DOI: 10.3901/JME.2021.01.100

单腿失效的六足机器人失稳调整与容错步态设计^{*}

尤 波¹ 李鲲鹏¹ 李佳钰¹ 刘大权²

(1. 哈尔滨理工大学机电控制及自动化技术研究所 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨理工大学切削加工及制造智能化技术教育部重点实验室 哈尔滨 150080)

摘要: 对六足机器人在运动过程中, 支撑腿发生单腿失效时的稳定性进行了分析, 根据零力矩点法(ZMP)与力-角稳定锥法(FASM)结合的失稳判定流程给出一种基于实时运动平面解析求解方法的失稳倾翻调整策略; 在 CPG 控制器分层建模的基础上设计一种自适应容错步态生成器, 根据腿部负载的变化延长或缩短支撑相并且能够产生多种步态。采用 ADAMS-Matlab 联合仿真系统对六足机器人单腿失效倾翻调整策略和容错步态进行仿真, 仿真结果表明: 机器人发生失稳倾翻时能够在 1 s 内完成调整; 自适应容错步态下的稳定裕度在 0.6~1.6 m 范围内且翻滚角及俯仰角的波动范围均在 $-1^{\circ}\sim 1^{\circ}$ 之间。验证了失稳倾翻调整策略和自适应容错步态应用在单腿失效六足机器人上的可行性和有效性。

关键词: 六足机器人; 单腿失效; 失稳倾翻调整; 自适应容错步态

中图分类号: TP242

Instability Adjustment and Fault-tolerant Gait Design for Hexapod Robot Single Leg Failure

YOU Bo¹ LI Kunpeng¹ LI Jiayu¹ LIU Daquan²

(1. Research Institute of Mechatronic Control and Automation Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080;

2. School of Automation, Institute of Mechanical and Electrical Control and Automation Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

Abstract: The stability of the hexapod robot when the single leg failure occurs in the supporting leg during the movement process is analyzed. According to the instability determination method of ZMP and FASM, an instability tilting adjustment strategy based on real-time motion plane analytic solution method is presented. An adaptive fault-tolerant gait generator is designed based on the hierarchical modeling of CPG controller, which extends or shortens the support phase according to the change of leg load and can produce a variety of gait. The ADAMS-Matlab joint simulation system is used to simulate the one-leg failure tipping adjustment strategy and fault-tolerant gait of the hexapod robot. The experimental results show that the robot can complete the adjustment within one second when the robot fails to tip over. The stability margin in adaptive fault-tolerant gait is in the range of 0.6-1.6 m and the range of rollover and pitch angle is between $-1^{\circ}\sim 1^{\circ}$. The feasibility and effectiveness of the instability rollover adjustment strategy and adaptive fault-tolerant gait application on the one-legged hexapod robot are verified.

Key words: hexapod robot; single leg failure; instability tilt adjustment; adaptive fault tolerant gait

0 前言

与轮式机器人相比, 足式机器人在非结构环境

中具有更多优势, 包括对不规则地形的适应性和灵活性, 因此足式机器人在一些特殊环境下具有更广泛的应用前景。然而, 当机器人在危险或灾难环境中运动时, 容易发生腿部失效故障并且无法及时进行人工修复。如果机器人可以根据当前情况找到能够让故障机器人继续运动的步态, 则认为它对于给定的故障是容错的, 这将会提高足式机器人在未知

^{*} 哈尔滨市应用技术与开发项目计划资助项目(优秀学科带头人 A 类, 2015RAXXJ007)。20191023 收到初稿, 20200416 收到修改稿

环境中的适用性。

目前关于足式机器人的容错研究重点是步态规划和执行。YANG 等^[1-4]提出了三角容错步态, 螃蟹容错步态和转弯容错步态以及在崎岖地形上的容错步态。在这些步态周期中, 故障腿用于支撑机体。ASIF 等^[5-7]提出了一种基于 FDD 的(故障检测与诊断)能够产生具有关节或传感器故障的自适应步行模式的步态。LEE 等^[8-9]描述了一种三足步行步态, 即行走步态和摆动步态, 这是在四足机器人 TITAN VIII 中提出的最小能量步态规划和主动减震方法。DING 等具体描述了六足机器人一条腿失效和两条腿失效的几种容错步态, 并在 NOROS 上进行了仿真和试验验证^[10-14]。WANG 等^[15]讨论了径向对称机器人 POLIMI 失去一条或两条腿的步态, 保证机器人始终有三条支撑腿, 重心投影(COG)始终保持在支撑三角形内。GUSTAVO^[16]提出了一种适应性步态生成算法这种步态生成算法针对多种失效腿的组合方式, 通过计算支撑腿和摆动腿的运动轨迹, 能够得到任意期望方向的稳定直线运动, 并且能够保证最大行走稳定性。杜慧等^[17]利用身体姿态来补偿故障的角度规划容错态, 在此之前需要对故障后机构的剩余运动能力和工作空间, 尤其是姿态空间进行分析。

以上研究多数集中于确定机器人故障后的步态规划, 而对机器人处于正常运动下某个支撑腿出现单腿失效故障引起瞬时失稳的研究相对较少。当瞬时失稳情况发生时机器人可能发生倾覆, 这也限制了机器人在未知危险环境下以上容错步态的适用性。本文针对六足机器人运动过程中支撑腿发生单腿失效时的稳定性进行了分析, 运用 ZMP 与 FASM 结合的失稳判定法和基于实时运动平面的调整腿可达空间的解析求解方法给出失稳倾翻调整策略。通过对 CPG 控制器的分层建模设计一种自适应容错步态生成器, 该方法根据当前机器人情况, 根据余下可用腿生成新的步态。最后, 对上述的单腿失效六足机器人进行建模, 并在此模型上进行仿真试验, 通过稳定裕度、俯仰角、力和力矩等参数的对比试验, 验证了失稳倾翻调整策略和自适应容错步态的有效性。

1 单腿失效的六足机器人的失稳分析与失稳判定

1.1 失稳分析

本文研究的单腿失效的六足机器人模型结构图及其腿部构型图分别如图 1 所示。机器人在三角步态运动下, 由单腿失效引起六足机器人运动失稳倾

翻分为角点失稳倾翻和边线失稳倾翻两种类型^[18]。角点倾翻失稳的特点为机体绕唯一的着地足端倾翻, 但是此种极端情形在实际情况中几乎不会出现。边线失稳倾翻包括内边线失稳倾翻和外边线失稳倾翻, 其中内边线失稳倾翻的特点是机体绕着行进方向两侧支撑足的连线发生失稳倾翻, 外边线失稳倾翻特点是机体绕着同侧支撑足的连线失稳倾翻。当六足机器人以三角步态运动时, 不同支撑足出现单腿失效后的失稳倾翻情况不同, 分别如图 2 中 a_{13} 、 a_{35} 和 a_{15} 所示。其中 a_{13} 为外边线失稳, a_{35} 、 a_{15} 为内边线失稳。

图 1 六足机器人机构简图

图 2 单腿失效的六足机器人失稳倾翻边线

六足机器人在运动过程中受到重力、摩擦力、惯性力等影响, 当机器人单腿失效时, 多种力的作用影响着机器人的运动稳定性。六足机器人在运动过程中的受力情况, 可以等效为图 3^[19]。

图 3 三角步态下六足机器人等效受力

为保持机器人运动时的稳定性, 则有力平衡公式

$$\sum F = F_G + \sum_{i=1}^n F_{ri} - F_I \quad (1)$$

式中, F_G 为机体实时重心位置的重力; F_{ri} 为着地脚与地面接触产生的接触力; F_I 为机器人的等效惯

性力; n 为当前状态下机器人支撑腿的数目。

在运动过程中, 机器人重力方向始终垂直于地面, 但是重心位置的实时变化会对机器人运动产生很大的影响, 当机器人某个支撑腿发生失效情况时, 会导致失效腿的受力过大, 发生足端打滑或绕着失稳倾翻边线转动失稳。所以, 为了防止机器人足端不产生打滑, 需要满足下述摩擦力约束条件

$$\begin{cases} \sqrt{F_{rx}^2 + F_{ry}^2} \leq \mu F_z \\ F_{rz} \geq F_{const} \end{cases} \quad (2)$$

式中, μ 为摩擦因数; F_{const} 是根据机器人自身特性及地形条件决定的一个力常数。防止机器人绕着失稳倾翻边线转动失稳, 则需要机器人满足式(3)保持力矩平衡

$$\sum M = M_G + \sum_{i=1}^n M_{ri} - M_I = 0 \quad (3)$$

式中, M_G 、 M_{ri} 、 M_I 分别表示机身实时重心处的重力、着地足受到的地面支撑力以及等效惯性力所产生的力矩。

1.2 基于零力矩点法(ZMP)与力-角稳定锥法(FASM)结合的失稳判定法

针对六足机器人在运动时出现单腿失效产生失稳倾翻的特殊性, 制定了 ZMP 与 FASM 相结合的稳定性判定方法。其中单腿失效情况包括两种情况: ① 失效腿失去支撑能力; ② 失效腿仍可以支撑。由零力矩点法(ZMP)定义特点可知, 当机器人落足点少于 3 时, 无法构成支撑多边形, 其状态对应的稳定裕度无法计算, 所以 ZMP 对失效腿失去支撑能力的情况无法有效判定失稳倾翻的情况。力-角稳定锥判定法(FASM)是一种动态稳定性判定方法, 通过充分考虑机器人运动结构特点并且综合考虑惯性力、外界扰动等多种因素, 可以对失稳倾翻进行有效判定, 但是此方法计算比较复杂。本文将上述两种方法的优缺点进行互补作为机器人单腿失效倾翻失稳的判据。机器人在运动过程中某条支撑腿发生单腿失效时, 在 ZMP 稳定裕度阈值范围内, 用 ZMP 法进行判定; 当超出稳定裕度阈值或 ZMP 法判定失效时, 调用 FASM 方法进行判定, 从而实现机器人倾翻稳定性的实时判定。

设 ZMP 点的坐标为 (x_{zmp}, y_{zmp}) , f_i 为支撑腿在竖直方向上的足力分量, (x_i, y_i) ($i=1,2,3$) 为三条支撑腿的足端坐标, 根据零力矩点(即 ZMP 点)的定义得到六足机器人三角步态下的 ZMP 点坐标为

$$\begin{cases} x_{zmp} = \frac{x_1 f_1 + x_2 f_2 + x_3 f_3}{f_1 + f_2 + f_3} \\ y_{zmp} = \frac{y_1 f_1 + y_2 f_2 + y_3 f_3}{f_1 + f_2 + f_3} \end{cases} \quad (4)$$

此时的 ZMP 点到支撑多边形的最小距离为当前机器人的 ZMP 稳定裕度。

FASM 法的基础是机器人稳定锥的实时构建, 通过机器人的实时重心作为稳定锥的顶点, 支撑腿的足端位置依次连接构成的支撑多边形作为稳定锥的底面。六足机器人初始状态的稳定锥如图 4 所示。

图 4 六足机器人初始状态稳定锥

设单腿失效六足机器人每部分的质心均在其几何中心上, 单腿失效六足机器人的质心分布如图 5 所示。机器人在运动过程中, 机器人足端位置可由正运动学算法实时计算得到; 机器人实时重心可由式(5)求得

图 5 六足机器人各部件质心分布示意图

$${}^c P_{COG} = \begin{bmatrix} x_{COG} \\ y_{COG} \\ z_{COG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_b \cdot m_b + \sum_{i=1}^6 (x_{Di} \cdot m_1 + x_{Ei} \cdot m_2 + x_{Fi} \cdot m_3 + x_{Ai} \cdot m_4)}{m_b + 6(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)} \\ \frac{y_b \cdot m_b + \sum_{i=1}^6 (y_{Di} \cdot m_1 + y_{Ei} \cdot m_2 + y_{Fi} \cdot m_3 + y_{Ai} \cdot m_4)}{m_b + 6(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)} \\ \frac{z_b \cdot m_b + \sum_{i=1}^6 (z_{Di} \cdot m_1 + z_{Ei} \cdot m_2 + z_{Fi} \cdot m_3 + z_{Ai} \cdot m_4)}{m_b + 6(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, m_b 、 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 分别为机体质量、基节质量、股节质量、胫节质量、足端质量;

$P_{Di}(x_{Di}, y_{Di}, z_{Di})$ 、 $P_{Ei}(x_{Ei}, y_{Ei}, z_{Ei})$ 、 $P_{Fi}(x_{Fi}, y_{Fi}, z_{Fi})$ 、 $P_{Ai}(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai})$ 分别为第 i 条腿上基节、股节、胫节、足端的质心位置, ${}^cP_{COG}(x_{COG}, y_{COG}, z_{COG})$ 为实时重心位置, (x_i, y_i, z_i) 为对应的位置坐标。

最小倾翻角 $\min(\theta_i, \alpha_{ij})$ 可由式(6)求得

$$\theta_i = \begin{cases} \arccos(P_i \cdot F) & (F_{Sij} \cdot S_{ij})\hat{a}_{ij} > 0 \text{ 且 } (F_{Ski} \cdot S_{ij})\hat{a}_{ij} > 0 \\ -\arccos(P_i \cdot F) & (F_{Sij} \cdot S_{ij})\hat{a}_{ij} \leq 0 \text{ 或 } (F_{Ski} \cdot S_{ij})\hat{a}_{ij} \leq 0 \end{cases}$$

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \arccos(S_{ij} \cdot F_{sij}) & (S_{ij} \cdot F_{sij})\hat{a}_{ij} > 0 \\ -\arccos(S_{ij} \cdot F_{sij}) & (S_{ij} \cdot F_{sij})\hat{a}_{ij} \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, P_i 为实时重心到落足点的矢量; F_{sij} 为力的投影分量; S_{ij} 实时重心到稳定锥底面边线 a_{ij} 的垂线; $\hat{a}_{ij} = a_{ij} / \|a_{ij}\|$; j, k 分别为与 i 着地足逆时针方向上相邻的前后着地足且 i, j, k 的取值为 $(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6)$ 。

2 失稳倾翻调整策略

六足机器人在运动过程中进行步态切换时易发生支撑腿单腿失效导致机器人失稳倾翻, 所以机器人在有限时间内快速有效的进行调整是机器人安全的重要保障。在六足机器人失稳倾翻时, 需要立即得到调整腿的可到达空间, 由于常用的解析法、图解法和数值法都有局限性, 所以本文引用基于实时运动平面的调整腿可达空间的解析求解方法^[19]。根据边线失稳倾翻特点调整腿的可达空间需要满足两个条件: ① 支撑平面约束式; ② 机体倾翻运动的影响。设 H_i 点的位置为调整腿在支撑面上所能达到的外围边界, 则 H_i 点的位置满足约束方程组

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{A_i H_i} \times \mathbf{V} = \mathbf{0} \\ \mathbf{a}_{iH_i} \cdot \mathbf{V} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{V}_{A_i H_i}$ 为调整腿足端位于可达空间的外边界点 A_i 与点 H_i 的连线; $\mathbf{V}_A$ 为机器人有效支撑平面的单位法矢量; 矢量 $\mathbf{a}_{iH_i}$ 为最终位于支撑平面上得调整腿足端位置 H_i 与倾翻支撑腿足端 i 的连线; 设 H_i 点的位置坐标为 ${}^cP_{H_i} = [x_{H_i}, y_{H_i}, z_{H_i}]^T$, 则约束方程组解得

$$\begin{cases} x_{H_i} = x_{A_i} - x_{VA}(x_{VA}(x_{A_i} - x_i) + y_{VA}(y_{A_i} - y_i) + z_{VA}(z_{A_i} - z_i)) \\ y_{H_i} = y_{A_i} - y_{VA}(x_{VA}(x_{A_i} - x_i) + y_{VA}(y_{A_i} - y_i) + z_{VA}(z_{A_i} - z_i)) \\ z_{H_i} = z_{A_i} - z_{VA}(x_{VA}(x_{A_i} - x_i) + y_{VA}(y_{A_i} - y_i) + z_{VA}(z_{A_i} - z_i)) \end{cases} \quad (8)$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 为倾翻边线端点 A_i 的位置坐标, $(x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i})$ 为调整腿伸出后 A_i 点的位置坐标。

由运动学方程得到

$$\begin{bmatrix} x_{A_i} \\ y_{A_i} \\ z_{A_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{B_i} + L_{\max} c_1 \\ y_{B_i} + L_{\max} s_1 \\ z_{B_i} + H_{\max} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} L_{\max} = L_1 + L_2 \cos \theta_{2\min} + L_3 \cos(\theta_{2\min} + \theta_{3\min}) \\ H_{\max} = -L_2 \sin \theta_{2\min} - L_3 \sin(\theta_{2\min} + \theta_{3\min}) \end{cases}$$

$\theta_{2\min}$ 为髋关节转角范围中接近于零的最小值; $\theta_{3\min}$ 为膝关节转角范围中接近于零的最小值。所以由点 H_i 的位置与三个关节的角度关系, 可以在机器人发生边线失稳倾翻时, 迅速得到调整腿落脚点可达范围的解析解。

控制系统在确定调整腿及其足端位置的可达范围后, 需要从可达范围内选出具体的某一点作为落足点。由于调整腿足端落地后提供的反倾翻力矩需要抵消倾翻合力矩, 所以找到调整腿可达空间中力臂最大的点作为落足点, 减小调整腿所受到的足力, 以此作为落足点的选择策略。根据落脚点选择策略得到调整腿的基关节目标转角

$$\theta_{i1end} = 2 \arctan \frac{b \pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a - c} \quad (9)$$

式中, $a = x_{j-i} L_{\max}$, $b = y_{j-i} L_{\max}$, $c = z_{j-i} H_{\max}$ 。髋关节和膝关节的调整目标角度根据各自运动范围选择接近零的值, 得到调整腿的关节目标角度为

$$q_{iend} = \begin{bmatrix} \theta_{i1end} \\ \theta_{i2end} \\ \theta_{i3end} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \arctan \frac{b \pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a - c} \\ \theta_{2\min} \\ \theta_{3\min} \end{bmatrix} \quad (10)$$

在确定调整腿的目标足端位置及目标关节角度后, 调整腿需要在驱动关节速度上限内及有限的时间内调整至目标位置, 由此引起的关节角、关节角速度及关节角加速度的变化会对驱动器的性能产生影响, 所以需要对调整过程进行柔顺处理。本文采用五次曲线插值法调整关节角加速度的变化, 保证整个过程中关节角加速度的连续性。设调整过程中的跟关节的角度、角速度及角加速度的变化曲线为

$$\begin{cases} \theta_{i1}(t) = a \cdot t^5 + b \cdot t^4 + c \cdot t^3 + d \cdot t^2 + e \cdot t + f \\ \omega_{i1}(t) = 5a \cdot t^4 + 4b \cdot t^3 + 3c \cdot t^2 + 2d \cdot t + e \\ \alpha_{i1}(t) = 20a \cdot t^3 + 12b \cdot t^2 + 6c \cdot t + 2d \end{cases} \quad (11)$$

发生失稳倾翻时, 调整腿的跟关节初始状态角度到关节目标角度如式(12)所示

$$\begin{cases} \theta_{i1}(0) = \theta_{i1start} \\ \omega_{i1}(0) = \omega_{i1start} \\ \alpha_{i1}(0) = \alpha_{i1start} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \theta_{i1}(t_0) = \theta_{i1end} \\ \omega_{i1}(t_0) = 0 \\ \alpha_{i1}(t_0) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

把式(12)代入式(11)中, 得到参数 $\alpha \sim f$ 的值

$$\begin{cases} a = [6(\theta_{t1end} - \theta_{t1start}) - 3\omega_{t1start}t_0 - 0.5\alpha_{t1start}t_0^2]/t_0^5 \\ b = [-15(\theta_{t1end} - \theta_{t1start}) + 8\omega_{t1start}t_0 + 1.5\alpha_{t1start}t_0^2]/t_0^4 \\ c = [10(\theta_{t1end} - \theta_{t1start}) - 6\omega_{t1start}t_0 - 1.5\alpha_{t1start}t_0^2]/t_0^3 \\ d = 0.5\alpha_{t1start} \\ e = \omega_{t1start} \\ f = \theta_{t1start} \end{cases} \quad (13)$$

分别用五次曲线插值方式、三次曲线插值方式、一次曲线插值方式对角加速度、角速度、角度进行柔顺处理的变化曲线对比图分别如图 6~8 所示。

图 6 不同插值方式下的角加速度变化曲线

图 7 不同插值方式下的角速度变化曲线

图 8 不同插值方式下的角度变化曲线

调整腿着地后提供的反力矩抵消了倾翻力矩, 与其他支撑腿共同作用使单腿失效的六足机器人恢复其静态稳定性, 此时机体处于倾斜状态, 为了给

机器人后续的运动提供条件, 则需要对倾斜的机体进行调整, 使机体调整到容错步态的初始位姿。首先要把所有腾空腿足端按照有效支撑平面的法向量向支撑平面运动直至着地。设当前腾空腿的足端位置坐标为 ${}^cP_{f0}$, 足端目标位置坐标为 ${}^cP_{f1}$, 足端位置增量为 $\Delta {}^cP_f$ 。

设全部腾空腿落地后的姿态角 $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$, 失稳倾翻初始时的机体姿态角为 $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$, 机体坐标系 $\sum C$ 在世界坐标系 $\sum O$ 中的角度旋转变化为: $(\alpha_0 - \alpha_1, \beta_0 - \beta_1, \gamma_0 - \gamma_1)$; 变化矩阵为: ${}^c_C R = \text{Rot}(z, \gamma_0 - \gamma_1) \text{Rot}(y, \Delta \beta_0 - \beta_1) \text{Rot}(x, \alpha_0 - \alpha_1)$, 则机体姿态调整时各足端的目标位置为

$${}^cP_{Ai} = {}^c_C R \cdot {}^cP_{Ai} \quad i=1, 2, \dots, 6$$

3 基于 CPG 的自适应容错步态生成器

单腿失效的六足机器人的步态运动仍属于节律运动, 本文设计一种基于中央模式发生器(CPG)的多肢体协调自适应容错步态生成器, 实现单腿失效机器人的步态运动。这种方法不仅具有常规 CPG 的功能并且可以根据机器人当前情况使用剩余可用肢体自适应地生成新的步态。本文将 CPG 的结构分为两层, 包括节律发生器(RG)和模式形成(PF)^[20]。RG 生成基本的步态节律, PF 根据运动信息形成实时运动命令的模式, 其控制系统模型如图 9 所示。

图 9 控制系统模型

其特定运动模式的产生和生成在信息处理系统中独立完成, CPG 根据机器人的当前状态和传感器

的反馈信息, 改变 RG 中步态节律的相位, 从而实现节律重置。此方法已经应用到两足和四足机器人的步态模式^[21-22], 六足机器人具有更多的落足点, 即使发生单腿失效也可以保持其行走的稳定性。控制系统由步态模式控制器(图 10)和腿运动控制器(图 11)组成。

图 10 步态模式控制器

图 11 腿部运动控制器

图 11 显示了腿部运动控制器给出的基轨迹。其中 AEP 和 PEP 分别表示为 $\eta_A^{(i)}$ 和 $\eta_P^{(i)}$ 。当足端在落足点(AEP)时, 机器人从摆动阶段切换到支撑阶段; 当足端离开点(PEP)时, 机器人从支撑阶段切换到摆动阶段。式(14)将轨迹表示为振荡器的相位函数

$$\begin{cases} z^{(i)} = \exp(j\phi^{(i)}) \\ \phi^{(i)} = \phi_A \\ \phi^{(i)} = \phi_P \\ \eta_{Sw}^{(i)} = \eta_{Sw}^{(i)}(\phi^{(i)}) \\ \eta_{Sp}^{(i)} = \eta_{Sp}^{(i)}(\phi^{(i)}) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $z^{(i)}$, $j\phi^{(i)}$ 分别为振荡器 i 在腿 j 的状态和相位; ϕ_A , ϕ_P 分别为振荡器 i 在 AEP 和 PEP 的初始基相位; $\eta_{Sw}^{(i)}$, $\eta_{Sp}^{(i)}$ 分别为基相位 $\phi^{(i)}$ 的基轨迹。本文参照 ISHIGURO^[23-24]开发的具有可以产生可激发信号和振荡激励信号的 CPG 模型, 在每个步态模式控制器中响应腿部负荷, 摆动阶段和支撑相之间的转换由式(15)所示

$$\begin{cases} \left. \begin{aligned} f_{GR}^{(i)} > \chi_{TD} \\ \phi^{(i)} > \phi_{Sw \rightarrow Sp} \end{aligned} \right\} \text{(摆动} \rightarrow \text{支撑)} \\ \left. \begin{aligned} f_{GR}^{(i)} < \chi_{LO} \\ \phi^{(i)} > \phi_{Sp \rightarrow Sw} \end{aligned} \right\} \text{(支撑} \rightarrow \text{摆动)} \\ \left. \begin{aligned} \phi^{(i)} = 0 \text{(摆动相)} \\ \phi^{(i)} = \phi_A^i \text{(支撑相)} \end{aligned} \right\} \text{进入摆动阶段重置} \\ \phi^{(i)} = \begin{cases} \omega - \frac{1}{F_{Tri}} f_{GR}^{(i)} \cos \phi^{(i)} \omega & \phi^{(i)} < \phi_P \text{(支撑阶段)} \\ 0 & \phi^{(i)} = \phi_P \\ \omega + K \sum_{j=1}^6 \phi_{ij} & \phi^{(i)} < \phi_A \\ 0 & \phi^{(i)} = \phi_A \end{cases} \\ \phi_{ij} = \begin{cases} (\phi^{(j)} - \phi^{(i)}) - \pi & \text{腿 } j \text{ 处于支撑状态且 } (i+j) \text{ 为奇数} \\ (\phi^{(j)} - \phi^{(i)}) & \text{腿 } j \text{ 处于支撑状态且 } (i+j) \text{ 为偶数} \\ 0 & \text{腿 } j \text{ 处于摆动状态} \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

$f_{GR}^{(i)}$ 为足端力传感器的测量值; χ_{TD} 是摆动相过渡到支撑相力的阈值; χ_{LO} 是支撑相过渡到摆动相力的阈值; $\phi_{Sw \rightarrow Sp}$ 为摆动相到支撑相的相位阈值; $\phi_{Sp \rightarrow Sw}$ 为支撑相到摆动相的相位阈值; ω 为节律运动的角速度; F_{Tri} 为支撑腿受到地面的反作用力; K 为摆动相控制系数; ϕ_{ij} 从振荡器 i 相对于振荡器 j 的相位差; 支撑阶段相位控制器将根据腿的负荷适当延长或缩短支撑时间, 在 CPG 神经网络模型的基础上的摆动阶段加入了关于相位差 ϕ_{ij} 的方程。在支撑阶段, 支撑相位控制器将根据腿部负荷的大小延长或缩短支撑相; 在摆动阶段, 能够在 2 足、4 足和 6 足机器人中产生多种步态, 并且在相邻腿之间都有相互抑制的关系, 这种关系在步态生成中起着重要作用, 因此将其引入到摆动阶段的控制方法中。并且摆动阶段由支撑相的异常状态, 通过相位差方程将支撑相调整到相反相位。根据支撑阶段和摆动阶段的两个方程组, 用负荷能力较大的腿支撑机体, 负荷较小的腿加速从摆动腿到支撑腿的过渡, 通过检测腿部负荷的变化抑制身体位姿对支撑相位控制的干扰, 支撑相控制通过腿部负荷的监测抑制机体位姿的干扰, 摆动相控制能够使其恢复稳定状态。

4 仿真分析

本文采用 ADAMS-Matlab 联合仿真系统对六足机器人单腿失效倾翻调整策略进行验证, 将基于 CPG 的自适应容错步态与 MOSTAFA 给出的常规容错步态^[25]的仿真结果进行对比, 机器人模拟参数

表如表 1 所示。

表 1 机器人模拟参数

参数	数值
重力加速度 $g/(m/s^2)$	9.8
足端与地面摩擦因数 μ	0.85
采样时间/s	6
初始基相位 φ_A	π
初始基相位 φ_P	2π
摆动相到支撑相的相力阈值 χ_{TD}/N	1 500
支撑相到摆动相的相力阈值 χ_{LO}/N	2 750
支撑相到摆动相的相位阈值 $\phi_{sp \rightarrow sw}$	$\frac{5}{3}\pi$
摆动相到支撑相的相位阈值 $\phi_{sw \rightarrow sp}$	$\frac{2}{3}\pi$
支撑腿受到地面的反作用力最大值 F_{Ti}/N	3 000
摆动相控制系数 K	1.0
节律运动角速度 ω	$\frac{\pi}{2}$

六足机器人在三角步态下运动及失稳调整过程的运动仿真过程如图 12 所示。机器人在 0~5.6 s 阶段, 采用三角步态进行节律运动。在 5.7 s 时腿 A_2 、腿 A_4 、腿 A_6 处于支撑状态, 此时机器人的其中一条支撑腿 A_4 出现失效的情况, 机器人绕腿 A_2 与腿 A_6 的连线发生角线失稳倾翻, 倾翻时的状态如图 12 中 5.7 s 所示。失稳倾翻发生后调整腿 A_5 立即进行调整如图 12 中 6.2 s 所示, 在 6.4 s 时调整腿 A_5 落地, 其机体质心状态及落足点的位置如图 12 中 6.4 s 所示。随后机器人腾空腿 A_1 与 A_3 逐渐落地, 机体进行相应的位姿调整, 最终达到如图 12 中 7.0 s 所示的最终机体质心。

图 12 单腿失效六足机器人倾翻失稳调整过程

六足机器人以三角步态运动的情况下, $A_1A_3A_5$ 处于腾空状态且 $A_2A_4A_6$ 处于支撑状态时, A_4 发生单腿失效时, 机器人机体质心处的速度变化如图 13 所示, 在 5.7 s 发生失稳倾翻时, 机体速度发生剧烈变化, y 方向和 z 方向的速度迅速向正方向增加, x 方向的速度迅速向负方向增加, 这是因为机器人向

A_4 方向发生倾翻。在 6.2 s 处调整腿开始运动, 机体速度大幅度减小, 在 6.4 s 处调整腿着地, 机器人速度接近于平稳, 在 6.5 s 以后机体位姿继续调整, 速度再次变化, 最终减小至 0, 机器人处于静态稳定状态。

图 13 机身失稳调整变化曲线

图 14 和图 15 为 A_4 腿失效后机器人的常规容错步态与自适应容错步态仿真图。图 16 为分别在常规容错步态与基于 CPG 自适应容错步态下机体质心在 Y 轴上的位移对比图, 从图中可以看出常规容错步态下的机器人运动方向偏离于机器人正常前进的运动方向, 并且随着时间增加机器人偏离 x 轴的方向越远。而在基于 CPG 自适应容错步态下, 机器人的运动方向随着时间的增加基本处于稳定状态。图 17 为常规容错步态与基于 CPG 自适应容错步态的机体质心的 Z 轴位移对比, 由图可知基于 CPG 自适应容错步态下机体在 Z 轴方向上的位移与常规容错步态下机体在 Z 轴方向上的位移相比虽然有小幅波动, 但是整个运动过程基于 CPG 自适应容错步态下的 Z 轴方向上的位移更加趋于平缓。

图 14 常规容错步态

图 15 基于 CPG 的自适应容错步态

图 16 机体质心在 Y 轴方向的位移

图 17 机体质心在 Z 轴方向的位移

图 18 为自适应容错步态与常规容错步态稳定裕度对比图, 自适应容错步态的稳定裕度在 $0.6 \sim 1.6$ m 范围内且呈现较大幅度的波动, 常规容错步态的稳定裕度在 $0.7 \sim 1.4$ m 范围内且波动幅度较小。

图 19 和图 20 分别为常规容错步态与自适应容错步

图 18 稳定裕度分析

图 19 翻滚角

图 20 俯仰角

态的翻滚角与俯仰角对比图, 常规容错步态的翻滚角范围在 $-2.5^\circ \sim 1.5^\circ$, 俯仰角范围在 $-3.5^\circ \sim 2.5^\circ$; 自适应容错步态的翻滚角范围在 $-1^\circ \sim 1^\circ$, 俯仰角范围在 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 。由图可见自适应容错步态的稳定裕度、翻滚角和俯仰角与常规步态相比波动范围得到很好的改善, 降低了波动范围, 大幅度提升了单腿失效后机器人的稳定性。图 21 和图 22 分别为自适应步态和常规步态规划的足端受力情况, 自适应容错步态下的足端受力峰值均在 1725 N 左右且在最大值 3000 N 范围内, 如表一所示。在常规容错步态情况下足端分别在 12 s 和 60 s 处的瞬时受力分别为 5100 N 和 7500 N, 超出腿部承受的最大值。

图 21 单腿失效六足机器人足端力(自适应步态)

图 22 单腿失效六足机器人足端力(常规容错步态)

图 23 和图 24 分别为自适应容错步态和常规容错的力矩图, 自适应步态下单腿力矩的最大值为 2250 N/m, 常规容错步态下的单腿力矩峰值超过 10000 N/m 远超出额定范围。

图 23 单腿失效六足机器人力矩(自适应步态)

图 24 单腿失效六足机器人力矩(常规容错步态)

5 结论

本文对六足机器人运动过程中支撑腿发生单腿失效时的稳定性判定和失稳调整问题进行了分析, 根据 ZMP 与 FASM 结合的失稳判定法给出一种基于实时运动平面解析求解方法的失稳倾翻调整策略, 并对调整策略进行了仿真, 通过分析机体速度变化, 证明了失稳判定及失稳调整算法的可行性。在 CPG 控制器的分层建模基础上设计一种自适应容错步态生成器, 该方法根据当前机器人情况, 用余下可用腿生成自适应容错步态并对其进行了仿真, 仿真后得到了各个腿的受力以及力矩的变化曲线并与常规容错步态规划的仿真进行对比分析, 结果显示自适应容错步态每条腿的受力和力矩均匀且在单腿最大受力范围内, 常规容错步态规划下单腿受力相对较大, 易造成机器人其他腿受损从而导致更严重的后果, 结果证明了自适应容错步态对单腿失效的六足机器人行走比常规容错步态规划具有更好的稳定性及有效性。

参 考 文 献

- [1] YANG J M, KIM J H. Fault-tolerant locomotion of the hexapod robot[J]. Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on, 1998, 28(1): 109-116.
- [2] YANG J M, KIM J H. A strategy of optimal fault tolerant gait for the hexapodrobot in crab walking[C]// Proceedings of Robotics and Automation, 1998, IEEE: 1695-1700.
- [3] YANG J M, KIM J H. Optimal fault tolerant gait sequence of the hexapod robotwith overlapping reachable areas and crab walking[J]. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, 1999, 29(2): 224-235.
- [4] YANG J M, KIM J H. A fault tolerant gait for a hexapod robot over uneven ter-rain[J]. Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on, 2000, 30(1): 172-180.
- [5] ASIF U. Improving the navigability of a hexapod robot using a fault-tolerant adaptivegait[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9(33): 1-12.
- [6] ASIF U, IQBAL J. Rapid prototyping of a gait generation method using real-time hardware in loop simulation[J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2011, 2(4): 393-411.
- [7] ASIF U, IQBAL J. On the improvement of multi-legged locomotion over difficult terrains using a balance stabilization method[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9(1): 1.
- [8] LEE Y J, HIROSE S. Three-legged walking for fault tolerant loco-motion of a quadruped robot with demining mission[C]// Proceedings of 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, New York: IEEE, 2000: 973-978.
- [9] LEE Y J, HIROSE S. Three-legged walking for fault-tolerant locomotion of dem-ining quadruped robots[J]. Advanced Robotics, 2002, 16(5): 415-426.
- [10] DING X, XU K. Typical 3+ 3 gait motion analysis of a radial symmetrical six-legged robot based on metamorphic theory[C]// Proceedings of Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I, Springer, 2012: 535-550.
- [11] YANG F, DING X, PENG S. Bio-control of a modular design robot—NOROS[C]// Proceedings of Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots II. Springer, 2016: 891-900.
- [12] XU K. Typical gait analysis of a six-legged robot in the context of meta-morphic mechanism theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(4): 771-783.
- [13] WANG Z, DING X, ROVETTA A. Analysis of typical locomotion of a symmetric hexa-pod robot[J]. Robotica, 2010, 28(6): 893-907.
- [14] DING X, WANG Z, ROVETTA A, et al. Climbing and Walking Robots[M]. InTech, 2010.
- [15] WANG Z. Conceptual design of a novel robotics system for planetary explo-ration[C]// Proceedings of Intelligent Control and Automation, 2006: 8962-8965.
- [16] SCHLEYER G, RUSSELL A. Adaptable gait generation for autotomised legged robots[C]// Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), 2010: 1.

- [17] 杜慧. 六足机器人容错性能及容错运动规划[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- DU hui. Fault tolerant property and motion planning of a hexapod robot[D]. Shanghai : Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [18] 田海波, 方宗德, 周勇, 等. 轮腿式机器人倾覆稳定性分析与控制[J]. 机器人, 2009, 31(2): 159-165.
- TIAN Haibo, FANG Zongde, ZHOU Yong, et al. Analysis and control of the collapse stability of wheel-legged robot[J]. Robot, 2009, 31(2): 159-165.
- [19] 刘志江. 崎岖地形下六足机器人的失稳判定与调整[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- LIU zhijiang. Judgment and adjustment of instability for hexapod robot on rough terrain[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [20] RYBAK I A, SHEVTSOVA N A, LAFRENIERE-ROULA M, et al. Modelling spinal circuitry involved in locomotor pattern generation: Insights from deletions during fictive locomotion[J]. J. Physiol., 2006, 577(2): 617-639.
- [21] KATSUYOSHI T, KAZUO T, AHMET O. Adaptive gait pattern control of a quadruped locomotion robot[C]// Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ , International Conference on Intelligent Robots and Systems, Maui, Hawaii, USA, 2001.
- [22] KAZUO T, SHINYA A, KATSUYOSHI T. Locomotion control of a biped robot using nonlinear oscillators[J]. Autonomous Robots, 2005, 19: 219-232.
- [23] DAI O, LEONA M, AKIO I. Listen to Body's message: Quadruped robot that fully exploits physical interaction between legs[C]// 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012.
- [24] KAWATA T, KAMIYAMA K. Fault-tolerant adaptive gait generation for multi-limbed robot[C]// 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016.
- [25] MOSTAFA K, TSAI C S, HER I. Alternative gaits for multiped robots with leg failures to retain maneuverability[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2010, 7(4): 1.

作者简介: 尤波(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为智能机器人与机电控制。
E-mail: youbo@hrbust.edu.cn