

文章编号:1671-6833(2018)02-0023-05

新型四足步行机器人串并混联腿的轨迹规划与仿真研究

高建设,王玉闯,刘德平,王保糖

(郑州大学 机电一体化研究所,河南 郑州 450001)

摘 要:为了提高四足机器人的载重自重比,综合了一种新型串并混联四足步行机器人,并针对其运动过程的冲击问题,使用了一种基于高次多项式的零冲击足端轨迹规划算法.该机器人每条腿均是由 3-RRR 并联机构串联一个转动机构组成.此机构利用 D-H 的方法建立坐标系,利用足端轨迹规划算法在世界坐标系对串并混联腿的摆动相进行足端轨迹规划,支撑相利用匀速直线运动进行规划.根据反解模型,计算出足端在髋关节全局坐标系下的足端轨迹.然后,基于混联腿的运动学逆解用 Matlab 编程计算得出串并混联腿的四个驱动函数.最后,把单腿模型导入到 ADAMS 中,添加约束、驱动后,利用 ADAMS 对串并混联腿进行运动仿真.结果显示,该混联腿的足端实现了零冲击规划的目标,且足端轨迹的速度、加速度平滑.由此表明仿真结果与理论结果相符,验证了该算法的合理性和有效性,为进一步研究四足机器人的步态规划和运动控制奠定了基础.

关键词:串并混联;四足步行机器人;足端轨迹规划;Matlab;ADAMS 仿真

中图分类号:TP242 文献标志码:A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.008

0 前言

由于仿生机器人同时具有生物和机器人的特点,所以逐渐在反恐防爆、抢险救灾等不适合由人来承担任务的环境中表现出良好的应用前景^[1-2].步行机器人由于落足点离散,在其足端能够达到的范围内可以灵活调整行走姿态,并合理选择支撑点,所以对复杂地形和非结构化环境具有更强的适应能力^[3],目前已成为机器人研究的热点领域之一.

在四足机器人中,其腿部机构多数是串联的,比较典型的有美国波士顿动力学公司的 BigDog、猎豹 Cheetah 和野猫 Wildcat 等.这些机器人腿的结构简单,建模和控制比较容易,但自重载重比大,承载能力相对较低.也有学者利用并联腿机构来设计仿生机器人,如上海交通大学提出的六足步行机器人的每条腿都是一种典型 3-DOF 的并联机构^[4],燕山大学王洪波等基于并联机构提出了四足两足可重组步行机器人^[5].虽然并联腿机构有自重载重比小、承载能力强、稳定性高的特点,但是有工作空间小的缺点.为了克服串联或者并联腿各自的不足,国内外一些学者对混联机构

做了研究.在四足仿生机器人方面,田兴华等^[6]提出了 3 种类型的 3 自由度混联腿构型,建立了各自运动学模型和工作空间模型,并证实了混联腿的优越性.

另一方面,步行机器人的轨迹规划是机器人能否平稳运动的重要问题.山东大学的李华^[7]和南京航空航天大学的马东兴等^[8]都是对关节空间进行规划控制,分别实现了步态行走和定点转弯步态.基于足端轨迹的步态规划是比较常用的方法,最为典型的是基于复合摆线的足端轨迹规划方法.文献^[9]提出了基于摆线的足端轨迹规划方法,实现了四足机器人 walk 步态的行走.东北大学柳洪义等在 1994 年用修正组合摆线作为足端轨迹规划,解决了足端对不平地面的自适应问题,避免了抬腿时的急动^[10].北京理工大学王立鹏等^[11]又对复合摆线进行了改进,降低了足端在行走过程中的冲击力.山东大学荣学文等^[12]用了三次多项式作为摆动相的足端轨迹.华中科技大学程品等^[13]采用五次多项式对足端摆动相轨迹进行了规划.

笔者使用基于高次多项式的零冲击轨迹规划算法对一种新型四足步行机器人的串并混联腿进行规划,并对其进行仿真研究,仿真结果验证了足

端轨迹的正确性和合理性,为整机的轨迹规划和步态规划研究奠定了基础.

1 四足机器人机构描述

提出了一种新型四足步行机器人,其结构如图 1 所示.该机器人由 4 个完全相同的机器人腿部机构和运载平台组成.



图 1 四足机器人样机

Fig. 1 The prototype of a quadruped robot

图 2 为腿部机构,图 3 为髋关节.每条腿部机构均是由髋关节和膝关节组成,其中髋关节由 3-RRR 并联机构构成,该并联机构的 3 个分支九个转动副的轴线相交于动平台的中心,动平台能够实现 3 个转动自由度;膝关节由大腿和小腿通过转动副连接,这样就能实现整个腿部机构运动所需的 4 个运动自由度.髋关节采用并联机构,一方面可以提高承载能力;另一方面将 3 个分支的驱动电机装在背部平台上,可以减轻抬腿运动时的运动惯量,使腿部机构运动轻便灵活.用直线运动电缸实现膝关节的转动运动,增大了膝关节的驱动力矩,提高了膝关节的承载能力.

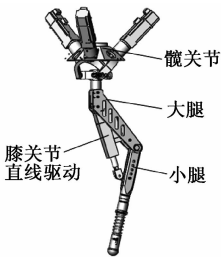


图 2 腿部

Fig. 2 Leg

2 单腿运动学反解模型

首先建立髋关节的坐标系,再来建立整条腿的坐标系.由于髋关节 3 个分支完全相同,并且相互之间相差 120° ,因此,可用 D-H 方法对其第 $i(i=1, 2, 3)$ 个分支建立坐标系,如图 4 所示. $\{A\}$ 为定平

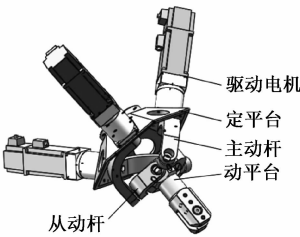


图 3 髋关节

Fig. 3 Hip joint

台坐标系, $\{B\}$ 为动平台坐标系,初始位置时两个坐标系重合.图中的 $\{A_i\}$ 、 $\{B_i\}$ 、 $\{1\}$ 、 $\{2\}$ 和 $\{3\}$ 坐标系的原点都与动平台的中心重合.为了便于表达,将各个坐标系移到各关节的中心点处.

再把髋关节等效成一个球副,与膝关节构成串联机构,则腿部坐标系的建立如图 5 所示.图 5 中 $\{A\}$ 和 $\{B\}$ 与图 4 中完全一样, $\{C\}$ 为膝关节坐标系, L_1 和 L_2 分别为大腿和小腿长度. $\{G\}$ 为世界坐标系,并设足端坐标系与世界坐标系重合,且足端在髋关节全局坐标系下的坐标设为 (P_x, P_y, P_z) .

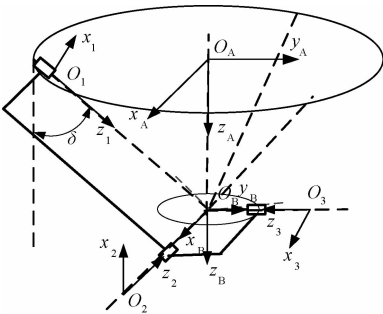


图 4 髋关节坐标系

Fig. 4 Coordinate system of hip joint

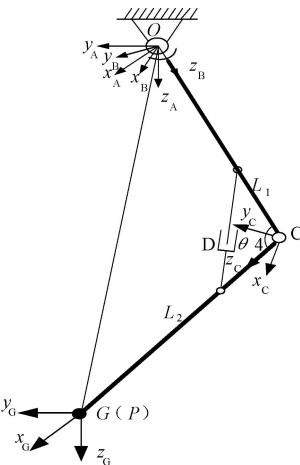


图 5 腿部坐标系

Fig. 5 Leg coordinate system

根据文献[14]得到的串并混联腿的 4 个驱动表示为:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan \frac{o_x}{s_\delta o_z - c_\delta o_y} \\ \theta_2 = \arctan \left(\frac{(\sqrt{3}n_x - o_x) + \sqrt{3}(\sqrt{3}n_y - o_y)}{\sqrt{3}c_\delta(\sqrt{3}n_x - o_x) + c_\delta(o_y - \sqrt{3}n_y) + 2s_\delta(o_z - \sqrt{3}n_z)} \right) \\ \theta_3 = \arctan \left(\frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}n_y + o_y) - (\sqrt{3}n_x + o_x)}{\sqrt{3}c_\delta(\sqrt{3}n_x + o_x) + c_\delta(\sqrt{3}n_y + o_y) + 2s_\delta(\sqrt{3}n_z + o_z)} \right) \\ L = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - \frac{l_1 l_2 (L_1^2 + L_2^2 - (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2))}{L_1 L_2}} \end{cases}, \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} n_x = \cos \alpha \cos \beta \\ n_y = \sin \alpha \cos \beta \\ n_z = -\sin \beta \\ o_x = \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \\ o_y = \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \\ o_z = \cos \beta \sin \gamma \end{cases}. \quad (2)$$

式中: α 、 β 、 γ 为动平台相对于定平台按 x - y - z 顺序的 RPY 角,且其中 (α, β, γ) 满足

$$\begin{cases} \alpha = \arctan(-p_x/p_y) \\ \beta = 0 \\ \gamma = \arctan(((-a\sqrt{p_x^2 + p_y^2} + bp_z)/ \\ (ap_z + b\sqrt{p_x^2 + p_y^2})) \end{cases}, \quad (3)$$

其中,

$$\begin{aligned} a &= L_1^2 - L_2^2 + (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2); \\ b &= \sqrt{4L_1^2 L_2^2 - (L_1^2 + L_2^2 - (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2))^2}. \end{aligned}$$

用 D-H 方法建立坐标系,描述全局坐标系下足端的表示,则

$${}^A P = {}_c^A T {}^G P, \quad (4)$$

式中: ${}_c^A T$ 表示 $\{A\}$ 系到 $\{G\}$ 系的变换矩阵,并且可直接由机构参数求出; ${}^G P$ 是足端在 $\{G\}$ 系的表示,即足端的轨迹曲线在世界坐标系下的表示。

3 串并混联腿的轨迹规划

在四足步行机器人的步态行走中,伴随着支撑相和摆动相的交替进行,同时伴随着躯干的起伏变化^[15].单腿足端从着地到再次离地腿部的连续相位变化过程称为支撑相,单腿的足端从抬腿离地开始沿规划轨迹运动到再次落地期间连续的相位变化过程称为摆动相.支撑相承载着机器人的负载并通过腿的相位变化移动机器人的躯干,完成目标方向的移动,其相位由步态的前极限相摆至后极限相;摆动相则由后

极限相摆动至前极限相,摆动相决定着机器人的步幅大小和跨越障碍物时的抬腿高度^[11].因此,单腿的轨迹规划包含摆动相和支撑相两个方面的轨迹规划。

3.1 摆动相零冲击轨迹规划

摆动相足端轨迹规划是机器人能够完成步态行走的重要环节.摆动相的运动可以分解成水平运动和竖直运动.笔者基于足端的零冲击思想结合高次多项式规划机器人的足端轨迹,所以在 y_G 方向(水平方向)时让其轨迹满足式(5),

$$\begin{cases} y = -S/2, & t = 0 \\ y = S/2, & t = T_m \\ \dot{y} = 0, & t = 0 \\ \dot{y} = 0, & t = T_m \\ \ddot{y} = 0, & t = 0 \\ \ddot{y} = 0, & t = T_m \end{cases}. \quad (5)$$

上述条件保证运动方向的轨迹在 $t=0$ 和 $t=T_m$ 时的速度和加速度都等于零,并且足端坐标分别是 $-S/2$ 和 $S/2$,其中 S 为摆动相足端的步幅, T_m 为摆动相的周期.据此可以把 y_G 方向的轨迹函数设为五次多项式

$$y = At^5 + Bt^4 + Ct^3 + Dt^2 + Et + F. \quad (6)$$

把式(6)带入式(5)计算得出的位移曲线为

$$y = \frac{6S}{T_m^5}t^5 - \frac{15S}{T_m^4}t^4 + \frac{10S}{T_m^3}t^3 - \frac{S}{2}. \quad (7)$$

同理摆动腿在 z_G 方向(竖直方向)上先抬起然后落下,所以在设计时让其轨迹满足式(8),

$$\begin{cases} z = 0, & t = 0 \\ z = H, & t = T_m/2 \\ z = 0, & t = T_m \\ \dot{z} = 0, & t = 0 \\ \dot{z} = 0, & t = T_m \\ \ddot{z} = 0, & t = 0 \\ \ddot{z} = 0, & t = T_m \end{cases}. \quad (8)$$

式(8)保证了摆动腿在抬腿过程中,足端在 $t=0$ 和 $t=T_m$ 时速度和加速度为零,并限制了 $t=0$ 、 $t=T_m/2$ 、 $t=T_m$ 时足端的位置分别是 0 、 H 、 0 ,其中, H 为抬腿高度.

故可以设 z_c 方向的轨迹曲线为:

$$z = At^6 + Bt^5 + Ct^4 + Dt^3 + Et^2 + Ft + G. \tag{9}$$

把式(9)代入式(8)可以求得位移曲线:

$$z = -\frac{64H}{T_m^6}t^6 + \frac{192H}{T_m^5}t^5 - \frac{192H}{T_m^4}t^4 + \frac{64H}{T_m^3}t^3. \tag{10}$$

令 $S=90\text{ mm}$, $H=20\text{ mm}$, $T_m=0.5\text{ s}$, 在摆动腿运动的一个周期内,用 MATLAB 可以计算出足端在 yoz 平面内的足端轨迹曲线,如图 6 所示.

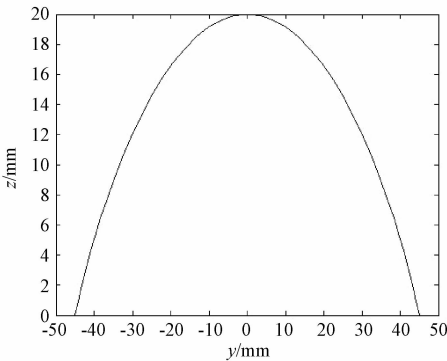


图 6 摆动相在 yoz 平面的足端轨迹

Fig. 6 The trajectory of the phase in the yoz plane

3.2 支撑相轨迹规划

支撑相是单腿的足端从着地到再次离地期间腿部的连续相位变化过程.它承载着机器人的负载并通过腿部的相位变化来移动机器人的躯干,从而完成目标移动.在规划支撑相时,假设机器人运动过程中腿部足端和地面之间没有相对滑动,躯干始终和地面保持平行,在支撑相时,支撑腿运动推动机体水平向前运动,等效于足端的轨迹水平向后移动.足端采用匀速直线运动,以减少在运动过程中足端与地面产生相对滑动.在此基础上进行足端轨迹规划,并利用反解模型求解支撑腿电机的驱动函数.

3.3 电机驱动函数

单腿周期是单腿完成摆动相和支撑相的时间.并且支撑相和摆动相的时间都是 0.5 s .轨迹即是单腿的摆动相和支撑相轨迹的顺序执行.前面已经规划了单腿两个相位的足端轨迹,通过它的运动学反解^[14]可以计算出各电机的驱动函数.在单腿机构的髋关节坐标系下,图 7 为膝关节电缸在一个周期内的变化量,图 8 为髋关节 3 个电机随时间的转角变化.从图 7 和 8 中可以看出,在一个完整的周期内,由机器人单腿运动学反解得

到的电机转角的变化是连续的,说明根据多项式曲线规划的零冲击轨迹规划方案是可行的.

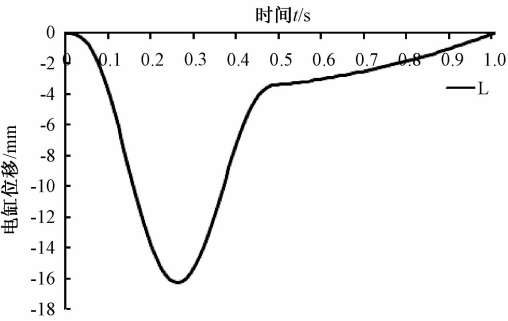


图 7 膝关节电缸在一个周期内的位移变化

Fig. 7 Displacement of the knee joint in one cycle

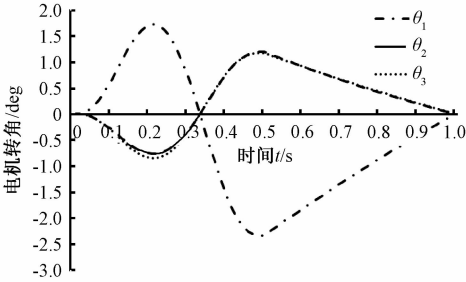


图 8 髋关节 3 个电机在一个周期内转角变化

Fig. 8 Changes of three motors in the hip joint in one cycle

4 仿真试验

将串并混联腿的 solidworks 模型另存为 para-solid 格式,然后导入 ADAMS 中,添加各构件的质量、约束和电机驱动以后,进行 ADAMS 仿真.由于在仿真时足端相对于动平台坐标系绕竖直方式旋转了 30° ,所以仿真结果在 x 、 y 、 z 方向上都有位移、速度、加速度的变化.在驱动函数的作用下,图 9~11 分别表示了足端一个周期内在 x 、 y 、 z 方向的位移、速度、加速度随时间的变化.在摆动相时,足端的速度、加速度都是连续的,并且大小与规划的一致,支撑相时做匀速直线运动.仿真的结果与足端轨迹规划的结果一致.但是摆动相与支撑相衔接的地方有较大的冲击,所以后续整机步态规

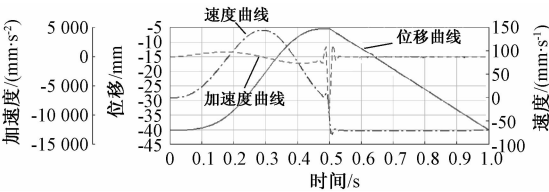


图 9 足端点在 x 方向的位移、速度、加速度随时间变化图

Fig. 9 The displacement, velocity and acceleration of the foot end point in the x direction

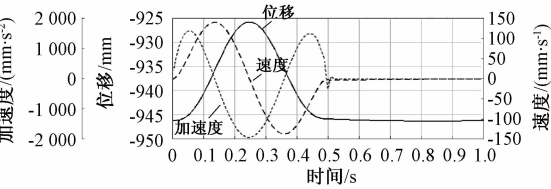


图 10 足端点在 y 方向的位移、速度、加速
度随时间变化图

Fig. 10 The displacement, velocity and acceleration
of the foot end point in the y direction

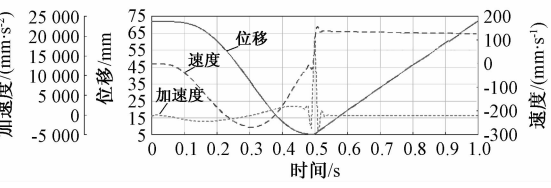


图 11 足端点在 z 方向的位移、速度、加速
度随时间变化图

Fig. 11 The displacement, velocity and acceleration of
the foot end point in the z direction

划时考虑文献[11]提出的以短周期的正弦加速度加以引导,实现从零速到匀速和匀速到零速的平滑过渡,减小支撑相和摆动相间突然加减速造成的冲击。

5 结论

提出了一种新型串并混联的四足步行机器人,该机器人的每条腿部机构均是由髋关节和膝关节组成,具有 4 个自由度,髋关节是 3-RRR 并联机构,与膝关节组成串并混联机构. 对其在运动过程中出现的冲击问题,使用了一种基于高次多项式的足端零冲击轨迹规划算法. 利用 D-H 方法建立坐标系,在世界坐标系下对串并混联腿进行了基于高次多项式的零冲击足端轨迹规划. 结合单腿运动学反解求出混联腿的 4 个驱动函数. 之后通过 ADAMS 进行运动仿真分析,仿真的结果显示:串并混联腿能够满足规划的动作要求,轨迹的速度和加速度平滑,实现了零冲击的要求. 证明了高次多项式曲线的零冲击足端轨迹规划算法的正确性和可行性,为后续整机的步态规划和运动控制奠定基础。

参考文献:

[1] 谭民,王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报,2013,39(7):963-972.

[2] 王东署,朱训林. 未知环境中考虑姿态稳定性的自主机器人路径规划[J]. 郑州大学学报(工学版),2014,35(5):31-35.

[3] SEMINI C, TSAGARAKIS N G, GUGLIELMINO E, et al. Design of HyQ-A hydraulically and electrically actuated quadruped robot[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part I: journal of systems and control engineering, 2011, 255(6): 831-849.

[4] YANG P, FENG G. A new six-parallel-legged walking robot for drilling holes on the fuselage[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part C: journal of mechanical engineering science, 2014, 228(4): 753-764.

[5] 王洪波,齐政彦,胡正伟,等. 并联腿机构在四足/两足可重组步行机器人中的应用[J]. 机械工程学报,2009,45(8):24-30.

[6] 田兴华,高峰,陈先宝,等. 四足仿生机器人混联腿构型设计及比较[J]. 机械工程学报,2013,49(6):81-88.

[7] 李华. 内膝肘式四足机器人步态仿真[D]. 济南:山东大学机械工程学院,2012.

[8] 马东兴. 四足机器人步态规划与仿真[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院,2008.

[9] YOSHIHLO S, KAZUTOSHI K, YUJI H, et al. Foot trajectory for a quadruped walking machine [C]// IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, IROS,1990, vol. 1: 315-322.

[10] 柳洪义,宋伟刚,彭兆行. 控制步行机足运动的一种方法——修正组合摆线法[J]. 机器人,1994,16(6):350-356.

[11] 王立鹏,王军政,汪首坤,等. 基于足端轨迹规划算法的液压四足机器人步态控制策略[J]. 机械工程学报,2013,49(1):39-44.

[12] 荣学文. SCalf 液压驱动四足机器人的机构设计与运动分析[D]. 济南:山东大学控制科学与工程学院,2013.

[13] 程品,罗欣,顾瀚戈. 四足机器人砂砾地面对角行走控制方法[J]. 装备制造技术,2014(4):8-12.

[14] 高建设,李明祥,侯伯杰,等. 新型四足步行机器人串并混联腿的运动学分析[J]. 光学精密工程,2015,23(11):3147-3160.

[15] 张秀丽. 四足机器人节律运动及环境适应性的生物控制研究[D]. 北京:清华大学精密仪器与机械学,2004.

The Realization of RZFBF Pre-coding Based on GAMP Algorithm
for Base Station Cooperation System

WANG Zhongyong, FENG Shuangli, YUAN Zhengdao, ZHANG Yuanyuan

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In the base station cooperation system, the centralized cooperative pre-coding based on regularized zero-forcing beam-forming(RZFBF) could obtain a similar capacity performance to that of dirty-paper coding. However, with the number of cooperative base station increasing, the centralized cooperative pre-coding had a quite high requirement for the backhaul capacity. In order to solve this problem, a distributed transmitted signal design scheme based on generalized approximate message passing(GAMP) algorithm was proposed. The scheme decomposed the overall computational cost into many smaller computation tasks by exchanging information between adjacent base stations, which greatly reduced the requirement of backhaul capacity. Simulation results showed that the proposed algorithm could achieve approximate system throughput with the centralized cooperative RZFBF pre-coding at a lower computational complexity.

Key words: base station cooperation; zero-forcing beam-forming; pre-coding; backhaul capacity; message passing algorithm

(上接第 27 页)

Research on Trajectory Planning and Simulation on the Serial-parallel Leg of
a Novel Quadruped Walking Robot

GAO Jianshe, WANG Yuchuang, LIU Deping, WANG Baotang

(Mechatronics Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to improve the payload-weight ratio, a novel quadruped walking robot was presented. And aiming at the impingement in the process of movement of the quadruped walking robot, a low contact compact trajectory planning method using high order polynomial curve was used. Each leg of the robot was composed of a 3-RRR parallel mechanism which was connected in series with a rotating mechanism. The coordinate system was established based on D-H method. Based on the low contact compact algorithm and the uniform linear motion, the trajectory planning was carried out respectively for the swing phase and the support phase of the foot end of the serial-parallel leg. The trajectory of the foot end in the global coordinate system of the hip joint was calculated according to the inverse solution model. The four driving function of the leg was calculated using Matlab based on the inverse kinematics solution of the hybrid leg's kinematics model. Finally, the leg model was exported into the ADAMS, the motion simulation of the hybrid leg was carried out by using ADAMS after adding constraints and the drive. The result showed that the foot end of the hybrid leg achieved the goal of low impact, and the curve of foot end of the speed and acceleration was smooth. The simulation results were consistent with the theoretical results and the rationality and validity of the algorithm were verified. This research provided the foundation for the further research of robot's gait planning and motion control.

Key words: series parallel; quadruped walking robot; trajectory planning; matlab; ADAMS simulation