

文章编号: 1002-0446(2005)03-0241-06

可重构模块机器人倾翻稳定性研究*

李斌¹, 刘金国^{1, 2}, 谈大龙¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 介绍了一种可重构模块机器人, 它可以通过构形的变化来提高系统的稳定性和抗倾翻能力. 该机器人由 3 个模块组成, 采用履带驱动, 具有直线、三角、并排 3 种对称构形. 在对移动机器人的倾翻因素和倾翻对策等问题进行分析的基础上, 提出稳定锥方法, 用倾翻性能指数对移动机器人的静、动态稳定性进行综合判定. 讨论了变形机器人 3 种对称构形在仰俯、偏转、倾斜等干扰组合作用下的倾翻性能指数和综合稳定性, 并进行了仿真实验和非结构环境实验.

关键词: 可重构模块机器人; 稳定锥; 倾翻性能指数; 对称构形; 非结构环境

中图分类号: TP24 文献标识码: B

Research on the Tipover Stability of a Reconfigurable Modular Robot

LI Bin¹, LIU Jin-guo^{1, 2}, TAN Da-long¹

(1. Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A reconfigurable modular robot is proposed, which can change its configurations to improve its stability and anti-tipover capability. This three-module tracked robot has three kinds of symmetrical configurations, that is, line type, triangle type and row type. Based on analyzing the factors and countermeasures of mobile robot tipover problem, a stability pyramid and the tipover stability index are proposed to determine globally the mobile robot's static and dynamic stability. And the tipover stability index and global stability of the 3 symmetrical configurations of the metamorphic robot under the combined disturbance of pitch, roll and yaw, are discussed. The simulation and experiment in unstructured environment are presented.

Keywords: reconfigurable modular robot; stability pyramid; tipover stability index; symmetrical configuration; unstructured environment

1 引言 (Introduction)

目前, 移动机器人被广泛应用于危险的非结构环境中^[1-5]. 机器人在非结构环境中的运动能力和环境适应能力决定了机器人的作业性能. 在非结构环境中, 大多数情况是坎坷不平的地面和复杂的三维地形, 机器人的运动稳定性, 或者说是抗倾翻能力, 非常重要. 机器人运动过程中的倾翻将导致驱动系统失去牵引而搁浅、系统元件在翻转中的损坏、系统失去控制、系统倾翻后不能复原等一系列问题.

为此, 本文提出了一种链式模块化、自动变形的履带式移动机器人平台, 该模块化变形机器人具有

多种构形, 可以通过构形的变化来提高系统的稳定性.

2 模块变形机器人平台 (Platform of the deformable modular robot)

2.1 机构变形原理

在非结构环境中, 蛇形机构由于具有重心低、接地面积大、整体连续驱动、自由度冗余等特点, 已被证明是拥有广泛用途的机器人模型. 同时, 蛇形机构具有链式、多冗余、重复、模块化的特征, 适应于可重构和变形研究.

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2001 AA422360).

收稿日期: 2004-10-12

本文利用关节偏置的方法提出了一种新的蛇形机构的链接方式,如图 1 所示,相邻的两个模块有 3 种相对位置关系.模块的 pitch 和 yaw 关节分别至于模块的两侧,模块间通过连接臂进行连接,通过模块与连接臂的相互位置变化而实现变形的目的.模块在连接时,相邻的模块在不存在物理干涉的情况下能够组成直线形,而且模块间经由偏转关节和绕转关节的运动还可以呈现其它的工作构形.这种链接方式所具有的特点是不论有多少模块,总能够通过链接关节的运动而变形,以得到多种对称的构形:直线形如图 1 (a),并排形如图 1 (b)和 1 (c).

为测试变形机器人的变形机理,我们设计了三模块可重构变形机器人样机,如图 3 所示.图 3 显示了变形机器人从直线状态到并排状态各种构形之间相互切换的整个过程,实验表明,各种构形之间的切换十分灵巧,其逆过程亦然.三模块变形机器人具有 3 种对称构形:图 3 (a)为三模块状态的直线形态,图 3 (e)为三模块的三角形态,图 3 (h)为三模块的并排形态.其余为中间过渡构形.此外,在变形机器人的多种形态中,每种形态还具有多种步态,机器人的多种形态和多种步态的有机结合,大大提高了变形机器人的环境适应能力和运动效率.

(b) Yaw180° (c) 1 Yaw180° 、 Pitch180°
 1.模块本体 2.偏转关节 Yaw 3.连接臂 4.仰俯关节 Pitch

图 1 新型链接变形原理
 Fig.1 The novel link-type structure

2.2 三模块变形机器人样机

单个变形机器人标准模块的组成如图 2 所示,系统具有履带驱动、仰俯关节、偏转关节 3 个自由度.模块间通过仰俯关节、连接臂和偏转关节进行重构连接实现变形.

1.连接臂 2.仰俯关节链传动 3.履带
 4.履带驱动链传动 5.偏转关节锥齿轮传动

图 2 单模块结构
 Fig.2 The structure of a standard module

Fig.3 Three-module reconfigurable robot

3 倾翻问题分析 (Analysis of the tipover problem)

3.1 地形环境

地形环境影响移动机器人的通过性能和稳定性.移动机器人的地形环境指的是地貌的几何状态和地物的物理状态.地貌的几何状态是指地表面高低起伏的自然状态,如山地、丘陵、平原等,对移动机

机器人而言为地表的三维复杂性、坡度、壕沟、障碍物等。地物的物理状态是指分布在地面上的固定性物体,如居民地、道路、江河、森林等,地表植被分布如草地、灌木等,地表土壤摩擦特性,如沙地、泥土、砾石,以及地表本身的稳定性等。

针对不同的地形环境,移动机器人的运动稳定性和抗倾翻能力不尽相同,地形环境的全面估计对机器人的移动平台的结构设计以及其稳定性控制十分重要。

3.2 机器人自身稳定性的控制与提高

机器人本身的状况主要指机器人的质量重心的位置、机器人运动过程中的速度和加速度、机器人的运动形式等,机器人自身的稳定性能通常是可控的。

主要有以下两个方面:

1)建立合理的移动机器人的稳定评价指标,以便对机器人的结构进行设计和对机器人的运动状态进行控制。目前,已经有判别方法:静态稳定判据方法主要有重心投影法(CG Projection Method)^[6],静态稳定边界法(Static Stability Margin, SSM)^[7],类似的还有纵向稳定边界法(Longitudinal Stability Margin, LSM)^[8],偏转纵向稳定边界方法(Crab Longitudinal Stability Margin, CLSM)^[9],能量稳定边界方法(Energy Stability Margin)^[10]等;动态稳定判据方法有压力中心法(Center of Pressure Method, COP)^[11],有效质量中心方法(Effective Mass Center, EMC)^[12],零力矩点方法(Zero Moment Point, ZMP)^[13],以及动态边界法(Dynamic Stability Margin, DSM)^[14]等。然而,不同的应用背景,机器人需要不同的评判标准,如果对移动机器人采用错误的评判标准,机器人的运动将会受到限制,如果能够找到合适的评判标准,机器人的各项运动指标均能够得到优化。从现有的文献来看,以下 6 种情况代表了机器人在运动过程中所有可能遇到的情况^[6-15]:

- (a) 平面平坦没有动力因素的影响;
- (b) 不平坦的地面没有动力因素的影响;
- (c) 平面平坦考虑到惯性的影响;
- (d) 不平地面,考虑到惯性的影响;
- (e) 平面平坦考虑到惯性、作业的影响;
- (f) 不平地面,考虑到惯性、作业的影响。

本文所设计的模块化变形机器人运动速度较低,其应用主要为非结构环境中的作业任务,因此我们提出采用稳定锥方法对移动机器人边线倾翻、角点倾翻的静、动力情况的稳定性进行综合评价,并进行了相应的仿真分析和环境实验。

2)移动机器人通过构形的变化或结构的变化来实现自身重心和稳定性能的调整。目前基于可重构、自变形的移动机器人研究越来越受到重视,变形机器人或可重构机器人在非结构环境中的应用的相关研究也得到广泛重视。通过构形的变化,来增加其稳定性。如文献[2]和文献[5]中设计的星球机器人,它们可以通过调整自身重心的位置和支撑来提高系统的稳定性。

4 稳定锥方法 (Stability pyramid technique)

本文提出的稳定锥方法能对边线倾翻、角点倾翻的静态、动态进行综合考虑。在实际应用中,常遇到操作时的受力、动量、加速度、地形等干扰。然而对这些情况,如果变形机器人不采用相应的运动构形,机器人将因倾翻而导致作业的失败。

4.1 稳定锥的定义

根据棱锥的几何特点,综合文献[2,15]提出的方法,对稳定锥进行定义。机器人的质心(重心)为稳定锥的顶点,对移动机器人来讲,如果是轮式或腿式移动机器人,取轮、腿的接触点作为稳定锥的角点,如果是履带式移动机器人,取履带的外边界的上边线的端点作为稳定锥的底面角点,由这些点连接而成的凸多边形为稳定锥的底面。以俯视情况下的顺时针方向对多边形的角点顺次进行标注,如图 4 所示,分别记为: $p_i (i=1, \dots, n)$ 。

图 4 稳定锥

Fig. 4 Stability pyramid

稳定锥底面的底边,亦即倾翻边线,记为:

$$a_i = p_{i+1} - p_i \quad (i = 1, \dots, n - 1) \quad (1)$$

$$a_n = p_1 - p_n \quad (2)$$

过重心与倾翻边界相垂直的直线为:

$$l_i = (1 - \hat{a}_i \hat{a}_i^T) p_{i+1} \quad (3)$$

式中, $\hat{a} = a / \| a \|$ 。

边线倾翻稳定角的计算可以由倾翻轴的垂线 l_i 和重心向量 f_g 的夹角计算得出:

$$y_i = \sigma_i \cos^{-1}(\hat{f}_g \hat{l}_i) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4)$$

式中:

$$\sigma_i = \begin{cases} +1, & (\hat{l}_i \times \hat{f}_g) \hat{a}_i < 0 \\ -1, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

同理,对于角点倾翻情况,角点倾翻角由下式计算得出:

$$\phi_i = \varepsilon_i \cos^{-1}(\hat{f}_g \hat{p}_i) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (6)$$

式中:

$$\varepsilon_i = \begin{cases} +1, & (\hat{l}_i \times \hat{f}_g) \hat{a}_i < 0 \text{ 或 } (\hat{l}_{i+1} \times \hat{f}_g) \hat{a}_{i+1} < 0 \\ -1, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

考虑机器人的全局稳定性,取:

$$\theta_i = \min(y_{i-1}, \phi_i, y_i) \quad (i = 2, \dots, n) \quad (8)$$

而 $\theta_1 = \min(y_n, \phi_1, y_1)$. 最小稳定角的角度值:

$$\alpha = \min(\theta_i) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (9)$$

当 $\alpha < 0$ 时,机器人将会出现倾翻现象.因此,模块化变形机器人基于稳定性的静力学重构问题其目的是寻找一个具有较大的稳定角的值.

如果考虑到外力作用的影响,外力可以进行折合表达达到机器人的重心位置,假如外力的大小可以看成 f ,沿倾翻轴的合成外力表达为:

$$\hat{f} = (1 - \hat{a}_i \hat{a}_i^T)(\hat{f}_g + f) \quad (10)$$

如果除外力 f 外,还有一个力矩 m_o ,倾翻的等效作用力为:

$$\hat{f} = \hat{f} + \frac{\hat{l}_i (\hat{a}_i \hat{a}_i^T) m_o}{\|\hat{l}_i\|} \quad (11)$$

静、动力情况下的最小稳定角可以通过上述方法进行计算得出.在动力情况下的系统安全性,还要考虑最小倾翻能量,亦即动力情况下使得系统绕边界或角点进行倾翻所消耗的最小能量:

$$E_s = Gh(1 - \cos\alpha) / \cos\alpha \quad (12)$$

式中, h 为稳定锥重心到底面的距离,亦即高稳定锥的高, G 为机器人重力或重心的等效作用力.式 (12) 可以进一步简化为无量纲表达式:

$$e = (1 - \cos\alpha) / \cos\alpha \quad (13)$$

4.2 倾翻性能指数

为了优化机器人构形以得到机器人系统的最大稳定性,提出了一个综合衡量稳定性能的指数——倾翻性能指数,表达为:

$$\phi = \max\left(\frac{\lambda_i}{y_i} + \frac{\rho_i}{\phi_i} + \zeta_i \sqrt{\frac{\cos\theta_i}{1 - \cos\theta_i}}\right) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (14)$$

式中: θ_i ——名义上的稳定计算角,由式 (8) 定义;

λ_i ——边线倾翻时的权重计算系数,它的取值取决于两个方面:静、动力因素和边界与运动方向的关系.边界与运动方向的关系是:判断倾翻边界与运动方向重合与否,当两者重合或者夹角较小时,权重适当增加,因为在运动时如受阻或遇地形变化等情况,机器人系统更容易倾翻;

ρ_i ——角点倾翻的权重系数,在动力情况或地面不平情况下,对位于机器人周边离重心近的角点,角点倾翻才有可能发生,此时权重值应该适当增加;

ζ_i ——倾翻能量的权重系数,出于动力情况下的系统安全性,还有必要考虑最小倾翻能量.倾翻能量权重系数需要综合考虑系统的运动方向、惯性、地面状态、外力等,权重值根据不同的情况酌情考虑.

综上,倾翻性能指数 ϕ 表示移动机器人的运动过程中系统产生倾翻的危险程度.其值越大,系统就越容易倾翻;反之,其值越小,系统就越稳定.

4.3 稳定性干扰的等价描述

根据机器人系统的特点,综合环境状态和作业性能,对机器人的稳定性进行理论分析和仿真分析得知,等效作用力的方向起决定性作用.

移动机器人在运动过程中受地形变化、地面作用力不平衡、外力干扰等不稳定因素的影响,稳定锥相应呈现前后俯仰、左右倾斜、偏转等状态.针对机器人的某种运动构型,稳定锥锥体一定,变化的是稳定锥在空间的位置和等效 \hat{f}_g 的方向. \hat{f}_g 的方向可以和地形的变化进行综合考虑,以 \hat{f}_g 表示.在图 5 中,等效作用力的方向与 Z 轴负方向一致,所有的干扰因素用稳定锥的倾斜、仰俯、偏转来进行相应描述.

干扰过程中,顺序发生绕 X 轴倾斜 (Roll) u 角,绕 Y 轴仰俯 (Pitch) v 角,绕 Z 轴偏转 (Yaw) w 角.此时,稳定锥各个角点位置也随之发生变化,角点对应于基坐标的变换式为:

$$T_{RPY} = \begin{bmatrix} Q_{RPY} & R'_0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中 $R'_0 = [0, 0, 0]^T$, 而 $Q_{RPY} = Q_Z(w) Q_Y(v) Q_X(u)$, 可以化简为:

$$Q_{RPY} = \begin{bmatrix} cwcw & cwsvsu - swcu & cwsvcu + swsu \\ swcv & swsvsu + cwcu & swsvcu - cwcw \\ -sv & cvsu & cvcu \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中 $cv = \cos v$, $su = \sin u$, 其它同。

此时,通过重新计算角点的坐标可以分析出干扰后机器人的稳定性。

表 1 3 种构形的稳定锥参数

Table 1 Parameters of the three stability pyramid

形态	角点坐标				倾翻权重系数		
	点	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	λ	ρ	ζ
直线形态	1	- 524	32.67	- 50	1	1	1
	2	- 524	- 49.33	- 50	0.5	1	0.5
	3	524	- 49.33	- 50	1	1	1
	4	524	32.67	- 50	0.5	1	0.5
	5	138	59.17	- 50	0.5	0.5	0.5
	6	- 138	59.17	- 50	0.5	0.5	0.5
三角形形态	1	- 230	186.5	- 50	1	1	1
	2	- 230	- 186.5	- 50	0.5	1	0.5
	3	46	- 186.5	- 50	0.5	0.5	0.5
	4	322	- 41	- 50	1	1	1
	5	322	41	- 50	0.5	1	0.5
	6	46	186.5	- 50	0.5	0.5	0.5
并排形态	1	- 138	190	- 50	1	1	1
	2	- 138	- 190	- 50	0.5	1	0.5
	3	138	- 190	- 50	1	1	1
	4	138	190	- 50	0.5	1	0.5

图 5 稳定性干扰的等价描述

Fig. 5 Equivalent representation of stability disturbance

5 三种对称构形抗倾翻能力分析 (Anti-ti- pover ability analysis of these three sym- metrical configurations)

5.1 三种对称构形的静态稳定锥

图 3 中重点提到了三模块变形机器人的对称构形,因为对称构形的可控性和稳定性较好.这里我们以履带前进方向为 x 轴正向(如图 3(a)右),机器人高度方向为 z 轴正向,前进方向右侧为 y 轴正向.三模块变形机器人的 3 种对称构形为别为:图 3(a)的直线形态(近似对称),图 3(e)的三角形形态,图 3(h)的并排形态.其中直线形态为近似对称构形.假定机器人模块的质量分布均匀,各模块的质量相等.定义变形机器人质心的位置为坐标零点,对应于 3 种对称状态,根据图 3 所示模块化变形机器人的实际设计尺寸,静态情况下,稳定锥角点的位置分别如表 1 所示.

5.2 倾翻稳定性干扰仿真分析

前面提到的 3 种稳定性干扰过程中,考虑到地面地形的坡度一般小于 $\pi/4$ (静摩擦力平衡条件^[16]),假定机器人运动过程中偏航角度也一般小于 $\pi/4$,3 种随机干扰定义为:

$$u(t) = \pi/2(\delta_u(t) - 0.5) \quad (17)$$

$$v(t) = \pi/2(\delta_v(t) - 0.5) \quad (18)$$

$$w(t) = \pi/2(\delta_w(t) - 0.5) \quad (19)$$

式中, $\delta_u(t)$ 、 $\delta_v(t)$ 和 $\delta_w(t)$,它们大小不一定相同,但是均为 0~1 之间随时间变化的随机数.

我们分析如下 5 种典型情况,3 种构形的抗干扰稳定性能力:

- (a) 倾斜干扰;
- (b) 仰俯干扰;
- (c) 倾斜、偏转组合干扰;
- (d) 仰俯、偏转组合干扰;
- (e) 倾斜、仰俯、偏转组合干扰.

在上述 5 种情况下,稳定权重系数取值见表 1 所示,仿真实验时间为 3s,采样数据为 31 个,利用式(1)~(19)进行分析计算,特别是根据式(14)考虑 3 种构形的倾翻性能指数.

5 种情况下,3 种状态的综合倾翻稳定性仿真结果如图 6(a)~6(e)所示.在以上几组干扰的作用下,仿真结果表明,三模块变形机器人的并排形态具有最好的抗倾翻能力,三角形形态次之,直线形态在各种干扰情况下最容易倾翻.

6 非结构环境实验 (Experiment in unstructured environment)

我们试验三种构形在非结构环境中的运动情况,主要考虑机器人的运动通过能力和稳定性两个方面.实验表明,对多种环境和任务,3种形态各有利弊:直线形态因兼具蛇形机构的特点而拥有较强的运动能力,坡度爬行和台阶爬行能力最强,如图7(a)、(b),但是其稳定性较差;并排形态与前两者相比运动能力较差,但是并排形态因为其结构紧凑,其抗倾翻能力较强,如图7(d),在由砖木组成的模拟废墟环境中,并排形态和三角形态运动平稳,而直线形态容易产生侧向倾翻.3种形态中,三角形态的稳定性最好,但是其运动性能居中,图7(c)为三角形态爬垂直障碍的情况.

图 7 非结构环境实验

Fig. 7 Experiment in unstructured environment

7 结论 (Conclusion)

本文介绍了一种模块化、可变形、链式履带驱动移动机器人,该模块化变形机器人具有多种构形,可以通过构形的变化来提高系统的稳定性.在对移动机器人的倾翻因素和抗倾翻对策进行分析的基础上,提出稳定锥方法和倾翻性能指数,对变形机器人的静态、动态稳定性进行了综合判定,讨论了变形机器人3种对称构形在仰俯、偏转、倾斜等干扰组合作用下的稳定度,并进行了相应的仿真实验和环境实验.本文提出的稳定锥方法,为可重构机器人的倾翻问题提供了有效的理论分析手段,同时稳定锥方法还可以适应轮式或腿式移动机器人机构的稳定性分析.仿真实验和环境实验为机器人投入到实际应用提供了参考.

(下转第 283 页)