数	航向角/(°)	横滚角/(°)	俯仰角/(°)
初始姿态	0	0	0
目标姿态	4	3	2

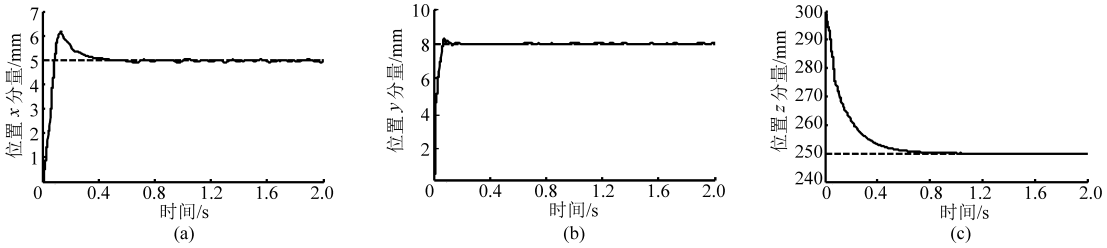


图 6　六足步行机器人位姿闭环控制中位置各分量的目标值与实际值曲线

Fig. 6　Target value and actual value of position in position-posture closed-loop control

(a) x 分量　(b) y 分量　(c) z 分量

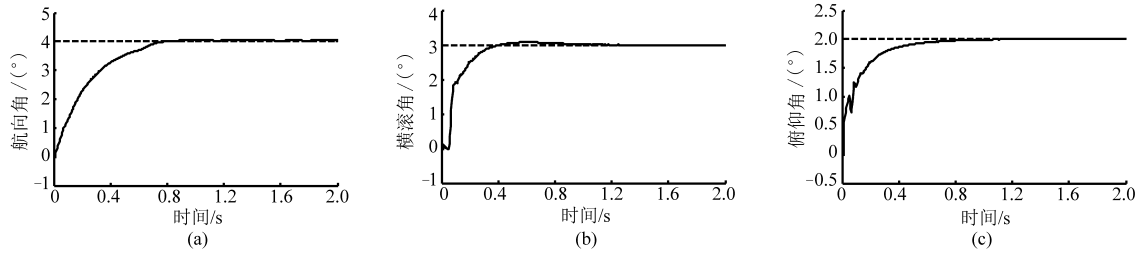


图 7　六足步行机器人位姿闭环控制中姿态角的目标值与实际值曲线

Fig. 7　Target value and actual value of posture in position-posture closed-loop control

(a) 航向角　(b) 横滚角　(c) 俯仰角

表 5 六足步行机器人位姿闭环控制跟踪误差

Tab. 5 Tracking deviations in position-posture closed-loop control of six-legged walking robot

跟踪误差参数	数值
机体位置 x 分量/mm	0.091 1
机体位置 y 分量/mm	0.063 8
机体位置 z 分量/mm	0.291 7
机体姿态航向角/(°)	0.055 9
机体姿态横滚角/(°)	0.042 2
机体姿态俯仰角/(°)	0.022 4

4 结论

(1)基于六足步行机器人平台通过对六足步行机器人单腿速度逆运动学进行研究,建立了机器人关节角速度与机器人机体重心速度、机体姿态角速度之间的数学联系,从而为六足步行机器人位姿闭环控制理论奠定了基础。

(2)基于机器人单腿速度逆运动学建立六足步行机器人速度逆运动学模型,通过机体重心位置控制闭环与机体姿态控制闭环实现了六足步行机器人位姿闭环控制,从而建立了基于速度逆运动学的强耦合驱动冗余非线性六足步行机器人系统的位姿闭环控制理论。

(3)采用 MATLAB 与 ADAMS 软件建立六足步行机器人位姿闭环控制仿真模型,对六足步行机器人位姿闭环控制进行联合仿真,仿真结果验证了六足步行机器人位姿闭环控制的正确性。

参 考 文 献

1 宋健,张铁中,徐丽明,等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 158 - 162.
Song Jian, Zhang Tiezhong, Xu Liming, et al. Research actuality and prospect of picking robot for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 158 - 162. (in Chinese)

2 Estremera J, Cobano J A, De Santos P G. Continuous free-crab gaits for hexapod robots on a natural terrain with forbidden zones: An application to humanitarian demining[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, 58(5): 700 - 711.

3 Estremera J, De Santos P G. Free gaits for quadruped robots over irregular terrain[J]. International Journal of Robotics Research, 2002, 21(2): 115 - 130.

4 Kalakrishnan M, Buchli J, Pastor P, et al. Learning, planning, and control for quadruped locomotion over challenging terrain[J]. International Journal of Robotics Research, 2011, 30(2): 236 - 258.

5 Zhang L, Ma Shugen, Inoue K, et al. Omni-directional walking of a quadruped robot with optimal body postures on a slope[C]// Proceeding of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005:2976 - 2981.

6 De Santos P G, Jimenez M A, Reviejo J, et al. Attitude and altitude control using discontinuous gaits for walking machines[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Systems Engineering in the Service of Humans, 1993,2:100 - 105.

7 Antonia Jiménez M, De Santos P G. Attitude and position control for non-rigid walking machines[J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(7): 1013 - 1029.

8 Jimenez M A, de Santos P G. Attitude and position control method for realistic legged vehicles[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1996, 18(3): 345 - 354.

9 Lee W, Orin D E. The kinematics of motion planning for multilegged vehicles over uneven terrain[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988, 4(2): 204 - 212.

10 Besseron G, Grand C, Ben Amar F, et al. Decoupled control of the high mobility robot hylos based on a dynamic stability margin [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008:2435 - 2440.

11 Grand C, Benamar F, Plumet F. Motion kinematics analysis of wheeled-legged rover over 3D surface with posture adaptation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(3): 477 - 495.

12 Grand C, Benamar F, Plumet F, et al. Stability and traction optimization of a reconfigurable wheel-legged robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 2004, 23(10 - 11): 1041 - 1058.

13 Jin Bo, Chen Cheng, Li Wei, et al. Design and configuration of a hexapod walking robot[C]. Proceedings of ICMTMA, 2011,1: 863 - 866.

14 金波,陈诚,李伟. 基于能耗优化的六足步行机器人力矩分配[J]. 浙江大学学报:工学版, 2012, 46(7): 1168 - 1174.
Jin Bo, Chen Cheng, Li Wei. Optimization of energy-efficient torque distribution for hexapod walking robot[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(7): 1168 - 1174. (in Chinese)

15 陈诚. 具有半球形足端的六足机器人步态生成和能耗优化研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.

16 John J C. Introduction to robotics: mechanics and control[M]. Englewood Cliffs, N J: Prentice Hall, 2004.

(下转第 264 页)

17 赵燕东,聂铭君. 双针结构土壤水分传感器探针最优长度分析与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42 (11):39 - 43.
Zhao Yandong, Nie mingjun. Optimalanalysis for determining the dual-pin length of soil moisture probe[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(11):39 - 43. (in Chinese)
18 王海兰,白陈祥,赵燕东. 乔木茎体水分传感器探针结构实验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 176 - 179 .
Wang Hailan, Bai Chenxiang, Zhao Yandong. Experiment on the probe configuration of stem water content measuring sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(1):176 - 179. (in Chinese)

Simulated Experiment on Shrubs Moisture Sensor Probe Structure Based on TDT Principle

Wang Hailan[1] Zhang Xin[1] Sheng Wenyi[2] Zhao Yandong[1]
(1. *School of Technology*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *College of Information and Electrical Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Based on time domain transmissometry (TDT), measurement device for shrub stem water content was designed. This device consists of high frequency signal source, coaxial transmission lines, winding probe and phase comparison circuit. Propagation velocity of high frequency electromagnetic wave varies in different medium, and the propagation phase also changes. The dielectric constant of wet shrubs mainly depends on its moisture content. By measuring phase difference between the coaxial cable A and the winding stem probe B, the moisture content in shrubs was obtained. Absorbent cotton stick was choice to simulate shrubs with different moisture content. And the influence of the phase difference from frequency of high frequency signal source and the structure of the probe was studied. Experimental results show that under the conditions of 60 cm probe length, 50 MHz and 100 MHz signal source frequency, the phase difference between the coaxial cable A and the winding stem probe B is monotonic with the change of water content, and there exists a good correlation between phase difference and moisture content.

Key words: Shrub Moisture sensor Probe structure TDT Measuring

(上接第 270 页)

Position-posture Closed-loop Control of Six-legged Walking Robot Based on Inverse Velocity Kinematics

Chen Gang Jin Bo Chen Ying
(*State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310027, *China*)

Abstract: Position-posture control system of six-legged walking robot has the characteristics: tight coupling, redundancy, nonlinearity. An inverse velocity kinematics model of six-legged walking robot was constructed through research on inverse velocity kinematics of single leg. Then the control on position and posture of six-legged walking robot was decoupled to two closed-loops control, the position and the posture closed-loop control, based on the inverse velocity kinematics. The proportional control strategy was employed to implement the closed-loop control on the position-posture of six-legged walking robot. Finally, a co-simulation on the closed-loop control on the position-posture of six-legged walking robot was carried out by using MATLAB and ADAMS, and the results verify that the method of closed-loop control on the position-posture of six-legged walking robot is correct.

Key words: Six-legged walking robot Inverse velocity kinematics Position-posture Closed-loop control