

针对可变形履带机器人的动态变形方法研究^①

李楠^{②*} 马书根^{***} 李斌^{*} 王明辉^{③*} 王越超^{*}

(^{*}中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

(^{**}日本立命馆大学理工学部机器人学系 滋贺 525-8577, 日本)

(^{***}中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 针对可变形履带机器人在常规变形过程中履带与地面产生的摩擦力会阻碍甚至终止变形过程的问题,提出了一种新颖的动态变形方法。在动态变形过程中,该方法可使运动模块的履带单元辅助运动以配合变形模块的转动,从而将阻碍变形的部分摩擦力转化为推进变形的动力。针对动态变形的动力学仿真分析表明,采用该动态变形方法,可以有效地减小机器人在变形过程中的阻力矩和能量损耗。同时,针对变形过程的能量损耗、阻力矩以及变形空间这些性能指标,采用多目标优化方法使机器人在动态变形过程中得到最佳的综合性能。该方法动态变形的有效性通过可变形履带机器人平台的实验得到了验证。

关键词 可变形,履带机器人,动态变形,能量损耗,变形空间,多目标优化

0 引言

拥有多种构型,并且能够根据工作环境的变化改变自身结构形状的机器人,称作可变形机器人。单一构型的机器人仅在某单一环境中拥有较强的机动性,而可变形机器人在多种环境中均具有较强的机动性。近年来许多研究人员从事了可变形机器人的研究。国外已开发出多种可变形机器人,如具有很强的战场适应性的 PackBot^[1]和 Remotec-Andros robots^[2,3],美国加利福尼亚大学研究的 CONRO^[4,5],德国 ESI 公司研制的 RLMA^[6],以及 Inuk-tun 公司的 VGT-1^[7]等。国内的研究也取得了很大进展,成果有北京航空航天大学研制的可变形履带机器人^[8],哈尔滨工业大学研制的微小型可变形机器人^[9],沈阳自动化研究所研制的可重构轮手一体机器人^[10]和可变形履带机器人 Amoeba-II^[11]等。本实验室对原有的 Amoeba-II 进行了改进,改进后的 Amoeba-II 不仅在地面上具有多种构型以适应各种非结构环境,同时增加了执行水中任务的能力,从而增加了该机器人的两栖环境的适应能力。可变形

履带机器人 Amoeba-II 通过调节接地履带之间的关节角来实现其整体构型的变化。机器人的履带接地面积较大,在常规的变形过程中会产生较大的摩擦阻力,阻碍甚至终止其变形过程。同时,摩擦阻力导致的阻力矩和能量损耗也会缩短电机的使用寿命和机器人的工作时间。为解决其常规变形过程中存在的问题,本文提出了一种动态变形方法。动态变形过程中,通过合理地调节主管变形模块和辅助变形模块之间的运动关系,机器人能够将履带接地面的摩擦力转化为驱动机器人变形的动力,从而减小变形过程中的阻力矩和能量的消耗。

1 可变形履带机器人 Amoeba-II

1.1 机器人构型

移动机器人经常被用来执行侦察、巡视、救援等任务,其工作环境要求机器人不仅能够开阔的环境有较高的机动性,而且要求其具有能够通过一些狭窄的空间和越过一定高度障碍的能力。Amoeba-II 可以根据环境的需要改变自身的构型,从而能够完成这样的任务。

① 863 计划(2007AA041502-5)和国家自然科学基金(60905058)资助项目。

② 男,1983 年生,博士生;研究方向:新型机器人设计与分析,移动机器人;E-mail: linan@sia.cn

③ 通讯作者,E-mail: mhwang@sia.cn

(收稿日期:2010-11-29)

(1) 并排构型

如图 1(a)所示,并排构型下的机器人与地面接地比压均匀分布,能够保证在粗糙或松软地面上行进时具有高机动性。通过调节两个履带速度,机器人可以实现零半径转弯。如图 1(b)所示,当机器人以并排构型运动时,通过调节各模块之间的俯仰角度,能够始终保持其运动模块与地面之间以面接触,从而提升其越障能力。

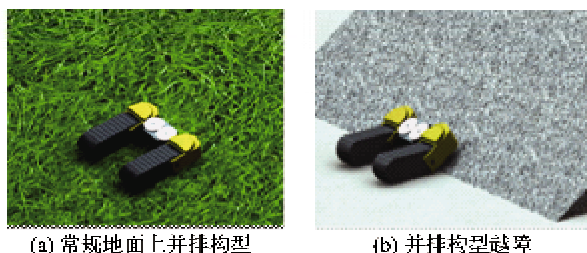


图 1 机器人 Amoeba-II 的并排构型

(2) 直线构型

如图 2(a)所示,由于在宽度方向有较小的尺寸,故而机器人能够在直线构型下顺利通过狭窄的环境,例如倒塌的房屋、狭缝和沟壑。在直线构型下,机器人通过不断地调整各模块的俯仰角度来改变其自身的姿态,从而在翻越楼梯和台阶时拥有更好的机动性能,如图 2(b)所示。

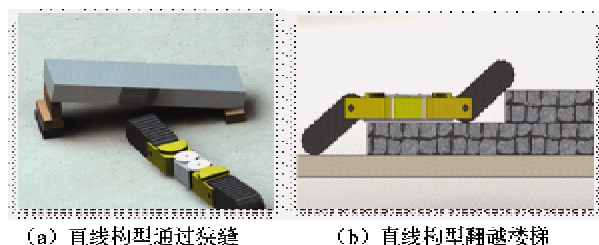


图 2 机器人 Amoeba-II 的直线构型

1.2 机构设计

如图 3 所示,机器人 Amoeba-II 采用了对称分布的机构设计方法,它由驱动模块、俯仰模块和中间的连接模块组成。

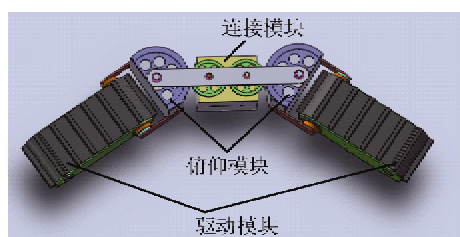


图 3 机器人 Amoeba-II 机构示意图

(1) 驱动模块:如图 4 所示,该驱动模块由橡胶履带、履带驱动电机、俯仰驱动电机、带轮、防水盒和控制器组成。

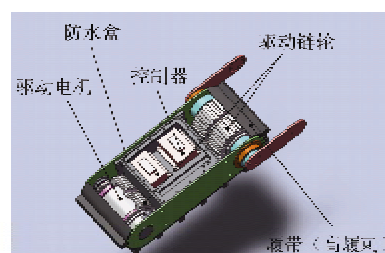


图 4 Amoeba-II 驱动模块示意图

(2) 俯仰模块:如图 5(a)所示,俯仰模块的机构由被动齿轮、防水密封盒和被动的支撑轮组成;如图 5(b)所示,俯仰模块可以用于机器人在垂直方向的姿态调整,从而辅助机器人进行越障。

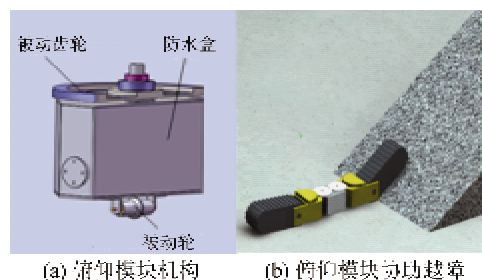


图 5 Amoeba-II 俯仰模块示意图

(3) 连接模块:如图 6 所示,连接模块用于驱动机器人的构型变化以适应环境的变化。连接模块采

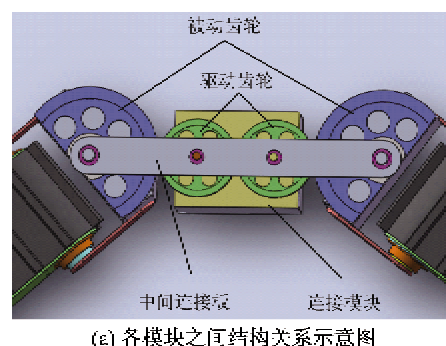


图 6 Amoeba-II 连接模块示意图

用直流电机进行驱动,通过一组蜗轮蜗杆传动,驱动顶部安装的一组啮合齿轮转动,从而带动俯仰模块的两组齿轮进行转动,使机器人实现在直线构型和并排构型之间的转化。

2 机器人 Amoeba-II 动态变形分析

2.1 机器人 Amoeba-II 的变形过程

(1) 常规变形:利用连接模块调整两个驱动模块之间的关节角度以实现机器人自身构型的变化方法,称作常规变形方法。常规变形过程中,仅连接模块独立负责变形,履带不旋转,只是被动地在地面上滑移。履带接地面产生的摩擦力完全转化为变形过程的阻力,因此会有较大的摩擦阻力矩作用在变形驱动电机上,同时也带来较大的能量损耗。这些因素会大幅缩短机器人的工作时间和电机的使用寿命。在粗糙地面上,过大的阻力甚至会损坏机器人的机构并终止变形过程。因此,减小变形过程中所产生的阻力,对于变形过程的顺利进行有着重要的意义。

(2) 动态变形:在变形过程中,运动模块的履带单元产生辅助的相对运动以配合连接模块的转动从而减小摩擦阻力的变形方法,称作动态变形方法,如图 7 所示。动态变形方法可以减小整个变形过程中的阻力作用,使得变形过程能够顺利进行。该方法将变形载荷分配至机器人各模块,起到均匀利用各模块的作用,同时可避免单一模块由于载荷过大而受损的情况发生。动态变形过程中,需要协调变形速度和履带速度两个控制量之间的关系,如果两者之间协调不当,履带旋转不仅不会协助变形过程,反而会产生更大的阻力和能量损耗。因此,需要对机器人动态变形过程进行运动学和动力学分析,以确定两个控制量之间的关系。

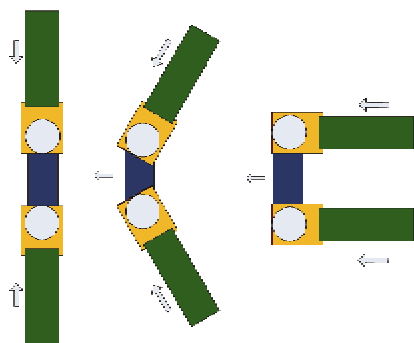


图 7 机器人 Amoeba-II 动态变形过程示意图

2.2 动态变形运动学分析

如图 8 所示,在机器人运动平面建立惯性坐标系 $O-XY$, 原点 O 位于变形前的机器人系统的质心位置,坐标轴 OX 垂直于机器人系统的对称轴方向;同时建立局部坐标系 $O_2-X_2Y_2$, 其原点位于左边运动模块的质心位置,坐标轴 O_2X_2 垂直于左边运动模块的对称轴方向。由于机器人整体设计具有对称性,故可仅对左边驱动模块的运动进行分析。

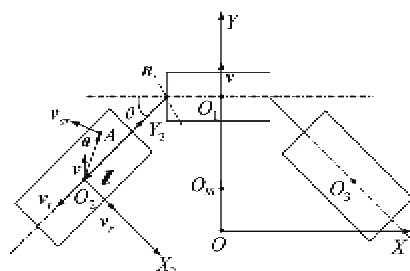


图 8 动态变形运动学模型

在坐标系 $O-XY$ 下, $O_m(x_m, y_m)$ 为机器人的质心位置坐标, $O_1(x_1, y_1)$ 为连接模块的质心位置坐标, $O_2(x_2, y_2)$ 和 $O_3(x_3, y_3)$ 分别为左右的运动模块的质心位置坐标。在变形过程中,俯仰模块和驱动模块之间的关节角未发生变化,所以可将驱动模块和俯仰模块统一为运动模块进行分析。连接模块、左边运动模块和右边运动模块的质量分别为 m_1, m_2 和 m_3 。由于结构的对称性,得到 $m_2 = m_3, x_1 = 0, x_2 = -x_3$ 和 $y_2 = y_3$ 。由此得到 O_m 点的坐标为 $(0, \frac{m_1 y_1 + 2m_2 y_2}{m_1 + 2m_2})$ 。

如图 8 所示, O_1 和 O_2 的几何关系满足 $y_1 - y_2 = L \sin \theta$ 。由此可得整个机器人质心的位置和速度为

$$y_m = y_1 - \frac{2m_2 L \sin \theta}{m_1 + 2m_2} \quad (1)$$

$$v_m = v_1 - \frac{2\theta m_2 L \cos \theta}{m_1 + 2m_2} j \quad (2)$$

式中 j 为 Y 轴方向的单位向量, L 为左运动模块的质心 O_2 到旋转轴 n 之间的距离。如图 8 所示, θ 为左运动模块绕轴线 n 的旋转角度,则 $\dot{\theta}$ 为左运动模块的角速度。

履带接地面上的任意一点 A 的速度为

$$v(a) = v_1 + v_i + v_r + v_{ar} \quad (3)$$

式中 v_1 为连接模块的移动速度, v_i 为左履带转速, v_r 为左运动部分的质心绕左旋转轴 n 的线速度, v_{ar} 为点 A 相对于质心 O_2 的速度。

在坐标系 $O-XY$ 下, v_r 可由变形的旋转速度得到 $v_r = \omega \times l$, 其中 l 为 L 的向量表示形式, ω 为左边运动模块旋转轴 n 的角速度。相对速度 v_a 可由 $v_a = \omega \times a$ 得到, 式中 a 为点 A 在局部坐标系中的向量形式。

在履带不旋转的情况下 ($v_r = 0$), 履带只是被动地绕旋转轴 n 进行滑移。这种情况下, 动态变形方法就退化为常规变形方法。因此, 不需要对常规变形方法进行独立的动力学分析。

2.3 动态变形动力学分析

假设机器人在硬质规则地面上变形左运动模块的履带与地面的摩擦力的合力 f_2 可由在该履带接地面 Ω_2 上的积分

$$f_2 = \int_{\Omega_2} f(a) ds = \int_{\Omega_2} -\mu p(a) \frac{v(a)}{\|v(a)\|} ds \quad (4)$$

得到, 式中 $p(a)$ 为履带的接地面上的点 A 处的接地比压, μ 为履带和地面之间的摩擦系数。

基于摩擦力的计算, 可得动摩擦产生的阻力矩为

$$M_s = \int_{\Omega_2} a \times f(a) ds = \int_{\Omega_2} -\mu p(a) \frac{a \times v(a)}{\|v(a)\|} ds \quad (5)$$

由于机器人的整体设计具有对称性, 整个机器人的合力矩为零, 因此整个机器人不会发生旋转。

根据动量定理, 可得整个机器人的动力学的方程为

$$\begin{aligned} m\dot{v}_m &= 2(f_2 \cdot j) \cdot j \\ &= 2 \int_{\Omega_2} -\mu p(a) \frac{v(a) \cdot j}{\|v(a)\|} ds \cdot j \end{aligned} \quad (6)$$

式中, v_m 为通过式(3)得到的整个机器人的质心的运动速度。

作用在旋转轴上 n 的摩擦力的阻力矩 M 由力矩平移法则可得:

$$M = l \times f_2 + M_s = \int_{\Omega_2} -\mu p(a) \frac{(a + l) \times v(a)}{\|v(a)\|} ds \quad (7)$$

机器人两条履带摩擦产生的能量的损耗 P_{s-all} 可由下式得到^[12]:

$$\begin{aligned} P_{s-all} &= 2 \int_{\Omega_2} P_s(a) ds = 2 \int_{\Omega_2} f(a) \cdot v(a) ds \\ &= 2 \int_{\Omega_2} -\mu p(a) \|v(a)\| ds \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $P_s(a)$ 为单条履带的摩擦损耗。由于结构的对称性, 整个机器人的能量损耗是单条履带的 2 倍。

另外, 在动态变形过程中, 由于履带的转动, 机器人会向前移动一段位移, 因此机器人的变形需要更大的空间。机器人在变形过程中的位移为

$$D = \int_0^T v_m(t) dt \quad (9)$$

式中, T 为整个变形过程所需时间损耗, 可由变形的角速度得到 $T = \frac{\pi/2}{\omega}$ 。

3 Amoeba-II 动态变形仿真及分析

3.1 Amoeba-II 机构和运动参数

基于上节中的动力学分析, 需要进行动力学仿真以分析得到机器人在动态变形过程中的性能。运动模块的尺寸为 $40\text{cm} \times 20\text{cm}$, 质量为 3kg , 连接模块的尺寸为 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$, 质量为 4kg 。运动模块的旋转轴到运动模块的质心位置之间的距离 $L = 40\text{cm}$ 。同时, 假设 Amoeba-II 在混凝土地面上进行变形, 则动摩擦系数 μ 为 0.75 。

3.2 动态变形过程仿真结果及其分析

在动态变形过程中, 需要协调控制变形速度和履带速度两个控制量之间的关系。其中, 变形速度决定了构型之间的转换时间, 变形时间设置为 10s , 则变形关节的角速度 ω 为 $\frac{\pi}{20}\text{rad/s}$ 。设定了变形关节的角速度之后, 只需调节履带速度就可得到机器人在动态变形过程中的性能。

为了得到机器人在常规变形过程中的性能, 可将履带速度设定为 0 ($v_r = 0\text{m/s}$), 则动态变形过程就退化为常规变形过程。

(1) 变形过程能量损耗

在变形过程中, 主要的能量损耗用于克服摩擦力做功, 其中摩擦力包括内部摩擦力和外部的摩擦力, 这些能量损耗最终转化为热量。剩下的能量损耗用于产生动能, 推进机器人产生运动。克服内部摩擦力做功产生的能量损耗基本上是固定的, 因此只需要考虑外部的能量损耗, 即由机器人和地面之间的摩擦力所致的能量损耗。如图 9 所示, 通过式(8)可得机器人在不同速度下能量损耗值。

如图 9 所示, 随着履带速度的增大, 能量损耗在开始阶段会减小, 达到最低点后, 能量损耗又会随着履带速度的增加而增加。在履带速度较小的状态下, 能量损耗主要来自于运动模块绕旋转轴 n 的侧向滑移造成的摩擦力做功。在履带速度较大的状态

下,能量损耗主要来自于履带绕其自身驱动轴的纵向滑移而致的摩擦力做功。如图9所示,两者的能量损耗在履带速度为3m/s和4m/s之间的时候取到平衡点,在这点的能量损耗达到最小值。

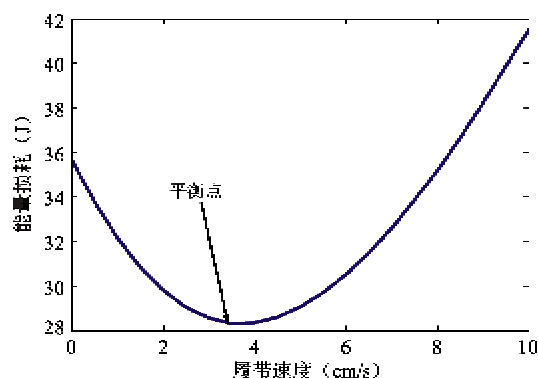


图9 动态变形过程能量损耗与履带速度之间的关系

(2) 连接模块的力矩输出

在机器人变形过程中,中间模块的电机需要提供较大的力矩来克服由履带和地面之间的摩擦力产生的阻力矩。通过式(7)可得在不同履带速度之下的阻力矩 $M(\omega, v_i)$, 仿真结果见图10。

如图10所示,随着履带速度的增加,作用于旋转轴 n 上的阻力矩会相应地减小。在动态变形过程中,合理的调节履带的速度会使部分的摩擦力转化为推动变形过程的动力。图10中,当履带的速度大于4 cm/s时,摩擦力会提供过量的力矩来推进整个变形过程,从而,中间连接模块的驱动电机驱动力矩为负值,该驱动电机由主动驱动变形过程转化为被动的转动,这种情况会对机器人机构造成一定程度的损害。因此需要控制履带驱动速度,防止上述情况的发生。

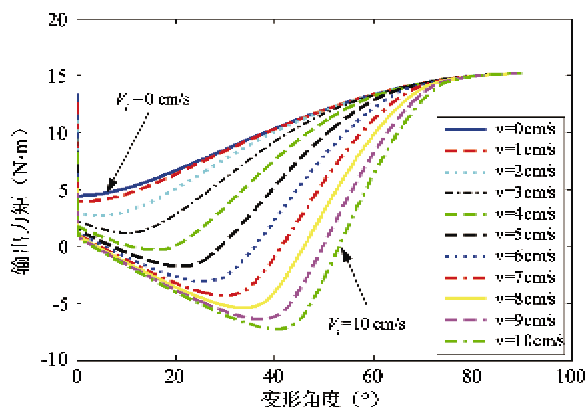


图10 不同履带转速下驱动电机输出力矩与变形角度的关系

(3) 机器人变形空间

在机器人变形过程中,履带与地面的摩擦力向前的分量导致机器人会产生向前的位移,机器人需要比常规变形过程更大的变形空间来完成动态变形过程。如图11所示,机器人在不同履带速度下的变形空间可由式(9)计算得到。图中曲线显示,随着履带速度的增加,机器人所需变形空间随之增加。

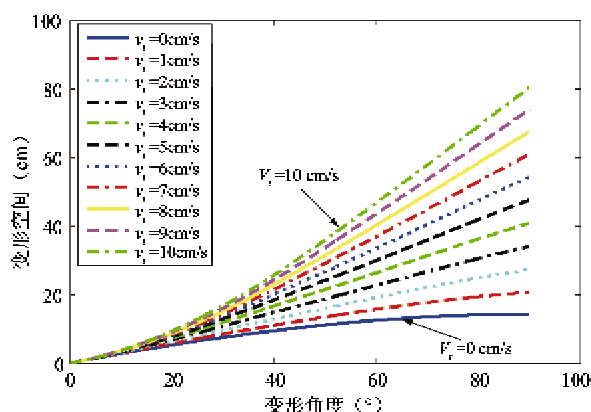


图11 不同履带转速下变形空间与变形角度的关系

3.3 Amoeba-II 动态变形的多目标优化

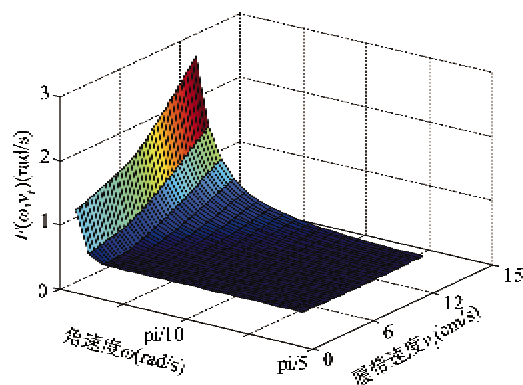
在动态变形过程中,需要将变形过程的能量损耗 $P(\omega, v_i)$ 中间连接模块变形驱动力矩 $M(\omega, v_i)$ 以及变形空间 $D(\omega, v_i)$ 综合起来进行考虑。这些性能指标主要是由履带的驱动速度 v_i 和机器人变形的角速度 ω 决定的。要使这些性能指标同时达到最优值比较困难,因此,为了解决这个问题,需要引入综合的性能指标 $F(\omega, v_i)$:

$$\begin{cases} \min F(\omega, v_i) = Q_1 P(\omega, v_i) + Q_2 M(\omega, v_i) \\ \quad + Q_3 D(\omega, v_i) \\ M(\omega, v_i) \geq 0, P(\omega, v_i) \geq 0, D(\omega, v_i) \geq 0 \\ Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1 \end{cases} \quad (10)$$

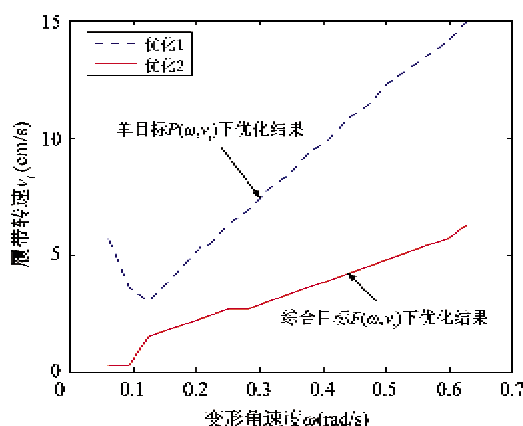
给定各子目标的权值之后 ($Q_1 = 0.3, Q_2 = 0.4, Q_3 = 0.3$), 可利用多目标优化算法来得到机器人动态变形的最优的综合性能,如图12所示。

4 Amoeba-II 动态变形实验

为检验动态变形方法在实际应用中的效果,我们利用样机在实验室进行了动态变形方法的实验(如图13所示),并且与常规变形方法进行对比,以验证动态变形方法的有效性。实验环境为实验室



(a) 多目标优化结果



(b) 单目标优化和多目标优化结果对比

图 12 多目标优化结果及比较

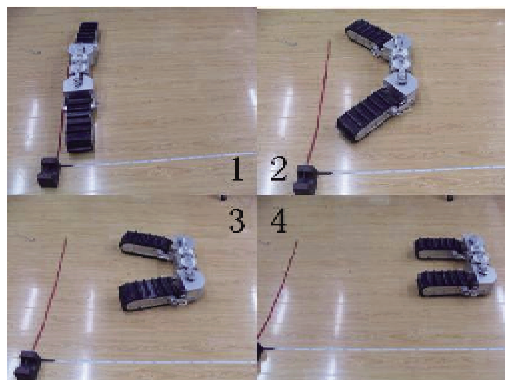


图 13 动态变形过程实验

内环境,木质地板与履带之间的摩擦系数经过测量为 0.163,机器人中间模块的变形的角速度为 $\frac{\pi}{20}$ rad/s。

直流电机输出力矩 T_M 和电机的电流 I_s 关系为

$$T_M = K_T \varphi I_s \quad (11)$$

式中, K_T 是与电机结构有关的常数, φ 为磁通,一般为常量,那么可以得到直流电机输出力矩和电机电

流为正比例关系,从而可利用电机返回电流值来定量描述变形过程的电机输出力矩。同时,两条履带之间的关节角度 θ 与电位计返回值 U 对应关系为

$$\theta = \frac{90U}{720 - 500} \quad (12)$$

于是,可利用电位计返回值来定量描述变形过程中两条履带之间的关节角。

在构型转化过程中,可利用控制器记录连接模块电机电流和电位计的当前返回值,如图 14 和图 15 所示。实验数据显示,履带的复合运动能够有效地减小在变形过程中连接模块所提供的力矩。随着履带速度的增加,所提供力矩会相应减小,但是所需变形空间会相应变大,并且变形位移和履带速度基本为正比例关系,如图 16 所示。综合分析图 14 至图 16,由于机器人在机构方面的限制,当履带速度大于 6cm/s 时,履带复合运动的速度

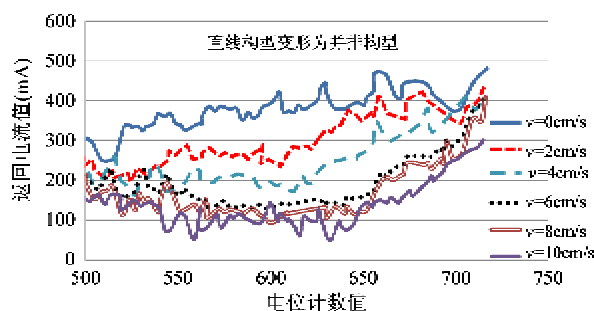


图 14 直线变形为并排电流返回值

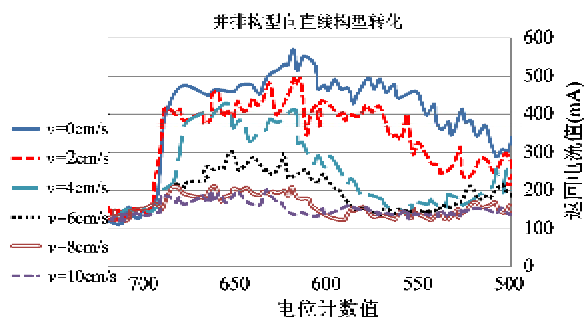


图 15 并排变形为直线电流返回值

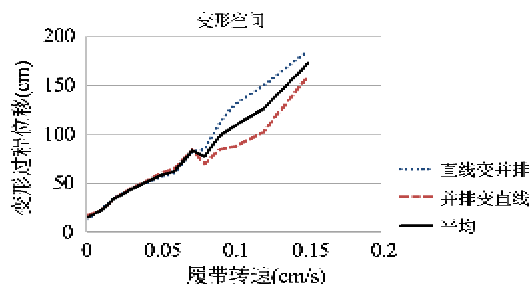


图 16 机器人所需变形空间

增加所带来的连接模块力矩的减少量将变得不明显,而机器人的所需变形空间的增量基本保持不变,因此,这种情况下继续增加履带速度将得不偿失。

5 结 论

针对可变形履带机器人在常规变形过程中摩擦阻力过大的问题,本文提出了一种动态变形方法。该方法能够合理利用变形过程中的摩擦力,提升机器人在变形过程中的机动性能。针对动态变形方法进行了动力学分析,并且通过仿真计算验证了动态变形过程的合理性。同时,本文采用多目标优化算法对动态变形过程进行优化,在变形过程中得到最佳的机动性能。最后,基于可变形机器人平台 Amoeba-II 所进行的实验验证了动态变形的有效性。

在仿真过程中,为了简化计算,将变形的角速度设置为定值,仅调节履带转速以得到各性能指标。在我们后期的研究中,需要同时调节两个控制量以得到更加有效的动态变形过程。

参考文献

- [1] Frost T, Norman C, Pratt S, et al. Derived performance metrics and measurements compared to field experience for the PackBot. In: Proceedings of 2002 PerMIS Workshop, Gaithersburg, USA, 2002. 38-43
- [2] White J R, Sunagawa T. Hazardous-duty robots: experiences and needs. In: Proceedings of International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Tsukuba, Japan, 1989. 262-267
- [3] White J R, Coughlan J, Harvey M, et al. Taking Andros for a walk. *Nuclear Engineering International*, 1989, 34 (415): 52-53
- [4] Costo S, Molino R. A new robotic unit for onboard airplanes bomb disposal. In: Proceedings of the 35th International Symposium on Robotics, Paris, France, 2004. 23-26
- [5] Michaud F. Co-design of Azimuth, a multi-modal robotic platform. In: Proceedings of ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, USA, 2003. 46-50
- [6] Liu Y, Liu G. Track-stair and vehicle manipulator interaction analysis for tracked mobile manipulators climbing stairs. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Arlington, USA, 2008. 157-162
- [7] Munkeby S, Jones D, Bugg G, et al. Applications for the Matilda robotic platform. *SPIE - Unmanned Ground Vehicle Technology IV*, 2002, 47(15): 206-213
- [8] 王田苗, 周丹, 陈殿生. 可重构履带机器人的机构设计与控制方法实现. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(17): 705-708
- [9] Wang M, Ma S, He X, et al. Motion planning for a reconfigurable robot to cross an obstacle. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luoyang, China, 2006. 1291-1296
- [10] 贺鑫元, 马书根, 李斌等. 机器人单体动力学研究. *中国机械工程*, 2005, 16(21): 1889-1894
- [11] Ye C, Ma S, Li B. Design and basic experiments of a shape-shifting mobile robot for urban search and rescue. In: Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006. 3994-3999
- [12] Morales J, Martine J L, Meadow A. Power consumption modeling of skid-steer tracked mobile robots on rigid terrain. *IEEE Trans on Robotics*, 2009, 25(5): 1098-1108

A dynamic shape-shifting method for a transformable tracked robot

Li Nan^{***}, Ma Shugen^{**}, Li Bin^{*}, Wang Minghui^{*}, Wang Yuechao^{*}

(^{*} State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(^{**} Department of Robotics, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu-shi, Shiga 525-8755, Japan)

(^{***} Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract

The problem in a conventional shape-shifting process for a transformable tracked robot that the friction force between the tracks and the ground may embarrass or even stop the process of the shape-shifting, can be avoided by using the novel dynamic shape-shifting method proposed in the paper. When using the method, the tracks rotate during dynamic shape-shifting to assist the motion of the module which is in charge of the transformation, so part of the friction force can be converted into the propulsion force for the transformation by the assisting motion of the tracks. The dynamic analysis of dynamic shape-shifting shows that the dynamic shape-shifting can reduce the resistance torque and the power loss efficiently in the transformation. The multi-objective optimization method can be used to get the optimal comprehensive performance. The experiments of the dynamic shape-shifting on the transformable tracked robot Amoeba-II verified the effectiveness of this method.

Key words: transformable, tracked robot, dynamic shape-shifting, power loss, transformation space, multi-objective optimization