狭小空间匍匐式四足机器人的稳定行走控制及运动策略

韩耀辉[†], 段晋军[†], 王周义, 王炳诚, 郭策, 戴振东^{*}

南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016

[†] 同等贡献

^{*} 联系人, E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

2021-02-02 收稿, 2021-07-19 修回, 2021-07-21 接受, 2021-07-22 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFB1305601)资助

摘要 现代装备日益庞大、复杂, 各分系统和模块间形成大量结构形状复杂的狭小空间, 检测此类狭小空间内的设备状态对保障系统安全、降低运营成本具有重要意义. 受壁虎能够在狭小空间顺利攀爬运动的启发, 我们发明了仿壁虎匍匐运动机构和黏附脚掌, 这种机器人在狭小空间, 特别是宽度受限空间的运动稳定性为机器人运动规划的核心问题. 本文研究宽度受限情况下匍匐式四足机器人的运动稳定性, 作为对比, 同时研究非受限情况下匍匐四足机器人的稳定运动设计. 本文提出了一种保障运动稳定的重心轨迹规划方法, 结合纵向稳定裕度和静态稳定区域方法, 使用双支撑三角形减少支撑区域的约束条件, 保留前向边界和后向边界的稳定裕度计算以简化步骤, 提高了稳定裕度计算和重心轨迹规划的效率; 提出在宽度受限情况下匍匐式四足机器人的运动策略, 四肢向内收拢适应宽度受限约束, 分析受限宽度下机器人的稳定裕度和最大步长. 实验验证了该机器人在受限空间前向和横向运动的稳定性及运动控制方法.

关键词 宽度受限狭小空间, 稳定控制, 运动策略, 纵向稳定裕度, 静态稳定区域

机器人被广泛应用于人所不能、人所不敢和人所不愿的场景. 狭小空间内的作业是典型的人所不能的场景, 现有不少装备的内部或者进入通道, 往往根据人体进入的可行性设计, 增加了设计难度, 并往往影响产品性能; 同时, 在狭小空间内作业困难、成本较高. 采用机器人代替人工可显著提高效率和降低成本, 对装备设计、使用维护具有重要意义. 为应对狭小空间运动需求的复杂环境, 已开展了多种机器人的研究和研制, 如蛇形机器人、轮式机器人、腿式机器人(图1). 美国卡耐基梅隆大学(Carnegie Mellon University)研制的蛇形机器人可识别并灵活地绕过障碍物(图1(a))^[1]. 意大利工业技术与自动化研究所(Institute of Industrial Technologies and Automation)为适应管道空间设计了

细长身体的轮式机器人, 用于航空结构件狭小管道的检测和维修任务(图1(b))^[2]. 瑞士苏黎世联邦理工学院(Swiss Federal Institute of Technology in Zurich)设计了一种六足机器人, 能自主规划、调整姿态以通过0.25 m宽的开口, 跨过0.7 m长的沟槽, 越过0.22 m高的障碍物(图1(c))^[3]. 其中, 蛇形机器人运动灵活, 但负载能力较弱; 轮式机器人能快速移动, 但无法应对非结构环境; 腿式机器人负载能力强, 越障能力优异, 能根据不同的狭小空间变换机身的姿态, 是狭小空间作业机器人的最优选择.

Kitano等人^[4]研制的TITAN-XIII四足机器人采用绳驱动关节, 通过改进传动装置和优化机械结构, 使得TITAN-XIII的速度和能效有较大提高, 其对角步态运

引用格式: 韩耀辉, 段晋军, 王周义, 等. 狭小空间匍匐式四足机器人的稳定行走控制及运动策略. 科学通报, 2021, 66: 4334–4344

Han Y H, Duan J J, Wang Z Y, et al. Stability motion control and locomotion strategy of a crawling quadruped robot in the narrow space (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 4334–4344, doi: 10.1360/TB-2021-0149

图1 狭小空间机器人. (a) 蛇形机器人; (b) 轮式机器人; (c) 足式机器人
Figure 1 Confined space robots. (a) Snake-like robot; (b) wheeled robot; (c) legged robot

动的最大速度达到0.7 m/s. Garcia等人^[5]研制了SILO4四足机器人, 研究了立足点优化和步态自适应方法以保持机器人稳定性, 使SILO4能在崎岖地形、受到外部干扰时依然保持稳定. Horvat等人^[6]研制了仿蝶螈机器人Pleurobot, 其单腿有4个主动关节, 采用弹性球状足端, 脊柱有11个主动关节, 实现了整体的柔性. Pleurobot使用爬行步态, 能在楼梯、台阶和颠簸地形中稳定运动. Horvat等人^[7]采用模型预测控制(model predictive control, MPC)优化了Pleurobot的步行稳定性. Zhang等人^[8]优化了仿蝶螈机器人的结构, 把脊柱关节数减少到3个, 并提出一种协调脊柱和腿部关节保证机器人本体平衡的控制方法. Bandyopadhyay等人^[9]研制的四足机器人Magneto单腿有3个主动关节, 磁吸附脚掌有3个被动自由度, 本体和小腿的结构优化设计使Magneto能通过23 cm宽的狭小窗口, 在钢铁管道内攀爬运动. 甄伟鲲等人^[10]设计了一种新结构的匍匐四足机器人, 每条腿有3个关节, 机身有6个关节, 使身体可在六边形构

态、矩形构态和扭腰构态间变换, 机器人扭腰构态能适应狭窄弯道的过渡运动. 戴振东和彭福军^[11]以及汪中原等人^[12]面向微重力空间站环境研制了一款仿壁虎机器人, 实现了机器人在失重情况下的稳定黏附运动; 他们提出, 仿壁虎机器人在狭小空间内的稳定运动是亟待突破的课题.

对于狭小空间环境, 运动稳定性是四足机器人的重要性能指标. McGhee和Frank^[13]提出了静态稳定裕度(stable stability margin, SSM)的概念. Messuri和Klein^[14]提出了能量稳定裕度(energy stability margin, ESM)的概念. Song和Waldron^[15]提出了纵向稳定裕度(longitudinal stability margin, LSM)的概念, LSM方法简化了静态稳定裕度的运算过程. Hirose^[16]提出对角线原理, 利用机器人的两条对角支撑足连线判别稳定性. 王新杰等人^[17]提出静态稳定区域(statically stable area, SSA)的概念: 以机器人立足点和重心投影点的连线所在直线为边界线, 由两边界线所形成的位于两立足点

对面的区域定义为静态稳定区域. SSA方法能简化选定摆动腿和摆动腿落足点的计算过程, 用于规划机器人重心投影的移动轨迹.

针对匍匐式四足机器人在平坦地形和崎岖地形的研究较为成熟, 但缺乏对狭小空间运动规划的研究. 本文基于一款匍匐式四足机器人平台, 研究了机器人爬行步态运动控制, 包括机器人的步态规划以及稳定性算法. 由于LSM方法在判断稳定性时仅需考虑前向边界和后向边界, 而SSA方法简化了机器人的支撑区域选择, 本文结合LSM方法和SSA方法提出了一种匍匐式四足机器人的静态稳定性算法, 并深入研究了匍匐式四足机器人在宽度受限狭小空间内的运动控制策略, 为四足机器人在狭小空间内的运动控制提供一种思路.

1 匍匐式四足机器人运动规划

1.1 步态规划

我们根据大壁虎运动系统的解剖结构设计了一款匍匐式四足机器人, 其肩/髋关节有横滚和偏转2个自由度, 肘/膝关节有1个偏转自由度, 四腿关节配置相同(图2(a)). 机器人运动规划所用的坐标系包括世界坐标系 $\{W\}$ 、机身坐标系 $\{B\}$ 和足端坐标系 $\{F\}$, 三个坐标系的原点分别位于地面、机身重心以及脚掌中心, 以上坐标系以机器人前进方向为 X 轴正方向, 重力的反方向为 Z 轴正方向, 根据右手定则得到 Y 轴正方向.

考虑到稳定运动是该类四足机器人的优先保障性能, 选用三角步态为机器人步态研究的基础. McGhee和Frank^[13]研究了四足机器人的6种非奇异三角步态, 发现迈步顺序为4-2-3-1的步态具有最大静稳定裕度. 本文以此为机器人迈步顺序的基础. 在步态周期设计中, 采用了分时段进行腿足摆动和机身移动的方法, 能

进一步提高机器人的运动稳定性. 步态周期规划图(图2(b))描述了机器人的左前腿、右前腿、左后腿、右后腿的步态周期; 黑色块为足端支撑相, 白色块为足端摆动相; BMP(body move phase)代表机身移动时段, FSP(foot swing phase)代表足端移动时段. 在一个步态周期中, 机器人先四足支撑将机身向左前方移动, 接着顺序摆动右后腿和右前腿, 然后四足支撑将机身向右前方移动, 最后顺序摆动左后腿和左前腿.

前向运动是机器人的基本能力, 其运动规划包括迈步顺序、足端轨迹和重心轨迹规划三个部分. 本文规定前向运动爬行步态的迈步顺序为4-2-3-1. 为保证前向运动的速度均匀性, 机器人在摆动任意一条腿的同时通过其他三腿支撑机身向前匀速移动, 运动过程如图3(a). 横向运动是机器人沿左右方向的运动, 其运动规划与前向运动类似, 但迈步顺序有所不同. 以向右运动为例, 机器人迈步顺序为3-4-1-2, 运动过程如图3(b). 图(3)中按从左到右、从上到下的顺序表示机器人的步态变化过程, 其中矩形表示机器人机身, 空心圆点和实心圆点分别表示足端迈步前后的位置, 黑色方块表示机器人重心位置, 1、2、3、4分别表示左前腿足端、右前腿足端、左后腿足端、右后腿足端; 1'、2'、3'、4'分别表示对应足端在迈步后的位置.

1.2 静态稳定性算法

匍匐四足机器人用三角步态在平坦地面上的稳定性, 需根据静态稳定要求规划重心轨迹. 张帅帅等人^[18]提出一种三角步态规划方法: 四足机器人在行走中通过躯干摆动增加稳定裕度, 重心运动轨迹用五次曲线拟合, 保证运动的连续性. 引入LSM和SSA方法量化稳定裕度. LSM定义为机器人重心向运动表面的投影沿前后方向到支撑多边形前边界和后边界距离的最小值.

图2 匍匐式四足机器人. (a) 拓扑结构和坐标系; (b) 步态周期

Figure 2 Creeping quadruped robot. (a) Topological structure and coordinate system; (b) gait cycle

图3 (网络版彩色)机器人运动过程示意图. (a) 前向运动; (b) 横向运动
Figure 3 (Color online) Schematic diagram of the robot motion process. (a) Forward motion; (b) lateral motion

SSA定义过立足点和机器人重心投影点的直线为边界线, 而由两边界线所形成的位于两立足点对面的区域则定义为静态稳定性区域。

本文结合LSM和SSA提出了一种适用匍匐四足机器人静稳定及其在狭小空间也满足静稳定的重心轨迹规划方法。首先使用SSA确定机器人的支撑区域, 按照前向运动的迈步顺序4-2-3-1, 抬起足4时, 支撑多边形为 $\Delta 123$, 抬起足2时, 支撑多边形为 $\Delta 134$, 两个支撑三角形的重合区域为 $\Delta 135$, 称为双支撑三角形, 如图4(a)阴影部分。在抬起足4和足2的过程中, 只要保证机器人的重心投影落在双支撑三角形 $\Delta 135$ 内, 就能保持机器人的稳定, 因此, 机器人的稳定裕度计算可以简化为重心投影在双支撑三角形内的稳定裕度计算。根据LSM,

重心投影沿前进方向到双支撑三角形前向边界的距离为 D_F , 等于 $P_{14}G$ 的长度, 而重心投影到后向边界的距离 D_R 等于 $P_{23}G$ 的长度, 得到机器人的稳定裕度表达式如式(1)所示。相反地, 机器人在抬起足3和足1的过程中, 其双支撑三角形为 $\Delta 245$, 此时要求机器人的重心投影落在 $\Delta 245$ 内, 得到的稳定裕度表达式为

$$S_{\min} = \min(D_F, D_R) = \min(P_{14}G, P_{23}G). \quad (1)$$

为计算机机器人的稳定裕度, 定义相关参数: 以初始时刻机器人重心在地面的投影点为原点建立世界坐标系 $\{W\}$, 机器人左前足、右前足、左后足、右后足在水平面内相对于机器人重心投影的位置分别用 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3)$ 、 $P_4(x_4, y_4)$ 表示, 重心投影的位置用 $G(x_G, y_G)$ 表示。最终得到稳定裕度的解析式为

$$S_{\min} = \min \left(\left| \left(\frac{x_4 - x_1}{y_4 - y_1} \right) (y_G - y_1) + x_1 - x_G \right|, \left| \left(\frac{x_3 - x_2}{y_3 - y_2} \right) (y_G - y_2) + x_2 - x_G \right| \right). \quad (2)$$

1.3 重心轨迹规划

重心轨迹规划是机器人三角步态运动的重要组成部分。本节提出了一种基于四次多项式拟合的重心轨迹规划方法, 在实现机器人全过程匀速运动的同时, 保证了运动过程不同阶段的稳定性。为此, 重心轨迹规划方法有三条规则: 规则1, 为保证机器人的运动稳定性,

图4 (网络版彩色)四足机器人静态稳定性算法. (a) 纵向稳定裕度和双支撑三角形; (b) 机器人重心轨迹规划
Figure 4 (Color online) Static stability algorithm for a quadruped robot. (a) Longitudinal stability margin and double supporting triangle; (b) trajectory planning of the gravity center of the robot

要求任意时刻机器人的稳定裕度都不小于 S ; 规则2, 在机器人朝指定方向运动时, 机器人沿该方向的运动速度保持恒定; 规则3, 在机器人朝指定方向运动时, 机器人沿与该方向垂直方向的运动幅度尽可能小。

下面规划机器人的重心轨迹曲线(图4(b)). 第一步, 根据机器人步态周期划分临界时间点, 分别为初始时刻、足4抬起时刻、足2落地时刻、足3抬起时刻、足1落地时刻和结束时刻, 这6个时刻对应的重心投影点分别为 G_0 、 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 . 第二步, 在满足稳定裕度要求的前提下, 使用静态稳定性算法计算不同阶段临界点的位置边界条件和速度边界条件, 通过多项式拟合计算重心轨迹方程。

计算过程中定义相关参数: 定义机器人四足落足点围成的矩形宽度为 $2N$ 、长度为 $2M$; 定义机器人步长为 L , 稳定裕度最小值为 S ; 定义机器人单腿摆动阶段的周期时间为 T_{FSP} , 单个机身移动阶段的周期时间为 T_{BMP} .

1.3.1 位置边界条件

已知 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 四点处于三足支撑状态的临界点, 根据机器人稳定裕度要求, 通过计算公式得到四点的位置边界条件. 计算过程如下:

(1) 计算 G_1 点的临界坐标值: 重心投影点运动到 G_1 点时, 机器人即将抬起足4, 相应的支撑区域为 $\Delta 123$, 所以 G_1 的稳定裕度由到前向边界 L_{12} 的距离 D_{12} 和到后向边界 L_{23} 的距离 D_{23} 决定; 结合SSA方法, 得出 G_1 的后向边界裕度 D_{23} 远小于前向边界裕度 D_{12} . 因此, 稳定裕度约束如下:

$$S_{\min} = D_R = D_{23}(x_{G_1}, y_{G_1}) = \left| \left(\frac{x_3 - x_2}{y_3 - y_2} \right) (y_{G_1} - y_2) + x_2 - x_{G_1} \right| \geq S, \quad (3)$$

代入相应的变量, 得到不等式

$$y_{G_1} \geq \frac{SN}{M} - \frac{L}{M} \frac{T_{\text{BMP}}/2}{2T_{\text{BMP}} + 4T_{\text{FSP}}}, \quad (4)$$

进而得到 G_1 点的临界坐标值为:

$$(x_{G_1}, y_{G_1}) = \left(L \frac{T_{\text{BMP}}/2}{2T_{\text{BMP}} + 4T_{\text{FSP}}}, \frac{SN}{M} - \frac{L}{M} \frac{T_{\text{BMP}}/2}{2T_{\text{BMP}} + 4T_{\text{FSP}}} \right). \quad (5)$$

(2) 计算 G_2 点的临界坐标值: 重心投影点运动到 G_2 点时, 机器人即将落下足2, 相应的支撑区域为 $\Delta 134'$, 所以 G_2 的稳定裕度由到前向边界 $L_{14'}$ 的距离 $D_{14'}$ 和到后向边界 $L_{34'}$ 的距离 $D_{34'}$ 决定; G_2 的前向边界裕度 $D_{14'}$ 远小于后向边界裕度 $D_{34'}$. 因此, 稳定裕度约束如下:

G_2 在支撑区域 $\Delta 134'$ 内到前向边界 $L_{14'}$ 的距离为

$$S_{\min} = D_F = D_{14'}(x_{G_2}, y_{G_2}) = \left| \left(\frac{x_4' - x_1}{y_4' - y_1} \right) (y_{G_2} - y_1) + x_1 - x_{G_2} \right| \geq S, \quad (6)$$

得到 G_2 点的临界坐标值为

$$(x_{G_2}, y_{G_2}) = \left(L \frac{T_{\text{BMP}}/2 + 2T_{\text{BMP}}}{2T_{\text{BMP}} + 4T_{\text{FSP}}}, \frac{N(2S-L)}{2M-L} + \frac{2NL}{2M-L} \frac{T_{\text{BMP}}/2 + 2T_{\text{BMP}}}{2T_{\text{BMP}} + 4T_{\text{FSP}}} \right). \quad (7)$$

(3) 计算 G_3 点的临界坐标值: 重心投影点运动到 G_3 点时, 机器人即将抬起足3, 相应的支撑区域为 $\Delta 12'4'$, 所以 G_3 的稳定裕度由到前向边界 $L_{12'}$ 的距离 $D_{12'}$ 和到后向边界 $L_{14'}$ 的距离 $D_{14'}$ 决定; G_3 的后向边界裕度 $D_{14'}$ 远小于前向边界裕度 $D_{12'}$. 因此, 稳定裕度约束如下:

$$S_{\min} = D_R = D_{14'}(x_{G_3}, y_{G_3}) = \left| \left(\frac{x_4' - x_1}{y_4' - y_1} \right) (y_{G_3} - y_1) + x_1 - x_{G_3} \right| \geq S, \quad (8)$$

得到 G_3 点的临界坐标值为

$$(x_{G_3}, y_{G_3}) = \left(L \frac{3T_{\text{BMP}}/2 + 2T_{\text{BMP}}}{2T_{\text{BMP}} + 4T_{\text{FSP}}}, \frac{2NL}{2M-L} \frac{3T_{\text{BMP}}/2 + 2T_{\text{BMP}}}{2T_{\text{BMP}} + 4T_{\text{FSP}}} - \frac{2N(S+N)}{2M-L} + N \right). \quad (9)$$

(4) 计算 G_4 点的临界坐标值: 重心投影点运动到 G_4 点时, 机器人即将落下足1, 相应的支撑区域为 $\Delta 2'3'4'$, 所以 G_4 的稳定裕度由到前向边界 $L_{2'3'}$ 的距离 $D_{2'3'}$ 和到后向边界 $L_{3'4'}$ 的距离 $D_{3'4'}$ 决定; G_4 的前向边界裕度 $D_{2'3'}$ 远小于后向边界裕度 $D_{3'4'}$. 因此, 稳定裕度约束如下:

$$S_{\min} = D_F = D_{2'3'}(x_{G_4}, y_{G_4}) = \left| \left(\frac{x_3' - x_2'}{y_3' - y_2'} \right) (y_{G_4} - y_2') + x_2' - x_{G_4} \right| \geq S, \quad (10)$$

得到 G_4 点的临界坐标值为

$$(x_{G_4}, y_{G_4}) = \left(L \frac{3T_{\text{BMP}}/2 + 4T_{\text{FSP}}}{2T_{\text{BMP}} + 4T_{\text{FSP}}}, \frac{N}{M} \left(L \frac{T_{\text{BMP}}/2}{2T_{\text{BMP}} + 4T_{\text{FSP}}} - S \right) \right). \quad (11)$$

1.3.2 速度边界条件

为提高匍匐式四足机器人的运动稳定性, 需要保

证其运动速度在前进方向的均匀性和左右方向的连续性, 本节提出的重心轨迹规划方法对机器人重心不同阶段的移动速度提出了边界条件. 由于机器人在前进方向匀速运动, 定义其速度为 V_x , 等于步长除以步态周期时间, 计算结果如式(12)所示:

$$V_x = \frac{L}{2T_{BMP} + 4T_{FSP}}. \quad (12)$$

对于机器人重心在左右方向的来回移动, 其移动速度在一个步态周期的初始时刻、变相时刻和终止时刻应等于0, 即重心投影点 G_0 、 G_2 、 G_3 、 G_5 在 Y 方向的速度为0, 而 G_1 和 G_4 在 Y 方向的速度不受约束.

1.3.3 重心轨迹方程

本节提出了基于四次多项式拟合的重心轨迹规划方法, 其中机器人重心沿 X 轴方向运动, 沿 Y 轴方向按多项式曲线运动. 重心轨迹方程的一般形式如式(13)所示:

$$\begin{cases} f_x(t) = V_x t, \\ f_y(t) = at^4 + bt^3 + ct^2 + dt + e. \end{cases} \quad (13)$$

下面分段计算机器人重心沿 Y 轴运动的轨迹. 以 G_4 到 G_4 为第一阶段, 代入重心在临界点 G_0 、 G_1 、 G_2 的位置边界条件和速度边界条件, 从而解得第一阶段的轨迹方程为

$$\begin{aligned} {}^1f_y(t) = & \frac{y_1t_2^3 + 2y_2t_1^3 - 3y_2t_1^2t_2}{t_1^2t_2^3(t_1 - t_2)^2}t^4 \\ & + \frac{4y_2t_1^2t_2^2 - 2y_1t_2^4 - 2y_2t_1^4}{t_1^2t_2^3(t_1 - t_2)^2}t^3 \\ & + \frac{y_1t_2^4 + 3y_2t_1^4 - 4y_2t_1^3t_2}{t_1^2t_2^2(t_1 - t_2)^2}t^2 \quad t \in [0, t_2]. \end{aligned} \quad (14)$$

类似地, 以 G_2 到 G_3 为第二阶段, 根据重心在临界点 G_2 、 G_3 的位置边界条件和速度边界条件, 解得第二阶段的轨迹方程为

$$\begin{aligned} {}^2f_y(t) = & -\frac{2(y_3 - y_2)}{(t_3 - t_2)^3}(t - t_2)^3 \\ & + \frac{3(y_3 - y_2)}{(t_3 - t_2)^3}(t - t_2)^2 + y_2 \quad t \in [t_2, t_3]. \end{aligned} \quad (15)$$

以 G_3 到 G_5 为第三阶段, 根据重心在临界点 G_3 、 G_4 、 G_5 的位置边界条件和速度边界条件, 结合步态周期的对称性, 解得第三阶段的轨迹方程为

$$\begin{aligned} {}^3f_y(t) = & \frac{y_4t_2^3 + 2y_3t_1^3 - 3y_3t_1^2t_2}{t_1^2t_2^3(t_1 - t_2)^2}(t_5 - t)^4 \\ & + \frac{4y_3t_1^2t_2^2 - 2y_4t_2^4 - 2y_3t_1^4}{t_1^2t_2^3(t_1 - t_2)^2}(t_5 - t)^3 \\ & + \frac{y_4t_2^4 + 3y_3t_1^4 - 4y_3t_1^3t_2}{t_1^2t_2^2(t_1 - t_2)^2}(t_5 - t)^2 \quad t \in [t_3, t_5]. \end{aligned} \quad (16)$$

2 宽度受限狭小空间步态参数计算

匍匐式四足机器人的运动速度由步长和步态周期两个参数决定. 在宽度受限空间内运动时, 由于机器人运动姿态的整体宽度减小, 限制了单腿的工作空间, 必然导致机器人的最大步长减小, 使得运动速度降低. 在宽度受限空间内, 为最大化机器人的运动速度, 本文以受限宽度为变量, 根据约束条件推导步长与受限宽度的函数关系, 计算得到了机器人的最大步长. 推导过程如下:

(1) 根据关节布局, 匍匐式四足机器人运动姿态的宽度边界取决于腿部肘关节的位置, 肘关节的位置取决于髋关节的前后转动角度. 在宽度受限时, 机器人的最佳运动姿态为向前伸展前肢和向后伸展后肢, 同时保持肘关节位置在宽度边界内, 从而获得最大的运动空间. 以机器人右前腿为例, 绘制右前腿不同位置以计算最大步长, 如图5所示. 图5中 A 、 B 、 C 三点分别表示右前腿的髋关节、肘关节和足端点, 红色线段表示宽度边界, AB 、 BC 分别表示右前腿大腿部分和小腿部分的初始位姿, D_x 表示 BC 相对于宽度边界在 X 轴方向的距离, AB_1 表示右前腿大腿部分受宽度边界影响的临界位姿, 对应的髋关节向前转动角度为 θ_1 , AB_2 表示大腿部分绕髋关节向前摆动的极限位置, 对应的髋关节向前

图5 宽度受限空间内机器人最大步长计算
Figure 5 Calculation of the maximum step length of the robot in a width-limited space

转动角度为 θ_{1M} , B_1C_1 表示右前腿小腿部分绕肘关节向内转动某个角度 θ_2 后的对应位置, B_2C_2 表示右前腿相对于位置 B_1C_1 向前摆动时达到最大步长的位置, C_1C_2 表示该位置的最大步长 D_y . 受宽度边界影响, 机器人单腿肘关节在 X 轴方向缩进距离的最小值为 D_x , 可得到髌关节向前转动的角度 θ_1 和转动后肘关节在水平面内的位置 (X_{B_1}, Y_{B_1}) 如式(17)所示:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos\left(\frac{L_1 - D_x}{L_1}\right), \\ (X_{B_1}, Y_{B_1}) = (L_1 - D_x, \sqrt{L_1^2 - X_{B_1}^2}). \end{cases} \quad (17)$$

(2) 由上述分析可知, 在单腿受限宽度为 D_x 时, 机器人的髌关节向前转动角度必须大于等于 θ_1 , 而且肘关节向外转动角度不能大于 θ_1 . 根据以上两个约束, 计算机器人的最大步长. 髌关节向前转动角度的下边界值为 θ_1 , 上边界值为 θ_{1M} , AB_1 和 AB_2 是右前腿大腿部分的边界. B_2 点的坐标如式(18)所示:

$$(X_{B_2}, Y_{B_2}) = (L_1 \cos\theta_{1M}, L_1 \sin\theta_{1M}). \quad (18)$$

机器人的前向运动需要保证足端位置的起点和终点的 X 轴坐标值相同, 即起点与终点的连线与 Y 轴平行. 受此约束, 以临界肘关节位置为圆心、小腿长度为半径, 绘制了两条弧线表示工作空间, 以平行于 Y 轴的直线与两圆弧相交, 如图5中点线与两段圆弧虚线相交于 C_1 、 C_2 . 假设平移直线位置使 C_1C_2 取得最大值为 D_y .

由于机器人肘关节的运动空间限制, 其向内最大转动角度为 θ_{2M} , 将有两种情况: (1) D_y 对应的肘关节角度值 θ_2 小于等于最大角度 θ_{2M} , 此时 D_y 即最大步长; (2) D_y 对应的肘关节角度值 θ_2 大于 θ_{2M} , 此时肘关节角度值只能取 θ_{2M} , 根据此时的数值计算步长 D_{yM} , 其值等于 C_2 、 C_1 点在 Y 轴的坐标值之差. 计算过程如式(19)~(21)所示:

$$\begin{aligned} (X_{C_1}, Y_{C_1}) \\ = (X_{B_1} - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_{2M}), Y_{B_1} + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_{2M})), \end{aligned} \quad (19)$$

$$(X_{C_2}, Y_{C_2}) = \left(X_{C_1}, Y_{B_2} + \sqrt{L_2^2 - (X_{C_2} - X_{B_2})^2} \right), \quad (20)$$

$$\begin{aligned} D_{yM} &= Y_{C_2} - Y_{C_1} \\ &= Y_{B_2} + \sqrt{L_2^2 - (X_{C_2} - X_{B_2})^2} - Y_{B_1} - L_2 \cos(\theta_1 + \theta_{2M}). \end{aligned} \quad (21)$$

对于本文研究的匍匐式四足机器人, 由于关节角度范围限制, 宽度受限空间内的最大步长总是在肘关节角度等于 θ_{2M} 时取得, 最大步长为 D_{yM} .

3 匍匐式四足机器人平台及测试实验

本文采用的匍匐式四足机器人平台是一个12自由度的复杂系统. 该机器人的大腿关节采用了差速齿轮机构, 通过两个直流无刷电机联合驱动大腿关节在冠状面和水平面独立摆动, 增加了机器人大腿关节的极限转矩, 提高了机器人的负载能力. 为保证匍匐式四足机器人的运动稳定性, 本文采用爬行步态规划机器人的运动, 实现了机器人的前向运动和横向运动. 另外, 进行了机器人在宽度受限狭小空间的运动实验, 验证了本文提出的宽度受限狭小空间运动策略的有效性.

3.1 匍匐式四足机器人平台

我们研制的匍匐式四足机器人如图6所示. 机器人的腿部关节采用了大壁虎膝肘对顶的配置方式, 前后腿、左右腿都采用对称结构, 单腿有3个主动关节, 分别为大腿抬腿关节、大腿摆动关节和小腿摆动关节. 机器人腿部足端设计了一个被动球关节, 提供3个被动转动自由度, 球关节下固定连接一个块状脚掌; 同时, 在机器人的每个足端安装有多维力传感器, 用于感知足端与地面间的接触情况, 能提高机器人的爬行稳定性. 综上, 匍匐式四足机器人单腿共有3个主动自由度和3个被动自由度, 整体共有24个自由度, 是一个多支链超冗余的运动机构, 能实现三维空间内的灵活运动. 匍匐式四足机器人的结构参数如表1所示.

在机械结构方面, 机器人采用电机-减速箱-锥齿轮的传动方式, 选用了Faulhaber的直流无刷伺服电机以及配套的减速箱和电机驱动板, 通讯方式为CANopen总线. 机器人的主控CPU是Intel Celeron J1900. 匍匐式四足机器人的控制系统硬件部分包含主控模块、感知系统、驱动系统、电源模块等, 其中机器人的主控制器及驱动器安装在机身内部, 电机、电源模块及无线通讯模块安装在机身背部.

3.2 前向运动和横向运动实验

基于1.1节所规划的匍匐式四足机器人前向运动周期过程, 在水平桌面进行了机器人的前向运动实验, 运动截图如图6(a)所示. 图6(a)中使用横向箭头表示机器人重心的移动方向, 使用弧形箭头标记对应时刻的摆

图6 匍匐式四足机器人前向运动(a)和横向运动(b)
Figure 6 Forward motion (a) and lateral motion (b) of the creeping quadruped robot

表1 匍匐式四足机器人结构参数

Table 1 The structural parameters of the crawling quadruped robot

结构参数	数值
整体自由度	24
单腿自由度	6
整体长宽高	456 mm×402 mm×84 mm
大腿腿长	112.3 mm
小腿腿长	81.5 mm
肩/肘关节高度	56.0 mm
脚掌大小	40 mm×40 mm
总质量	4.5 kg

动腿. 机器人前向运动爬行步态的运动顺序为: 重心向左移动、摆动右后腿、摆动右前腿、重心向右移动、摆动左后腿、摆动左前腿, 重心向左移动归位. 根据机器人的尺寸参数, 重心轨迹规划时稳定裕度最小值 S 取值为20 mm. 机器人的每个步态周期为3 s, 四条腿的足端摆动时间都是0.5 s, 四足支撑状态的机身移动时间共1 s. 在保证工作空间宽裕的情况下, 机器人的向前步

长最大为9 cm, 机器人沿前进方向匀速运动, 运动速度可以达到3 cm/s.

类似地, 本文在水平桌面进行了机器人的横向运动实验, 运动方向向右, 运动截图如图6(b)所示. 图6(b)中使用纵向箭头表示机器人重心的移动方向, 使用弧形箭头标记对应时刻的摆动腿. 区别于前向运动, 机器人右向运动爬行步态的运动顺序为: 重心向前移动、摆动左后腿、摆动右后腿、重心向后移动、摆动左前腿、摆动右前腿, 重心向前移动归位. 与前向运动类似, 机器人的每个步态周期为3 s, 四条腿的足端摆动时间都是0.5 s, 四足支撑状态的机身移动时间共1 s. 在保证工作空间宽裕的情况下, 机器人的向右步长最大为6 cm, 机器人沿右方向匀速运动, 运动速度可以达到2 cm/s.

在匍匐式四足机器人的运动实验中, 通过九轴姿态传感器采集了5个连续步态周期的数据进行分析.

图7(a)给出了机器人前向运动的滚转角、俯仰角变化曲线, 滚转角和俯仰角曲线呈现了周期特性, 变化幅度在 $\pm 1^\circ$ 范围内. 图7(b)给出了机器人横向运动的滚

转角、俯仰角变化曲线, 与前向运动的姿态角曲线类似, 滚转角和俯仰角的变化幅度也在 $\pm 1^\circ$ 范围内. 以上结果证明了机器人机身在水平面前向运动或横向运动的稳定性.

3.3 宽度受限狭小空间运动实验

根据第2节规划的宽度受限狭小空间内机器人的运动步态参数, 本文搭建了宽度受限通道, 进行了机器人实验. 在运动过程中, 需要考虑机器人的运动稳定性, 根据纵向稳定裕度方法规划运动中的机器人重心轨迹, 使机器人满足一定的稳定裕度, 保证机器人运动过程的稳定性. 经实验测试, 匍匐式四足机器人能通过的最小通道宽度为32 cm, 而机器人标准姿态的整体宽度为40 cm, 即机器人能将宽度缩小8 cm并稳定通过宽度受

限通道. 匍匐式四足机器人的运动截图如图8(a)所示. 在宽度受限通道内, 机器人的前腿向前收拢, 后腿向后收拢, 机器人的抬腿幅度较小, 在图8(a)中显示不明显. 由于关节运动范围受到极大限制, 机器人运动速度随通道宽度的减小而下降, 当通道宽度为32 cm时, 一个步态周期为3 s, 机器人的运动速度达到0.5 cm/s. 图8(b)给出了机器人在宽度受限狭小空间内5个步态周期的滚转角、俯仰角变化曲线, 均有周期特性, 滚转角变化幅度在 $\pm 2^\circ$ 范围内, 俯仰角变化幅度在 $\pm 1^\circ$ 范围内. 由姿态角数据可知, 机器人在宽度受限通道内运动相比于正常前向运动的滚转角变化幅度较大, 这是因为机器人的足端围成的支撑多边形宽度减小, 导致机器人重心稳定裕度降低, 使得机器人在宽度受限通道内的运动稳定性略有降低.

图7 匍匐式四足机器人的姿态角. (a) 前向运动姿态角; (b) 横向运动姿态角

Figure 7 The posture angle of the crawling quadruped robot. (a) Forward motion posture angle; (b) lateral motion posture angle

图8 匍匐式四足机器人在宽度受限空间内的运动实验(a)及其姿态角(b)

Figure 8 The motion experiment of a crawling quadruped robot in the width-limited space (a) and its posture angles (b)

4 结论

本文基于一款匍匐式四足机器人平台, 首先研究了机器人的稳定运动控制, 结合纵向稳定裕度和静态稳定区域方法的优势, 提出了一种重心轨迹规划方法. 该方法通过简化稳定裕度约束条件以及缩小支撑区域范围, 提高了轨迹规划效率, 可用于指导四足机器人稳定控制. 然后, 提出了匍匐式四足机器人在宽度受限狭小空间内的运动策略, 机器人的四肢在前后方向伸展、在左右方向收拢以适应宽度受限环境. 根据宽度

约束条件, 详细推导机器人收拢姿态下身体宽度与运动步长的数学关系, 给出了不同宽度条件下步长计算的公式. 最后, 在匍匐四足机器人平台上进行测试实验, 实现了机器人前向和横向的稳定运动, 前向速度可以达到3 cm/s, 横向速度可以达到2 cm/s; 实现了机器人在宽度受限狭小空间内的稳定运动, 可通过的最小通道宽度为32 cm, 运动速度为0.5 cm/s; 验证了匍匐式四足机器人在宽度受限狭小空间的运动策略的可行性, 可为四足机器人在狭小空间内的运动控制研究提供一种思路.

参考文献

- 1 Xiao X, Murphy R. A review on snake robot testbeds in granular and restricted maneuverability spaces. *Robot Auton Syst*, 2018, 110: 160–172
- 2 Negri S P, Basile V, Valori M, et al. A modular mobile robotic architecture for defects detection and repair in narrow tunnels of CFRP aeronautic components. *Robot Cim-Int Manuf*, 2019, 55: 109–128
- 3 Buchanan R, Bandyopadhyay T, Bjelonic M, et al. Walking posture adaptation for legged robot navigation in confined spaces. *IEEE Robot Autom Lett*, 2019, 4: 2148–2155
- 4 Kitano S, Hirose S, Endo G, et al. Development of lightweight sprawling-type quadruped robot TITAN-XIII and its dynamic walking. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013. 6025–6030
- 5 Garcia E, Gonzalez de Santos P, Matia F. Dealing with internal and external perturbations on walking robots. *Auton Robot*, 2008, 24: 213–227
- 6 Horvat T, Karakasliotis K, Melo K, et al. Inverse kinematics and reflex based controller for body-limb coordination of a salamander-like robot walking on uneven terrain. In: 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015. 195–201
- 7 Horvat T, Melo K, Ijspeert A J. Model predictive control based framework for com control of a quadruped robot. In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017. 3372–3378
- 8 Zhang X, Fang Y, Zhu W, et al. A novel locomotion controller based on coordination between leg and spine for a quadruped salamander-like robot. In: 2019 12th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo), 2019. 68–73
- 9 Bandyopadhyay T, Steindl R, Talbot F, et al. Magneto: A versatile multi-limbed inspection robot. In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018. 2253–2260
- 10 Zhen W K, Kang X, Zhang X S, et al. Gait planning of a novel metamorphic quadruped robot (in Chinese). *J Mech Eng*, 2016, 52: 26–33 [甄伟鲲, 康熙, 张新生, 等. 一种新型四足变胞爬行机器人的步态规划研究. 机械工程学报, 2016, 52: 26–33]
- 11 Dai Z D, Peng F J. Research progress of space robots and key technologies of gecko-inspired robots (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 3114–3124 [戴振东, 彭福军. 空间机器人的研究与仿壁虎机器人关键技术. 科学通报, 2015, 60: 3114–3124]
- 12 Wang Z Y, Lu X B, Liu Q, et al. Adhesion performance test and trajectory optimization for gecko-inspired footpad under simulated micro-gravity environment (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 2149–2156 [汪中原, 陆晓波, 刘琦, 等. 仿壁虎机器人脚掌的黏附性能研究及模拟微重力下黏脱附轨迹设计. 科学通报, 2017, 62: 2149–2156]
- 13 McGhee R B, Frank A A. On the stability properties of quadruped creeping gaits. *Math Biosci*, 1968, 3: 331–351
- 14 Messuri D, Klein C. Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion. *IEEE J Robot Autom*, 1985, 1: 132–141
- 15 Song S M, Waldron K J. An analytical approach for gait study and its applications on wave gaits. *Int J Robot Res*, 1987, 6: 60–71
- 16 Hirose S. A study of design and control of a quadruped walking vehicle. *Int J Robot Res*, 1984, 3: 113–133
- 17 Wang X J, Li P G, Chen X D, et al. Study on joint position and stability of four-legged walking robot (in Chinese). *China Mech Eng*, 2005, (17): 1561–1566 [王新杰, 李培根, 陈学东, 等. 四足步行机器人关节位姿和稳定性研究. 中国机械工程, 2005, (17): 1561–1566]
- 18 Zhang S S, Rong X W, Li Y B, et al. Static gait planning methods for four-legged robots in rugged terrain environments (in Chinese). *J Jilin Univ (Eng Technol Ed)*, 2016, 46: 1287–1296 [张帅帅, 荣学文, 李贻斌, 等. 崎岖地形环境下四足机器人的静步态规划方法. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46: 1287–1296]

Summary for “狭小空间匍匐式四足机器人的稳定行走控制及运动策略”

Stability motion control and locomotion strategy of a crawling quadruped robot in the narrow space

Yaohui Han[†], Jinjun Duan[†], Zhouyi Wang, Bingcheng Wang, Ce Guo & Zhendong Dai^{*}

Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

[†] Equally contributed to this work

^{*} Corresponding author, E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

Work in the small space is a typical scene that people cannot enter. The interiors or access channels of many existing types of equipment are often designed according to the feasibility of human entry, which increases the design difficulty and often affects product performance. At the same time, internal operations are difficult and costly in the small space. The use of robots instead of labor can significantly improve efficiency and reduce costs, and equipment design, use and maintenance are of great significance. In order to cope with the complex environment that requires movement in a small space, research and development of a variety of robots have been carried out. Inspired by the gecko's ability to climb smoothly in a narrow space, this paper invented a gecko-like creeping motion mechanism and sticking to the sole of the foot. The motion stability of this kind of robot in a small space, especially the space with a limited width has become the core issue of robot motion planning. Based on a crawling quadruped robot platform, this paper first studies the stable motion control of the robot. Since the longitudinal stability margin (LSM) method only needs to consider the forward boundary and the backward boundary when judging the stability, the statically stable area (SSA) method simplifies the selection of the robot's support area. Using the advantages of the LSM method and the SSA method, a static stability algorithm and a center of gravity trajectory planning method for a crawling quadruped robot are proposed. This method improves the efficiency of trajectory planning by simplifying the stability margin constraint conditions and reducing the scope of the support region. It can be used for stable control of quadruped robots. Then, a motion strategy of a crawling quadruped robot in a narrow space with limited width is proposed. The limbs of the robot are extended in the front and rear directions and folded in the left and right directions to adapt to the limited width environment. According to the width constraint, the mathematical relationship between the body width and the movement step length in the retracted posture of the robot is deduced in detail, and the formula for calculating the step length under different width conditions is given. Finally, the test experiment is carried out on the crawling quadruped robot platform, and the forward and lateral stable movements of the robot are realized. The forward speed can reach 3 cm/s and the lateral speed can reach 2 cm/s; the robot is realized in a narrow space with limited width. The minimum channel width that can be passed is 32 cm (The overall width of the robot in the standard posture is 40 cm, and the width of the robot is reduced by 8 cm), and the movement speed is 0.5 cm/s; during the movement, the roll angle changes within $\pm 2^\circ$, and the pitch angle changes within $\pm 1^\circ$; the creeping angle is verified. The feasibility of the motion strategy of a quadruped robot in a narrow space with limited width provides a method for the research on the motion control of a quadruped robot in a narrow space.

width-limited narrow space, stability control, motion strategy, longitudinal stability margin, static stable area

doi: [10.1360/TB-2021-0149](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0149)