

伸缩腿双足机器人半被动行走控制研究*

张奇志[†] 周亚丽

(北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192)

摘要 研究半被动伸缩腿双足机器人行走控制和周期解的全局稳定性问题.使用杆长可变的倒立摆机器人模型,以支撑腿的伸缩作为行走动力源,采用庞加莱映射方法分析了双足机器人行走的不动点及其稳定性.当脚与地面冲击时,假设两腿间的夹角保持为常数,设计了腿伸缩长度的支撑腿角度反馈控制率.证明了伸缩腿双足机器人行走过程不动点的全局稳定性.仿真结果表明,本文提出的腿伸缩长度反馈控制可以实现伸缩腿双足机器人在水平面上的稳定行走,并且周期步态对执行器干扰和支撑腿初始角速度干扰具有鲁棒性.

关键词 双足机器人, 伸缩腿, 周期解, 不动点, 半被动行走

DOI: 10.6052/1672-6553-2018-035

引言

2005 年美国康奈尔大学、麻省理工学院和荷兰代尔夫特大学学者在“Science”上发布了他们各自研发的一类被动行走机器人.该类双足机器人不像传统方法将机器人强制控制到预先设计的轨迹上,而是充分利用机器人的动力学特征,行走能量消耗是一般双足机器人行走能量消耗的 1/10,而且展现了和人类行走类似的步态^[1].20 世纪 80 年代末,McGeer 在 McMahan 的工作基础上,提出了“被动行走”的概念,不需要任何驱动装置,由两连杆铰接组成的双腿机构能够在重力的作用下沿小倾角斜面向下稳定行走^[2].实现被动行走的关键是脚与地面冲击后的状态与前一步初始状态相同,系统每步的冲击能量损失与获得的重力势能输入相等,保持系统的能量平衡.Wisse 对于机器人的倾倒问题,给出简单的控制策略:如果让摆动腿以足够快的速度运动到支撑腿的前面,那么机器人就不会向前倾倒.而为了避免机器人在下一个步行周期向后倾倒,摆动腿不能落到支撑腿前面太远的地方^[3].因为冲击的能量损失,在水平面上纯被动行走机器人不能持续行走.因此必须添加驱动力构成所谓的“半被动行走”机器人才有可能实现在水平面上的持续稳定行走.Kuo 使用最简的双连杆模型

研究了机器人在平面上的半被动行走能量效率问题^[4].赵明国、柳宁等研究了被动行走不动点的搜索算法,并提出了双足机器人虚拟斜坡行走步态生成算法,以关节舵机为驱动力实现了平面双足机器人的高能效快速行走^[5,6].倪修华等通过仿真和实验研究了髋关节扭簧刚度对被动步行稳定性的影响^[7].王启宁等研究了在髋关节加驱动力矩,同时采用平脚板并在踝关节加弹簧的配置下,双足机器人的行走问题^[8].付成龙等研究了被动行走双足机器人的开环控制问题,通过在髋关节施加开环振荡驱动力矩,实现了双足机器人行走模式的转换^[9].张奇志等采用直腿模型研究了脚部脉冲推力下半被动双足机器人的控制问题,并证明了周期步态的全局稳定性^[10].直腿双足机器人的一个缺欠是摆动腿的擦地问题,解决方法是添加膝关节或者采用伸缩腿结构.伸缩腿结构的优点是既解决了擦地问题又保持了直腿模型简单的优点^[11].本文将研究伸缩腿双足机器人控制的能量平衡机制,并对腿伸缩控制策略和周期解生成机制进行详细分析.

1 伸缩腿双足机器人模型

1.1 摆动阶段动力学模型

简单双足行走机器人模型由髋关节铰接两个刚性直腿构成,忽略腿的质量,在腿摆动阶段,支撑

2017-08-09 收到第 1 稿,2017-10-24 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目(11172047,11672044)

[†] 通讯作者 E-mail: zqbim@163.com

腿与地面接触点简化为旋转铰.假设所有质量集中在髋关节,系统模型如图1所示.忽略关节的摩擦影响,采用拉格朗日方法可以得到腿摆动阶段动力学方程:

$$Ml^2\ddot{\theta} + 2mll\dot{\theta} - mgl\sin\theta = 0 \quad (1)$$

$$M\dot{l} - Ml^2\dot{\theta}^2 + Mgc\cos\theta = F \quad (2)$$

其中, M 是髋关节集中质量, g 是重力加速度, θ 是支撑腿与地面法线的夹角, l 是腿的长度, 在机器人行走过程中可以通过控制作用而改变.

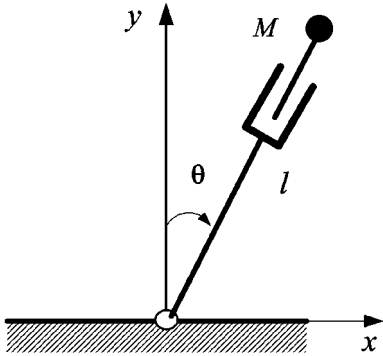


图1 双足机器人示意图

Fig.1 Diagram of the simplest biped robot

1.2 地面冲击模型

假设摆动腿可以迅速运动到支撑腿前方,且达到机器人两腿之间的限定角度 α , 则支撑腿位置满足下面的几何条件公式(3)时,将发生脚与地面的冲击,

$$\theta(\tau) = \varphi = \alpha/2 \quad (3)$$

其中, τ 是腿开始摆动到冲击发生的时间,一般把 τ 称为行走周期.采用瞬时非弹性碰撞假设,根据髋关节关于冲击点的动量矩守恒,可以得到冲击前后关节速度的变换关系(见图2).

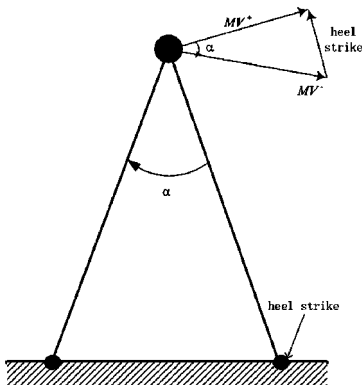


图2 地面冲击模型

Fig.2 Model of ground collision

$$Ml\dot{\theta}^+ = Ml\dot{\theta}^- \cos\alpha \quad (4)$$

‘+’表示刚好完成冲击,‘-’表示冲击发生前,图2中速度 $v^+ = l\dot{\theta}^+$, $v^- = l\dot{\theta}^-$.因为所用量均作用在髋关节,只需考虑系统的动量.

2 周期步态生成分析

双足机器人周期行走的条件是,每次冲击结束后支撑腿的角度和角速度与前一步的角度和角速度严格重复.因为我们假定机器人的步长恒定,周期步态的必要条件就是每步开始时的角速度完全相同.下面分析摆动阶段和冲击阶段的速度变化关系,公式(1)可以改写为

$$\frac{d(l^2\dot{\theta})}{dt} = gl\sin\theta \quad (5)$$

两边同时乘以 $l^2\dot{\theta}d\theta$ 得

$$l^2\dot{\theta}d(l^2\dot{\theta}) = gl^3\sin\theta d\theta = gl^3\sin\theta d\theta \quad (6)$$

假设冲击时腿的长度为 l_0 ,并用‘ k ’代表步数,在整个腿摆动阶段对公式(6)积分可得

$$\int_{\dot{\theta}_k^+}^{\dot{\theta}_{k+1}^-} l^2\dot{\theta}d(l^2\dot{\theta}) = \int_{\theta_k^+}^{\theta_{k+1}^-} gl^3\sin\theta d\theta \Rightarrow \frac{l_0^4}{2}([\dot{\theta}_{k+1}^-]^2 - [\dot{\theta}_k^+]^2) = \int_{\theta_k^+}^{\theta_{k+1}^-} gl^3\sin\theta d\theta \quad (7)$$

若在行走过程中腿的长度 l 不变,且双足机器人实现对称行走,由公式(7)可知最后一项的积分为零,因此 $[\dot{\theta}_{k+1}^-]^2 = [\dot{\theta}_k^+]^2$.由于冲击存在能量损失, $\dot{\theta}_{k+1}^+ < \dot{\theta}_{k+1}^- = \dot{\theta}_k^+$,即每步开始时刻的角速度都比上一步的对应角速度减小,即双足机器人不能实现周期行走.如设计伸缩腿的长度按公式(8)变化,即腿伸缩采取 θ 角反馈控制.

$$\begin{cases} l = l_0 & \theta < 0 \\ l = l_0 + u & \theta > 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $u > 0$ 是腿的伸长量,则 $\int_{\theta_k^+}^{\theta_{k+1}^-} gl^3\sin\theta d\theta > 0$,当此项的能量补充恰好补充冲击的能量损失时,机器人可以实现周期行走.下面具体推导机器人行走过程中的各个阶段的角速度转换关系.假设机器人支撑腿角度达到 $\theta = 0$ 时,支撑腿迅速伸长 u 达到 $l_0 + u$,而机器人支撑腿角度达到 $\theta = \varphi$ 时,支撑腿迅速

缩短 u 恢复到 l_0 , 这样双足机器人的行走过程可以分解为 5 个相互连接的阶段:

(1) 支撑腿从 $\theta = -\varphi$ 摆动到 $\theta = 0$

根据能量守恒, 可以得到角速度变化关系为

$$\frac{1}{2}Ml_0^2[\dot{\theta}_k^+]^2 = \frac{1}{2}Ml_0^2\omega_h^2 + Mgl_0(1 - \cos\varphi) \quad (9)$$

其中, ω_h 是支撑腿转到竖直位置时的角速度.

(2) 支撑腿伸长 u

根据动量矩守恒可以得到角速度变化关系如下:

$$Ml\omega_h = M(l_0 + u)\omega_0 \quad (10)$$

其中, ω_0 是支撑腿伸长到 $l_0 + u$ 位置时的角速度.

(3) 支撑腿从 $\theta = 0$ 摆动到 $\theta = \varphi$

根据能量守恒可以得到角速度变化关系如下:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}M(l_0 + u)\omega_0^2 + Mgl_0(1 - \cos\varphi) \\ = \frac{1}{2}M(l_0 + u)^2\omega_l^2 \end{aligned} \quad (11)$$

其中, ω_l 是支撑腿转到 $\theta = \varphi$ 位置时的角速度.

(4) 支撑腿缩短 u

根据动量矩守恒可以得到角速度变化关系如下:

$$M(l_0 + u)\omega_l = Ml_0\dot{\theta}_{k+1}^- \quad (12)$$

(5) 摆动腿和地面冲击, 支撑腿和摆动腿角色转换

根据动量矩守恒可以得到角速度变化关系如下:

$$Ml_0\dot{\theta}_{k+1}^-\cos\alpha = Ml_0\dot{\theta}_{k+1}^+ \quad (13)$$

综合公式(9~13)消掉中间变量, 可以得到相邻两步初始角速度之间的关系如下:

$$[\dot{\theta}_{k+1}^+]^2 = \left\{ [\dot{\theta}_k^+]^2 + \frac{2gu(1 - \cos\varphi)}{l_0^2} \right\} \cos^2\alpha \quad (14)$$

当 $\dot{\theta}_{k+1}^+ = \dot{\theta}_k^+ = \Omega$ 时, 双足机器人达到周期行走状态, 由公式(14)可以得到周期步态的角速度初值为:

$$\Omega = \frac{1}{(l_0 \tan\alpha)^2} \sqrt{2gu(1 - \cos\varphi)} \quad (15)$$

因此, 双足机器人周期步态的初始角速度值与伸缩腿的伸长量有关.

3 周期步态的全局稳定性

采用本文设计的控制策略, 伸缩腿双足机器人的行走过程由腿摆动阶段(1)和(3)的光滑动力学微分方程和冲击状态转换阶段(2)、(4)和(5)的代数方程描述, 系统具有非光滑特性. 可以采用庞加莱映射方法分析系统的稳定性, 取冲击状态转换阶段(5)为庞加莱截面, 因为假定冲击时机器人两腿角度值固定, 所以, 庞加莱截面上机器人状态可以用冲击后的支撑腿角速度表示为

$$x_k = \dot{\theta}_k^+ \quad (16)$$

其中, k 表示机器人行走的步数. 根据公式(14), 可知庞加莱映射为

$$x_{k+1} = f(x_k) = \cos\alpha \sqrt{x_k^2 + \frac{2gu(1 - \cos\varphi)}{l_0^2}} \quad (17)$$

庞加莱映射(17)表示了相邻两步行走的初始状态之间的关系. 庞加莱映射的不动点是系统的周期解, 双足机器人行走稳定性问题被转换为不动点的稳定性问题. 下面给出伸缩腿双足机器人行走全局稳定性定理.

定理: 对于本文研究的双足机器人模型, 若机器人行走步长恒定且采用上节给出的 5 阶段控制策略, 则其行走过程庞加莱映射的不动点存在, 而且是全局渐进稳定的.

证明: 公式(15)已经给出了不动点计算的具体表达式, 所以, 不动点的存在性是显然成立的, 庞加莱映射(17)的导数满足如下不等式:

$$\begin{aligned} f'(x_k) &= x_k \left(x_k^2 + \frac{2gu(1 - \cos\varphi)}{l_0^2} \right)^{-1/2} \cos\alpha \Rightarrow \\ |f'(x_k)| &< |\cos\alpha| = r \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} |e_k| &= |x_k - \Omega| = |f(x_{k-1}) - f(\Omega)| \\ &= |f'(x_m)(x_{k-1} - \Omega)| \\ &< r |x_{k-1} - \Omega| < \dots < r^k |x_0 - \Omega| = r^k |e_0| \end{aligned} \quad (19)$$

其中, x_m 是位于 x_{k-1} 和 Ω 之间的一点. 由公式(18)和(19)可知, 只有两腿夹角为 $\alpha = 180^\circ$ 时 $r = 1$, 否则 $r < 1$, 而伸缩腿双足机器人正常行走过程中 $\alpha < 180^\circ$, 总有 $r < 1$. 因此,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |e_k| < \lim_{k \rightarrow \infty} |r^k e_0| = \lim_{k \rightarrow \infty} r^k |e_0| = 0 \quad (20)$$

不动点 Ω 全局渐进稳定.

该定理从数学角度证明了半被动行走不动点的存在性和全局渐进稳定性. 然而, 从动力学角度分析, 半被动机器人不动点存在并且实现稳定行走还必须满足保证髋关节能通过最高点的条件, 根据公式(9)可得

$$\frac{1}{2} M l_0^2 \Omega^2 > M g l_0 (1 - \cos \varphi) \Rightarrow \Omega^2 > \frac{2g}{l_0} (1 - \cos \varphi) \quad (21)$$

再根据公式(15), 可以得到腿伸缩量 u 的限制条件

$$u > l_0 \tan^2 \alpha \quad (22)$$

4 仿真结果

采用公式(8)给出的反馈控制率, 对伸缩腿双足机器人行走过程进行仿真. 假设系统在腿摆动阶段没有能量损失, 且机器人在与地面冲击时两腿间的夹角保持恒定 $\alpha = \pi/6$. 髋关节集中质量 $M = 10\text{kg}$, 腿长度为 $l = 1\text{m}$, 腿伸缩量 $u = 0.5\text{m}$, 重力加速度 $g = 9.8\text{m/s}^2$. 取支撑腿初始角速度分别为 1.2rad/s 和 0.8rad/s 的仿真结果如图3所示. 从图3可以看出, 不论是支撑腿初始角速度大于还是小于不动点处的角速度, 经过20步左右行走, 每步机器人支撑腿的角速度初值都稳定为恒定值——系统的不动点. 根据(15)式可以计算出计算系统的不动点为 1.0009rad/s .

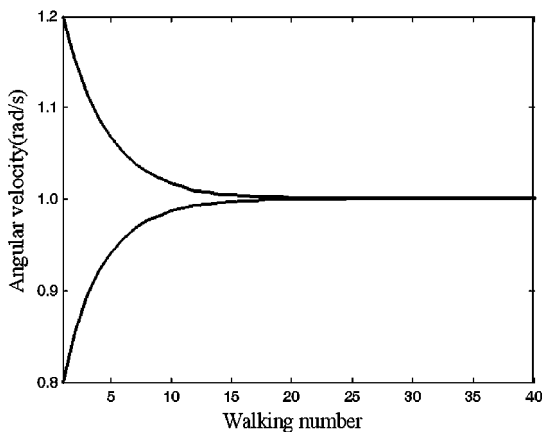


图3 支撑腿角速度初值(无干扰)

Fig.3 Plots of initial angular velocity of stance leg (without disturbance)

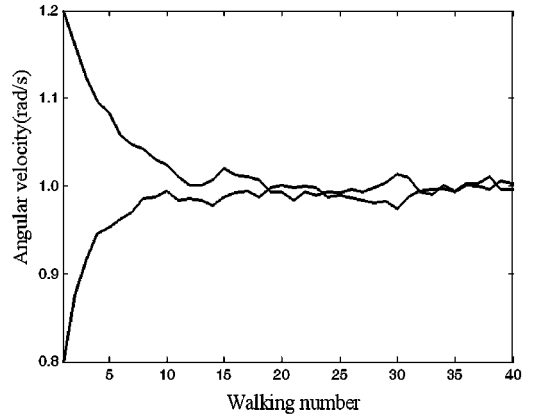


图4 支撑腿角速度初值(u 加入5%随机干扰)

Fig.4 Plots of initial angular velocity of stance leg (with 5% disturbance added to u)

为了考察系统对干扰的鲁棒性, 首先考虑系统对控制输出干扰的响应, 假设支撑腿伸缩量存在5%的随机干扰. 系统的参数和初始条件等与前面的仿真相同, 仿真结果如图4所示. 从图中可以看出, 经过15步行走, 冲击后机器人支撑腿的角速度初值都稳定在不动点附近. 结果表明系统对执行器的误差干扰具有很强的鲁棒性. 接下来考虑系统对支撑腿初始角速度干扰的响应, 假设支撑腿初始角速度在系统达到稳态后发生突变. 系统的参数和初始条件等与前面的仿真相同, 仿真结果分别如图5和图6所示. 从图中可以看出, 不论是初始角速度向上还是向下突变, 经过10步行走, 冲击后机器人支撑腿的角速度初值都恢复且稳定在不动点附近. 结果表明系统对支撑腿初始角速度干扰具有鲁棒性.

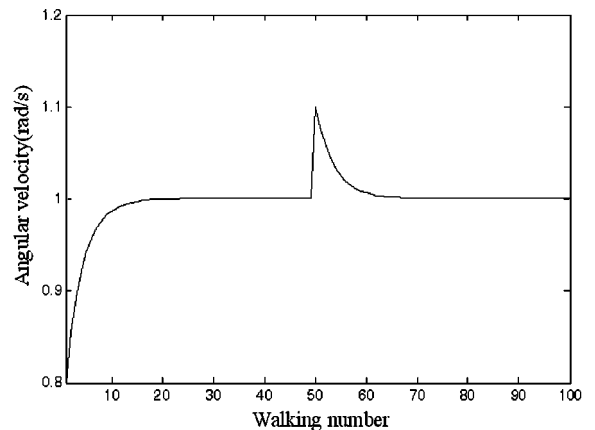


图5 支撑腿角速度初值(50步时角速度变为 1.1rad/s)

Fig.5 Plots of initial angular velocity of stance leg (with angular velocity changed to 1.1rad/s at 50 steps)

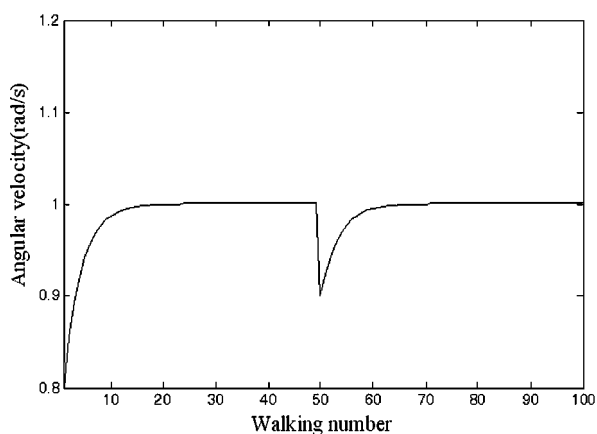


图6 支撑腿角速度初值(50步时角速度变为0.9rad/s)

Fig.6 Plots of initial angular velocity of stance leg
(with angular velocity changed to 0.9 rad/s at 50 steps)

5 小结

本文研究了伸缩腿双足机器人行走控制系统设计和系统不动点的稳定性问题,在冲击时刻双足机器人两腿夹角保持恒定的条件下,设计了简单的反馈控制率,并证明了行走过程不动点的全局稳定性.仿真实验结果验证了理论分析与设计的正确性,且不动点对执行器干扰和支撑腿初始角速度干扰都具有很强的鲁棒性.在本文理论研究和仿真实验基础上,开展伸缩腿伸长量的最优控制、伸缩腿结构和弹簧支撑倒立摆模型结合是需要进一步研究的课题.在多柔体系统动力学研究的基础上^[12],开展主被动关节柔性^[13]双足机器人行走控制的研究是目前值得关注的研究方向.

参 考 文 献

- Collins S, Ruina A, Tedrake R, et al. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. *Science*, 2005, 307(5712):1082~1085
- McGeer T. Passive dynamic walking. *International Journal of Robotics Research*, 1990,9(2):62~82
- Wisse M, Schwab A L, Linde R Q, et al. How to keep from falling forward: Elementary swing leg action for passive dynamic walkers. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005,21(3):393~401
- Kuo A D. Energetics of actively powered locomotion using the simplest walking model. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2002,123(1):264~269

- 赵明国,董浩,张乃尧. 双足机器人虚拟斜坡行走的抗扰能力研究. *机器人*, 2010,32(6):773~786 (Zhao M G, Dong H, Zhang N Y. On disturbance rejection of the bipedal robots in virtual slope walking. *Robot*, 2010, 32(6):773~786 (in Chinese))
- 柳宁,李俊峰,王天舒. 用胞胞映射计算被动行走模型不动点的吸引盆. *工程力学*, 2008,25(10):218~223 (Liu N, Li J F, Wang T S. Study of the basin of attraction of passive models by the aid of cell-to-cell mapping method. *Engineering Mechanics*, 2008,25(10):218~223 (in Chinese))
- 倪修华,陈维山,刘军考等. 弹簧刚度对被动步行的稳定性影响. *力学学报*, 2010,42(3):541~547 (Ni X H, Chen W S, Liu J K, et al. The Effect of spring stiffness on the stability of passive dynamic walking. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 42(3):541~547 (in Chinese))
- Wang Q N, Huang Y, Wang L. Passive dynamic walking with flat feet and ankle compliance. *Robotica*, 2010, 28(3):413~425
- 付成龙,黄元林,王健美等. 半被动双足机器人的准开环控制. *机器人*, 2009,31(2):110~117 (Fu C L, Huang Y L, Wang J M, et al. Quasi open-loop control for semi-passive biped robots. *Robot*, 2009,31(2):110~117 (in Chinese))
- 张奇志,周亚丽. 双足机器人半被动行走固定点全局稳定性分析. *工程力学*, 2013,30(3):431~436 (Zhang Q Z, Zhou Y L. Global stability analysis for the fixed point of semi-passive biped robot walking. *Engineering Mechanics*, 2013,30(3):431~436 (in Chinese))
- 张奇志,周亚丽,徐鑫鑫等. 单电动机驱动的半被动双足机器人设计与实现. *北京信息科技大学学报*, 2016, 36(2):1~6 (Zhang Q Z, Zhou Y L, Xu X X, et al. Design and realization of semi-passive biped robot driven by single motor. *Journal of Beijing Information Science & Technology University*, 2016,36(2):1~6 (in Chinese))
- 田强,刘钺,李培等. 多柔体系统动力学研究进展与挑战. *动力学与控制学报*, 2017,15(5):385~405 (Tian Q, Liu C, Li P, et al. Advances and challenges in dynamics of flexible multibody systems. *Journal of Dynamics and Control*, 2017,15(5):385~405 (in Chinese))
- 田富洋,曹东,董小宁等. 主被动关节柔性树形机器人系统动力学建模与仿真. *动力学与控制学报*, 2017,15(1):59~67 (Tian F Y, Cao D, Dong X N, et al. The dynamic modeling and simulation of flexible tree robots

STUDY ON WALKING CONTROL OF A SEMI-PASSIVE BIPED ROBOT WITH TELESCOPIC LEGS *

Zhang Qizhi[†] Zhou Yali

(*School of automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China*)

Abstract In this paper, the global stability of periodic solutions and walking control of a semi-passive biped robot with telescopic legs are studied. An inverted pendulum with variable length is used as the robot model, and the biped robot is powered by elongating and shortening the stance leg. The fixed point and its stability of the biped robot walking are discussed based on Poincaré map. With the assumption that the angle between two legs keeps constant, when the swing leg impacts with ground at heel-strike, the control law of telescopic length of the stance leg is designed by feedback of the angle between stance leg and vertical line. Then, the global stability of the fixed point is proved for the biped robot walking with telescopic legs. The simulation results show that the proposed feedback control law can make the biped robot with telescopic legs walk stably on the level ground, and the cycle gait is robust to the various disturbances of the actuator and the disturbances of the initial angular velocity of stance leg.

Key words biped robot, telescopic legs, periodic solutions, fixed point, semi-passive walking