

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2015.0161

异构模块型可变形机器人狭窄空间转向性能研究

王明辉¹, 马书根¹, 李斌¹, 李楠²

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国航天三院第 33 研究所, 北京 100074)

摘要: 围绕异构模块型可变形机器人在狭窄环境的通过性问题, 在分析直线构型转向性能和狭窄环境安全通过范围的基础上, 提出一种基于能量最优的狭窄环境下转向控制方法. 首先在转向运动学和转向动力学模型基础上, 构建了状态角度、驱动速度等控制参数与转弯半径等转向性能的关系; 进而以能量消耗最小为目标、以安全转弯范围为约束条件, 优化机器人直线构型转向下各运动参数的选择和调整. 最终通过仿真分析验证了运动控制参数对转向性能的影响, 并提出了不同转向方式、不同转向控制参数的特点和优势.

关键词: 异构模块; 可变形机器人; 转向控制; 狭窄环境; 直线构型

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2015)-02-0161-07

Steering for a Transformable Robot with Heterogeneous Modules in Narrow Space

WANG Minghui¹, MA Shugen¹, LI Bin¹, LI Nan²

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

2. No.33 Research Institute of the Third Academy of China CASIC, Beijing 100074, China)

Abstract: Aiming at the capability of passing through a narrow space for a transformable robot with heterogeneous modules, a control method for steering in a narrow space is proposed on the basis of the optimal energy-consumption through analyzing the steering performance in line configuration and the safe range in narrow space. The kinematic and dynamic models for robot steering in line configuration are established, and then the relationship between steering performance and control parameters such as the configuration angle and driving velocity is constructed. With the goal of minimal energy-consumption, the kinematic parameters of steering in line configuration are selected and adjusted under the constraints of safe steering range. The influence of the motion control parameters on the steering performance is verified by simulation, and the features and advantages of various steering methods and steering control parameters are presented.

Keywords: heterogeneous module; transformable robot; steering control; narrow space; line configuration

1 引言 (Introduction)

移动机器人在执行废墟环境搜救等特殊任务时, 通常需要通过一些空间狭小的环境, 例如狭窄通道、废墟通道、狭窄矿道等. 面对这些环境, 常规机器人通常选择绕过该环境的策略, 但这种方式可能将增加机器人的移动路程、执行时间和能耗, 同时对于某些必须通过狭窄环境的任务则束手无策. 可变形机器人具有改变自身构型的能力, 因此, 可以变换为在狭窄空间通过能力较好的构型以实现狭窄环境下的通过行为^[1-3]. 这种采用构型变换提高狭窄环境通过性的策略可以缩短机器人行驶路径和时间, 提高机器人执行某些特殊任务的成功率.

从两栖环境适应性出发, 结合构型转换能力,

研制出一种异构模块型水陆两栖链式可变形机器人 Ameoba-II^[1], 具有直线构型和并排构型. 该机器人可以利用直线构型通过狭窄的环境.

狭窄环境不仅限于直线通道, 其往往是曲折多变的, 因此需要机器人根据通道的具体情况进行运动方向的适时调整. 常规的铰接车辆或机器人多为双履带单元进行铰接, 在转向控制过程中只需通过履带速度的不同就可以实现机器人的差速转向, 不需要改变机器人的姿态和构型; 北京航空航天大学等针对同构模块型可变形机器人的转向问题进行了研究^[4-8]. 但对于异构模块型可变形机器人单履带模块单元链式构型转向, 需要同时控制履带速度和不同履带驱动模块间的姿态关系, 目前针对这类机器人的转向问题研究还较少.

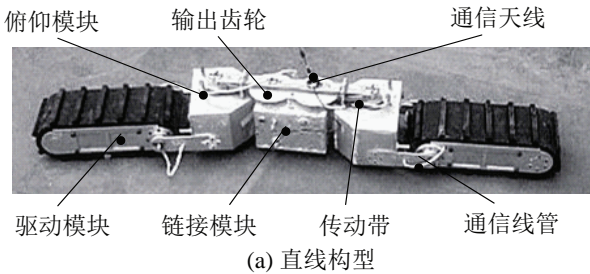
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61273345).

通信作者: 王明辉, mhwang@sia.cn 收稿/录用/修回: 2014-09-03/2014-11-28/2014-12-13

针对异构模块型可变形机器人在狭窄环境中的转向问题, 本文从机器人与实际应用环境相互作用入手, 建立机器人在狭窄环境下直线构型的转向运动学和动力学模型, 以量化机器人通过能力, 并在此基础上提出基于能量优化的狭窄环境下的转向控制策略, 提升机器人在复杂环境下的通过能力和环境适应性.

2 异构模块型可变形机器人 Ameoba-II (Transformable robot with heterogeneous modules, Ameoba-II)

水陆两栖机器人对于水环境和陆地环境均具有一定的适应能力, 能在两栖环境中执行任务和完成相应操作^[9]. 常规的复合驱动型机器人设计需要在原有的机构设计的基础之上添加额外的推进机构, 从而在水环境和陆地环境下使用不同机构实现相应环境下的推进, 这种机构设计方式可在一定程度上保证机器人在水环境和陆地环境下的机动性能和通过性能, 但是其需要添加额外机构, 增加了水陆两栖机器人的机构设计的复杂程度, 从而增大了机器人的质量、体积、控制的复杂度. 另外, 水环境中的推进机构在陆地环境中可能会成为运动的阻碍.



(a) 直线构型



(b) 中间状态和并排构型

图 1 Ameoba-II 的组成和构型

Fig.1 Composition and configuration of Ameoba-II

因此, 基于链式构型两栖环境适应性, 提出一种异构模块型可变形机构, 主要包括两种运动模块: 驱动模块利用履带机构实现运动, 链接模块实现构型的变换. 异构模块型机器人是由具有不同功能的异类模块组成, 为得到最优的两栖环境综合运动性能, 采用基于多目标遗传算法的机器人结构参数优化设计方法, 建立两栖环境中机器人的机动性能指标函数与结构参数的映射关系, 得到机

构参数设计问题的 Pareto 最优解集, 完成了原理样机 Ameoba-II 的研制^[10]. Ameoba-II 包含两种构型——直线构型和并排构型, 如图 1 所示.

3 转向运动建模 (Modeling of steering)

在狭窄环境中, Ameoba-II 采用直线构型进行运动, 两个驱动模块在一条直线上, 两者之间的速度差不能带来机器人运动方向的改变. 因此, 需要利用链接模块调整两个驱动模块之间的角度, 使两者的运动方向有一个角度差, 从而实现机器人在直线构型下的运动方向调整, 如图 2 所示.

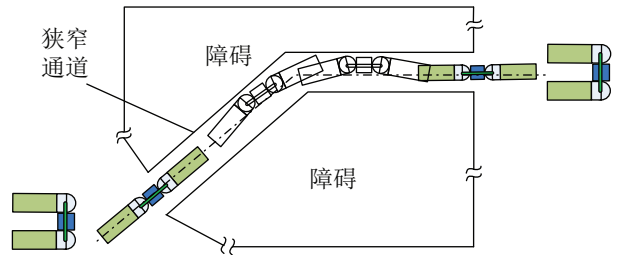


图 2 可变形机器人通过狭窄环境

Fig.2 Ameoba-II passing through a narrow space

3.1 单驱动模块转向阻力矩模型

假设各模块的质心与几何中心重合, 如图 3 所示, 以履带速度瞬心为原点建立坐标系, 履带纵向方向平行于 Y 轴, 横向方向平行于 X 轴. 履带与地面的接触微元 $dx dy$ 摩擦力 dF 为

$$dF = \mu_r p dx dy \tag{1}$$

式中, μ_r 为地面摩擦系数, p 为平均的接地比压, 且 $p = G/BL$.

由此可得各方向的所受合力为

$$\begin{cases} F_x = \iint dF \sin \phi \\ = \int_{D-0.5L}^{D+0.5L} \int_{A-0.5B}^{A+0.5B} \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \frac{\mu_r G}{BL} dx dy \\ F_y = - \iint dF \cos \phi \\ = - \int_{D-0.5L}^{D+0.5L} \int_{A-0.5B}^{A+0.5B} \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} \frac{\mu_r G}{BL} dx dy \end{cases} \tag{2}$$

式中, (x, y) 为接触微元的坐标值, ϕ 为坐标点的偏转角.

相对于该模块的几何中心 O_1 , 由于摩擦力而产生的转向阻力矩为

$$\begin{aligned} M_r^f &= - \iint (y-D) dF_x + \iint (x-A) dF_y \\ &= \int_{D-0.5L}^{D+0.5L} \int_{A-0.5B}^{A+0.5B} \frac{-x(x-A) - y(y-D)}{\sqrt{x^2+y^2}} \frac{\mu_r G}{BL} dx dy \end{aligned} \tag{3}$$

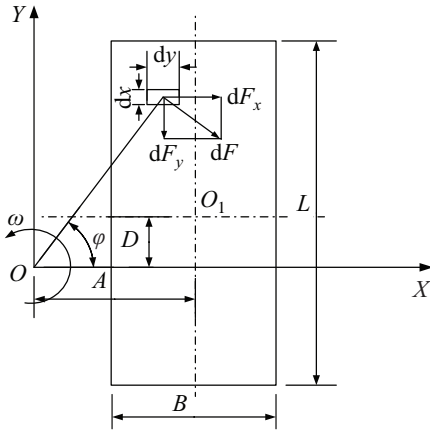


图 3 单履带模块摩擦阻力矩模型

Fig.3 Model of frictional resistance moment for a single track

3.2 直线构型转向运动学分析

如图 4 所示, β 为两个驱动模块间的偏转关节角度, θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别对应左驱动模块、右驱动模块以及中间链接模块与全局坐标系 X 轴的夹角, l 为运动模块长度, p 为俯仰模块有效长度, d 为两转动轴之间的距离, (v_{1x}, v_{1y}) , (v_{2x}, v_{2y}) 和 (v_{3x}, v_{3y}) 分别对应各模块在局部坐标系下的速度分量。

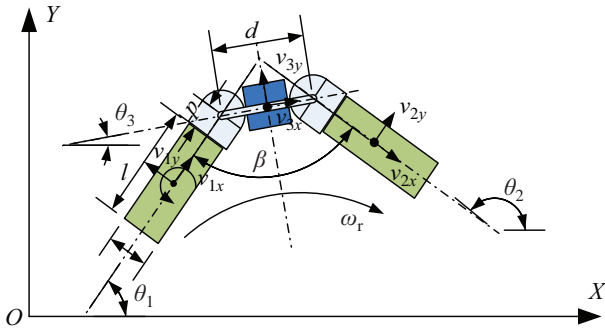


图 4 直线构型转向运动学分析

Fig.4 Analysis of steering kinematics in line configuration

各模块角度之间的关系为

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \theta_1 + \beta \\ \theta_3 &= \theta_1 - \pi/2 + \beta/2 \end{aligned} \quad (4)$$

于是有:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1 &= \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_3 = \omega \\ \ddot{\theta}_1 &= \ddot{\theta}_2 = \ddot{\theta}_3 = \alpha \end{aligned} \quad (5)$$

各模块在局部坐标系下的速度为

$$\begin{cases} v_{1x} = v_{3x} \sin \frac{\beta}{2} + (v_{3y} - \frac{d}{2} \dot{\theta}) \cos \frac{\beta}{2} \\ v_{1y} = (v_{3y} - \frac{d}{2} \dot{\theta}) \sin \frac{\beta}{2} - v_{3x} \cos \frac{\beta}{2} - (\frac{l}{2} + p) \dot{\theta} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} v_{2x} = v_{3x} \sin \frac{\beta}{2} - (v_{3y} + \frac{d}{2} \dot{\theta}) \cos \frac{\beta}{2} \\ v_{2y} = v_{3x} \cos \frac{\beta}{2} + (v_{3y} + \frac{d}{2} \dot{\theta}) \sin \frac{\beta}{2} + (\frac{l}{2} + p) \dot{\theta} \end{cases} \quad (7)$$

3.3 直线构型转向动力学分析

图 5 中, (P_{1x}, P_{1y}) 和 (P_{31x}, P_{31y}) 为一对左驱动模块与中间链接模块之间的相互作用力在局部坐标系下的分量, (P_{2x}, P_{2y}) 和 (P_{32x}, P_{32y}) 为右驱动模块和中间链接模块相互作用力在局部坐标系下的分量, M_1 和 M_{31} 为左驱动模块与中间链接模块之间的相互作用力矩, M_2 与 M_{32} 为右驱动模块与中间链接模块之间的相互作用力矩, Q_1, Q_2 分别为左右驱动模块的地面牵引力, (R_{1x}, R_{1y}) 、 (R_{2x}, R_{2y}) 和 (R_{3x}, R_{3y}) 分别为各模块地面阻力在局部坐标系下的分量, M_{1g} 、 M_{2g} 和 M_{3g} 分别为左右驱动模块以及中间连接模块地面转向阻力矩。

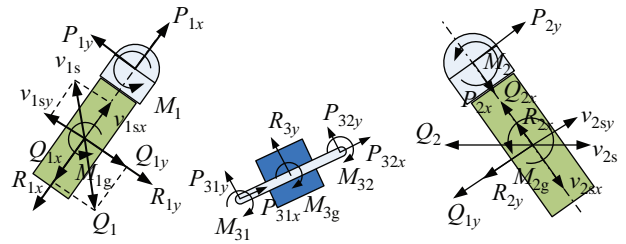


图 5 直线构型转向动力学分析

Fig.5 Dynamic analysis of steering in line configuration

驱动模块均为履带与地面接触方式, 链接模块采用支撑轮与地面接触方式. m_1, m_2 和 m_3 分别对应左右驱动模块与中间链接模块的质量, I_1, I_2 和 I_3 分别对应各模块绕其质心旋转的转动惯量。

各模块的动力学平衡方程分别为

$$\begin{cases} m_1(\dot{v}_{1x} + v_{1y} \dot{\theta}_1) = Q_{1x} + P_{1x} - \text{sgn}(v_{1x})R_{1x} \\ m_1(\dot{v}_{1y} - v_{1x} \dot{\theta}_1) = Q_{1y} + P_{1y} - \text{sgn}(v_{1y})R_{1y} \\ I_1 \ddot{\theta}_1 = P_{1y}(l/2 + p) + M_1 - \text{sgn}(\dot{\theta}_1)M_{1g} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} m_2(\dot{v}_{2x} + v_{2y} \dot{\theta}_2) = Q_{2x} + P_{2x} - \text{sgn}(v_{2x})R_{2x} \\ m_2(\dot{v}_{2y} - v_{2x} \dot{\theta}_2) = Q_{2y} + P_{2y} - \text{sgn}(v_{2y})R_{2y} \\ I_2 \ddot{\theta}_2 = -P_{2y}(l/2 + p) + M_2 - \text{sgn}(\dot{\theta}_1)M_{2g} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} m_3(\dot{v}_{3x} + v_{3y} \dot{\theta}_3) = P_{31x} + P_{32x} - \text{sgn}(v_{3x})R_{3x} \\ m_3(\dot{v}_{3y} - v_{3x} \dot{\theta}_3) = P_{31y} + P_{32y} - \text{sgn}(v_{3y})R_{3y} \\ I_3 \ddot{\theta}_3 = -\frac{d}{2}P_{31y} + \frac{d}{2}P_{32y} - M_1 - M_2 - \text{sgn}(\dot{\theta}_3)M_{3g} \end{cases} \quad (10)$$

其中, 各模块间的相互总作用力的关系为

$$\begin{cases} P_{31x} = -P_{1x} \sin \frac{\beta}{2} + P_{1y} \cos \frac{\beta}{2} \\ P_{31y} = -P_{1x} \cos \frac{\beta}{2} - P_{1y} \sin \frac{\beta}{2} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{32x} = -P_{2x} \sin \frac{\beta}{2} - P_{2y} \cos \frac{\beta}{2} \\ P_{32y} = P_{2x} \cos \frac{\beta}{2} - P_{2y} \sin \frac{\beta}{2} \end{cases} \quad (12)$$

各模块的加速度关系为

$$\begin{aligned} \dot{v}_{1x} &= \dot{v}_{3x} \sin \frac{\beta}{2} + (\dot{v}_{3y} - \frac{d}{2} \ddot{\theta}) \cos \frac{\beta}{2} \\ \dot{v}_{1y} &= \dot{v}_{3x} \cos \frac{\beta}{2} + (\dot{v}_{3y} - \frac{d}{2} \ddot{\theta}) \sin \frac{\beta}{2} - (\frac{l}{2} + p) \ddot{\theta} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_{2x} &= \dot{v}_{3x} \sin \frac{\beta}{2} - (\dot{v}_{3y} + \frac{d}{2} \ddot{\theta}) \cos \frac{\beta}{2} \\ \dot{v}_{2y} &= \dot{v}_{3x} \cos \frac{\beta}{2} + (\dot{v}_{3y} + \frac{d}{2} \ddot{\theta}) \sin \frac{\beta}{2} + (\frac{l}{2} + p) \ddot{\theta} \end{aligned} \quad (14)$$

假设左驱动模块的履带旋转速度为 v_{1t} ，履带接地面的速度为

$$v_{1sx} = v_{1x} - v_{1t}, \quad v_{1sy} = v_{1y} \quad (15)$$

那么单个驱动模块的所受合力为接地面的各点力的积分。

履带的滑移角为

$$\varphi_1 = \arccos(v_{1sx} / \sqrt{v_{1sx}^2 + v_{1sy}^2}) \quad (16)$$

牵引力为

$$\begin{aligned} Q_{1x} &= -m_1 g \mu (1 - e^{-k_s}) \cos \varphi_1 \\ Q_{1y} &= -m_1 g \mu (1 - e^{-k_s}) \sin \varphi_1 \end{aligned} \quad (17)$$

其中， μ 为地面附着系数。

同理，可以得到履带模块 2 的牵引力。地面阻力为

$$\begin{aligned} R_{1x} &= \mu_{1x} m_1 g, & R_{1y} &= \mu_{1y} m_1 g, \\ R_{2x} &= \mu_{2x} m_2 g, & R_{2y} &= \mu_{2y} m_2 g, \\ R_{3x} &= 0, & R_{3y} &= \mu_{3y} m_3 g \end{aligned} \quad (18)$$

式中， μ_{1x}, μ_{1y} 为驱动模块与地面之间的纵向阻力系数和横向阻力系数；由于链接模块与地面是轮接触，其纵向阻力与履带相比较小，可以忽略不计。各模块转动惯量为

$$I_1 = \frac{m_1}{12} l^2, \quad I_2 = \frac{m_2}{12} l^2, \quad I_3 = \frac{m_3}{12} d^2 \quad (19)$$

4 狭窄环境转向控制 (Steering control in narrow space)

4.1 直线环境转向安全范围的确定

直线构型在狭窄环境下具有良好的通过性能，但机器人仍然需要实时调整行驶方向以适应狭窄环境的变化，从而避免机器人与环境之间发生碰撞干涉现象。

如图 6 所示，机器人在狭窄通道内以直线构型行驶过程中遇到通道方向变化，将通过链接模块变

换机器人构型，并且得到构型角度 β ，驱动模块利用履带转动驱动机器人实现直线构型下转向运动至方向转变至下一个通道的方向，然后恢复成直线构型状态，继而在下个通道方向进行直线构型运动。

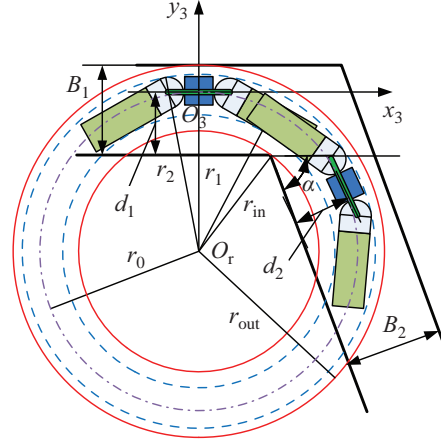


图 6 狭窄通道直线构型转向分析

Fig.6 Analysis of steering in line configuration in narrow space

分析直线构型转向模型可以看出，在转向过程中，机器人上所有点均绕速度瞬心 O 旋转，因此根据机器人几何形状分析得到其 2 个极限轨迹，即半径为 r_1 的内圆轨迹和半径为 r_2 的外圆轨迹，这即是机器人的直线转向工作空间。瞬心 O 到狭窄通道内侧的最远距离为 r_{in} ，该距离也是狭窄转角的内圆半径；同样，瞬心到通道外侧的最近距离为狭窄转角的外圆半径 r_{out} 。 d_1 和 d_2 分别为转弯前后的模块 3 中心到内侧边缘距离。狭窄通道的宽度分别为 B_1 和 B_2 ，取其小值 $B = \min(B_1, B_2)$ 。

假设在此构型角度 β 下的直线构型转向半径为 r ，通过机器人自身的几何关系可以得到其轨迹极限圆半径：

$$r_1 = [r_0 - (\frac{d}{2} - \frac{b}{2 \cos(\beta/2)}) \tan \frac{\beta}{2}] \sin \frac{\beta}{2} + (\frac{d}{2} - \frac{b}{2 \cos(\beta/2)}) / \cos \frac{\beta}{2} \quad (20)$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{d^2}{4} + r_0^2} + \frac{b}{2} \quad (21)$$

根据狭窄通道的几何关系可以确定机器人安全运行范围，其内圆半径 r_{in} 和外圆半径 r_{out} ：

$$\begin{aligned} r_{out} &= \min(r_0 - d_1 + B_1, r_0 - d_2 + B_2) \\ r_{in} &= \sqrt{\frac{[(r_0 - d_1) - (r_0 - d_2) \cos \alpha]^2}{\sin^2 \alpha} + (r_0 - d_2)^2} \end{aligned} \quad (22)$$

为避免直线构型转向时机器人的各模块与狭窄环境发生干涉而造成转向过程中止的情况，需要机

机器人的轨迹在狭窄通道范围内运行, 因此, 机器人安全完成狭窄通道内转向的各轨迹的几何关系为

$$\begin{cases} r_1 \geq r_{in} \\ r_2 \leq r_{out} \\ \frac{b}{2} \sin(\frac{\beta}{2}) + (l + \frac{p}{2}) \cos(\frac{\beta}{2}) \leq \min(d_1, d_2) \end{cases} \quad (23)$$

4.2 基于能量优化的直线构型转向控制

机器人能量损耗的大小直接决定续航能力, 从而影响机器人对于任务的完成能力. 履带机器人与地面接触面积远大于轮式机器人, 其转向时产生的能量损耗大于其它驱动类型机器人. 因此, 需要对机器人直线构型转向的能量损耗进行讨论, 并根据能量损耗情况给出相应的控制策略.

机器人在转向过程中, 动力的来源产生于电机, 电机的输出功率为

$$P_M^{1,2} = \tau_M^{1,2} \cdot \sigma_M^{1,2} \quad (24)$$

其中, τ_M 为电机的输出力矩, σ_M 为电机转速.

该部分能量用于 2 个部分: 机器人动能的增加 ΔE 以及能量损耗 P_c , 而能量损耗又可分为内部能量损耗 P_{ci} 和外部能量损耗 P_{co} , 即:

$$\eta P_M \Delta t = \Delta E + (P_{ci} + P_{co}) \Delta t \quad (25)$$

式中, η 为机械传动系统的效率, Δt 为时间微元.

机器人的动能为

$$E = 0.5m_1v_1^2 + 0.5m_2v_2^2 + 0.5m_3v_3^2 + 0.5(I_1 + I_2 + I_3)\omega^2 \quad (26)$$

外部的能量损耗为

$$P_{co} = \sum_{i=1}^3 (M_r^i |\omega| + R_x^i |v_x^i| + R_y^i |v_y^i|) \quad (27)$$

其中, M_r^i 为模块 i 的转向阻力矩, R_x^i 和 R_y^i 分别为对应模块 i 的 x 方向和 y 方向的阻力.

内部的能量损耗主要来源于内部履带驱动带轮以及被动带轮产生的摩擦阻力矩 τ_{ci} , 其可由实验将机器人吊起空转测定, 因此内部能量损耗为

$$P_{ci}^{1,2} = \tau_{ci} \cdot |\sigma_M^{1,2}| \quad (28)$$

各功率之间的关系为

$$\begin{aligned} \eta P_M &= \frac{dE}{dt} + (P_{ci} + P_{co}) \\ &= \sum_{i=1}^3 (m_i v_x^i \dot{v}_x^i + m_i v_y^i \dot{v}_y^i + I_i \omega \dot{\omega}) + \sum_{i=1}^2 \tau_{ci} \cdot |\sigma_M^i| + \\ &\quad \sum_{i=1}^3 (M_r^i |\omega| + R_x^i |v_x^i| + R_y^i |v_y^i|) \end{aligned} \quad (29)$$

上式等式右边的动能消耗功率以及外部磨损消耗功率可以由前述的动力学模型进行计算得到, 而内部的功率消耗可以由履带空转实验得到. 基于能量优化的转向过程就是根据实际环境的需要给出安全转向范围, 从而要求在给定安全转向范围的情况下, 提出合理的履带转速与构型角度, 使机器人利用最少的能量消耗完成整个转向过程, 从而通过狭窄通道.

$$\begin{aligned} \min E_{turn} &= \frac{1}{\eta} \int_0^T (\sum_{i=1}^2 \tau_{ci} \cdot |\sigma_M^i|) dt + \\ &\quad \frac{1}{\eta} \int_0^T (\sum_{i=1}^3 (m_i v_x^i \dot{v}_x^i + m_i v_y^i \dot{v}_y^i + I_i \omega \dot{\omega})) dt + \\ &\quad \frac{1}{\eta} \int_0^T (\sum_{i=1}^3 (M_r^i |\omega| + R_x^i |v_x^i| + R_y^i |v_y^i|)) dt \end{aligned}$$

- s.t. (1) $r(\beta, v_t) = r_0$
 (2) $\int_0^T \omega(\beta, v_t) dt = \alpha$
 (3) $r_2 \leq r_{out}$
 (4) $r_1 \geq er_{in}$
 (5) $\frac{b}{2} \sin \frac{\beta}{2} + (l + \frac{p}{2}) \cos \frac{\beta}{2} \leq \min(d_1, d_2)$

式中, r 为根据环境确定的转向半径, 其需要满足约束条件后 3 项的安全运动范围的要求; α 为转向角度, 由狭窄环境确定.

由前述的狭窄环境下的直线构型转向的运动性能分析可知, 机器人驱动模块的构型角度和履带转速均能影响到转向性能. 狭窄环境较为复杂, 较高的履带速度会导致机器人转向时难以操控, 增加机器人与狭窄环境发生碰撞的几率, 因而, 在狭窄环境下转向时, 机器人的履带速度不宜过快, 选择履带速度为 1 m/s. 因此, 对机器人的构型角度进行优化时, 参照机器人的实际结构尺寸参数 (见表 1), 利用式 (30) 可以求得狭窄通道和转角所对应的最优构型角度, 如表 2 所示.

表 1 结构参数的最优解

Tab.1 The optimal values of structural parameters

T / m	P / m	L / m	B / m	H / m
0.352	0.141	0.163	0.146	0.108

如表 2 所示, 当机器人以直线构型进入狭窄通道时, 根据能量优化原则而选择的构型角度随着通道宽度的增大而减小. 构型角度的增大可以带来转弯半径的减小, 从而转弯路程也较小, 从而转弯过程中的能量消耗较小; 但同时, 机器人由直线构型

转化为目标构型角度的能耗随着构型角度的减小而增加，减小构型角度虽然带来转向过程的能量损耗的节省，但是带来变形过程的能量损耗的增加。

表 2 基于能量优化的狭窄环境构型角度

Tab.2 The configuration angles for steering in narrow space based on optimized energy-consumption

通道宽度 <i>B</i> /m	转角 α /rad			
	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$	$\pi/3$
0.2	-	-	-	-
0.25	-	-	-	-
0.3	-	-	-	-
0.35	0.7π	-	-	-
0.4	0.7π	0.65π	-	-
0.45	0.65π	0.60π	0.60π	-
0.5	0.6π	0.55π	0.50π	0.50π
0.55	0.5π	0.45π	0.40π	0.40π
0.6	0.4π	0.35π	0.30π	0.35π
0.65	0.25π	0.25π	0.30π	0.35π
0.7	0.25π	0.25π	0.30π	0.35π
0.75	0.25π	0.25π	0.30π	0.35π

5 仿真和试验 (Simulation and experiment)

基于运动学和动力学模型，通过仿真，分析形状角度 β 和履带旋转速度 v_t 对转弯半径等转向性能的影响。设定仿真参数为： $m_1 = m_2 = 3.5 \text{ kg}$ ， $m_3 = 3.0 \text{ kg}$ ， $l = 0.40 \text{ m}$ ， $d = 0.30 \text{ m}$ ， $p = 0.15 \text{ m}$ ；实验测定参数： $\mu_x = 0.2$ ， $\mu_y = 0.25$ ， $\mu_d = 0.5$ ， $k = 3.5$ 。

(1) v_t 固定时， β 对转向性能的影响

履带速度 v_t 为 1 m/s ，改变直线构型下驱动模块之间的形状角度 $\beta \in \{0, \pi/10, \pi/5, 3\pi/10, 2\pi/5, \pi/2, 3\pi/5, 7\pi/10, 4\pi/5, 9\pi/10\}$ ，得到转向性能如图 7 所示。

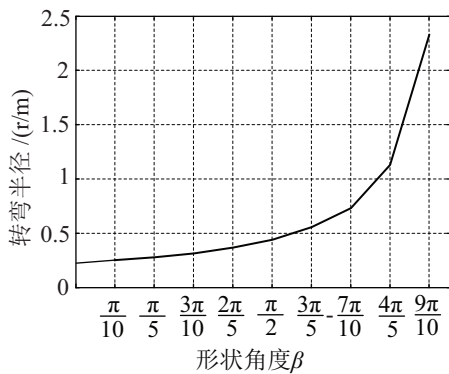


图 7 转弯半径与形状角度关系

Fig.7 Relationship between steering performance and configuration angle

转弯半径 r 随着 β 的增加而增加；当 $\beta \in (0, \pi/2)$ 时，对 r 的影响较小；当 $\beta \in (\pi/2, \pi)$ 时， β 的变化对 r 具有明显的调节作用。当 $\beta = 0$ 时，机器人实现原地滑移转向。

(2) β 固定时， v_t 对转向性能的影响

当直线构型的形状角度 $\beta = 2\pi/3$ ，调节驱动模块履带转速 $v_t \in \{0.1 \text{ m/s}, 1 \text{ m/s}, 2 \text{ m/s}, 3 \text{ m/s}, 4 \text{ m/s}\}$ ，得到转向性能如图 8 所示。

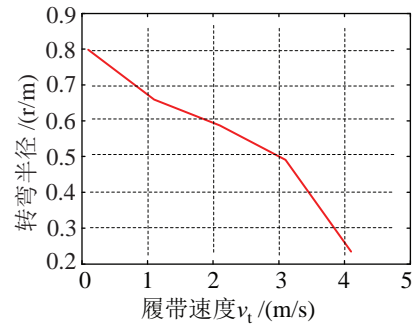


图 8 转弯半径与履带转速之间关系

Fig.8 Relationship between steering performance and track speed

由图 8，转弯半径随着履带速度的增加而减小。履带转速较大时，机器人轨迹不闭合，圆心会有偏移，类似于螺旋线式的曲线，因此其转弯半径较难控制；履带速度增加导致对于机器人的方向控制具有不稳定性，履带速度对于稳定的转弯半径的调节范围有限。

(3) β 固定时，不同步 v_t 对转向性能影响

直线构型下，固定形状角度 $\beta = 2\pi/3$ ，固定履带 1 的速度 $v_{1t} = 1 \text{ m/s}$ ，改变履带 2 的速度 $v_{2t} \in (-0.9 \text{ m/s}, 0.9 \text{ m/s})$ 时，其对转向性能的影响如图 9 所示。

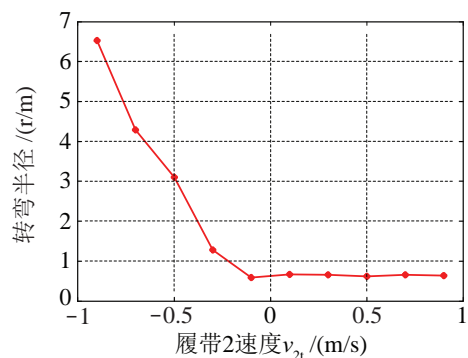


图 9 不同步履带速度对转向性能影响

Fig.9 Steering performance under nonsynchronous track speeds

转弯半径随着履带速度差的增加而减小，履带转速差变大时，转弯半径变化率减小；当两个驱动模块履带转向相同时，转弯半径维持于约 0.7 m 。

根据转向运动学和动力学模型分析和仿真得到直线构型转向以及滑移转向的特性之间的比较:

a) 形态角度对于转向半径的调节较为明显,优于履带速度对于转弯半径的调节能力,同时,前者的控制稳定性也要优于后者,履带速度调节转弯半径的时候,轨迹不为标准圆形,而是近似于螺旋形。

b) 直线构型转向与并排构型滑移转向相比,其与地面产生的滑移较少,从而能量损耗也相对较小;并排构型滑移转向转弯角速度一般大于链式构型转向,转弯速度较快,灵活性能较优。

c) 从可操作性角度考虑,机器人在常规环境运动时,利用并排构型可以保证机器人机动灵活;只有在狭窄环境中,机器人难以改变构型至并排构型进行转向,于是利用直线构型进行转向。



图10 不同形状角度的试验

Fig.10 Experiment under different configuration angles

不同形状角度、相同履带速度的试验如图10所示。图10左所示形状角度为 $9\pi/10$,经测量转弯半径为2.46m;图10右所示形状角度为 $\pi/2$,经测量转弯半径为0.56m;当形状角度为0(如图1,并排构型)时,经测量转弯半径为0.29m。考虑到试验中转弯半径会受到打滑等情况的影响,试验结果基本符合图7的仿真趋势。

6 结论 (Conclusion)

狭窄环境下的通过性是可变机器人的较高环境适应性的体现。从直线构型下的转向运动学和动力学分析出发,分析各控制变量与转向性能之间的数学关系,并且对狭窄环境下的安全通过范围进行分析,进而得到一种基于能量优化的狭窄环境下的转向运动控制方法;并通过仿真,得到了形状角度 β 和履带旋转速度 v_l 对转弯半径等转向性能的影响、以及不同构型的转向能力优势和适应环境的分析结果。这将提高可变机器人在狭窄环境中的通过能力,提升环境适应性。

参考文献 (References)

[1] 田冬英,王明辉,李斌.水陆两栖可变形机器人控制系统设计与实现[J].仪器仪表学报,2011,32(12):339-342.

- Tian D Y, Wang M H, Li B. Design and implementation of the control system of an amphibian shape-shifting robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12): 339-342.
- [2] 印波,徐威,王石刚,等.晶格畸变自重构机器人结构设计及运动分析[J].机器人,2012,34(3):314-320.
Yin B, Xu W, Wang S G, et al. Structure design and kinematical analysis of lattice distortion actuating self-reconfigurable robots[J]. Robot, 2012, 34(3): 314-320.
- [3] 张大伟,李振波,陈佳品.基于被动万向连接的可重构微型移动机器人设计与控制[J].机器人,2011,33(6):719-725.
Zhang D W, Li Z B, Chen J P. Design and control of reconfigurable mobile microrobot with passive universal connector[J]. Robot, 2011, 33(6): 719-725.
- [4] 王田苗,邹丹,陈殿生.可重构履带机器人的机构设计与控制方法实现[J].北京航空航天大学学报,2005,31(7):705-708.
Wang T M, Zou D, Chen D S. Mechanism design and control method of reconfigurable tracked robot[J]. Robot, 2005, 31(7): 705-708.
- [5] Morales J, Martinez J L, Mandow A, et al. Power consumption modeling of skid-steer tracked mobile robots on rigid terrain[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(5): 1098-1108.
- [6] Zhao H H, Duan X G, Yang G. Kinematics and dynamics modeling of a small mobile robot with tracked locomotion mode[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 1276-1280.
- [7] 常建,吴承东,李斌.可变形机器人直线构型滑移转向方法[J].机械工程学报,2012,48(7):9-15.
Chang J, Wu C D, Li B. Shape-shifting robot skid-turning with line configuration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(7): 9-15.
- [8] Wang W D, Zhou L, Du Z J, et al. Track-terrain interaction analysis for tracked mobile robot[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 126-131.
- [9] 杨清海,喻俊志,谭民,等.两栖仿生机器人研究综述[J].机器人,2007,29(6):601-608.
Yang Q H, Yu J Z, Tan M, et al. Amphibious biomimetic robots: A review[J]. Robot, 2007, 29(6): 601-608.
- [10] 李楠,王明辉,马书根,等.基于多目标遗传算法的水陆两栖可变形机器人结构参数设计方法[J].机械工程学报,2012,48(17):10-20.
Li N, Wang M H, Ma S G, et al. Mechanism-parameters design method of an amphibious transformable robot based on multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 10-20.

作者简介:

王明辉(1980-),男,博士,研究员.研究领域:可变形机器人,仿生机器人,环境适应机构和控制。

马书根(1963-),男,博士,教授.研究领域:仿生机器人,机器人机构。

李斌(1963-),男,硕士,研究员.研究领域:仿生机器人,救援机器人。