

文章编号:1006-2467(2006)11-1832-04

自行直立双轮移动机器人设计与实现

缪寿洪, 曹其新, 孔祥宣
(上海交通大学 机器人研究所, 上海 200240)

摘要: 提出了一种使双轮移动机器人在无人协助时实现其机身从翻倒平卧状态自行直立的方法. 该方法采用近似陀螺原理, 对一高速转子实施强迫进动, 以进动产生的陀螺力矩带动机器人自行直立. 从理论上证明了该方法的可行性, 并用软件 ADAMS 仿真实现了双轮移动机器人的自行直立.

关键词: 双轮移动机器人; 陀螺力矩; 进动

中图分类号: TP 24 **文献标识码:** A

Design of a Self-Standing Two-Wheeled Mobile Robot

MIAO Shou-hong, CAO Qi-xin, KONG Xiang-xuan
(Inst. of Robotics, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200240, China)

Abstract: A moving two-wheeled mobile robot will easily overturn when it is suffered by sudden impact or other disturbance. This paper presented a new method with which an overturned two-wheeled mobile robot will stand by itself. This method utilizes a gyroscopic moment which is produced from the forced precession of a high-speed rotor whose axis is changed by another moment, to upright the robot's body. The feasibility of the method is proved in theory.

Key words: two-wheeled mobile robot; gyroscopic moment; precession

随着机器人技术的发展和成熟,其应用范围不断扩大.然而在一些比较复杂(比如具有震动、风力或冲击等干扰)的环境中,传统的多轮移动机器人受冲击被打翻后将无法正常作业.因此,设计一种具有能够自行直立的机器人显得很有必要.鉴于多轮移动机器人运动方式的限制,目前并无有效的方法实现其自行直立.由于体积小、外形简单、移动灵活等优点,尤其是采用动态平衡原理移动的独特运动方式,使双轮移动机器人成为研究自行直立的最好对象.目前国内外对双轮机器人运动控制的研究逐渐成熟^[1-4],并且已有相关的研究成果应用于日常生活

中,比如 SEGWAY 移动交通工具.

双轮移动机器人从本质上讲是不稳定的,这是由于其仅有 2 个支撑点.目前对于启动双轮移动机器人移动都是通过人为帮助使其首先从平卧状态扶正到竖直状态,然后才开动机器人使之运动.若无人协助该类型机器人还无法仅靠自身实现这种状态的改变.考虑到惯性技术的特点(主要是进动的一些特点),本文将惯性技术同动态平衡原理相结合,通过使双轮移动机器人以某种方式运动,强迫安装在机器人上高速旋转的转子进动,利用进动产生的反力矩改变机器人状态,从而达到该机器人自行直立

收稿日期:2005-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60443007)

作者简介:缪寿洪(1978-),男,浙江瑞安人,博士生,主要从事智能移动机器人研究, E-mail: molsler@sjtu.edu.cn.

曹其新(联系人),男,教授,博士生导师,电话(Tel.): 021-34206790; E-mail: qxcao@sjtu.edu.cn.

的目的.

1 力学模型的建立与分析

相对于一般的双轮移动机器人,本文所述的双轮移动机器人多了一个主要的部件:高速转子.为了分析方便,将双轮移动机器人从机构上进行简化,只取主要部件描述并从结构上将其分为 3 部分:2 个轮子、转子和除两者之外的其他硬件部分(称之为本体,见图 1).本体与双轮之间是旋转的关系.双轮移动机器人的不稳定表现在本体会相对双轮轴线(双轮同轴安装)转动直至本体的顶端同地面接触,即本体从竖直状态转变到平卧状态(见图 1).

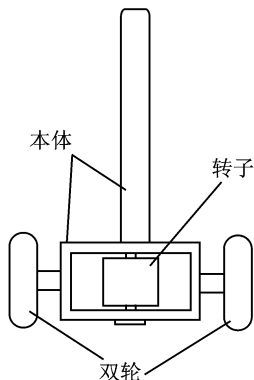


图 1 双轮移动机器人结构简图

Fig. 1 Sketch of the two-wheeled mobile robot

改变双轮移动机器人的本体状态,从平卧状态到竖直状态,必须有一个外力矩克服重力的影响,如何获取足够大的该力矩是关键所在.考虑到高速旋转物体在转动轴改变时会产生陀螺力矩,这种力矩不是作用在转子本身,而是作用在对转子施加外力的物体之上(支承约束),因此将一高速旋转物体安装在双轮移动机器人上面,然后通过转动该机器人使其上的旋转物体转轴空间位置发生变化,必然会有陀螺力矩产生,通过设定高速旋转物体(此处指图 1 中的转子)的空间位置、转速、转向和机器人的运动方向,便可以将该陀螺力矩用来改变机器人本体状态.

为了分析方便,将双轮移动机器人从机构上简化,只取主要部件对其设定坐标系和相关参数.如图 2 所示, $Oxyz$ 为固定坐标系,对应的单位向量分别为 i, j, k ; $Ox'y'z'$ 为固连在转子上的坐标系,随转子一起运动,对应的单位向量分别为 i', j', k' ; ω_0 为两个轮子的转动角速度; ω_1 为机器人本体水平角速度矢量,等于转子进动角速度; ω_2 为转子相对 z 轴的旋转速度,即自转角速度. P 为本体质心; m_2, r, h_2 分别为转子质量、半径和高; m_1, I_G, h_1 分别为本体

的质量、相对 $O_1 O_2$ 轴的转动惯量、质心 P 距 O 点的距离($OP = h_1$); O_1, O_2 分别为 2 个轮子的中心点; R 为轮子半径; D 为 O_1 与 O_2 之间的距离.

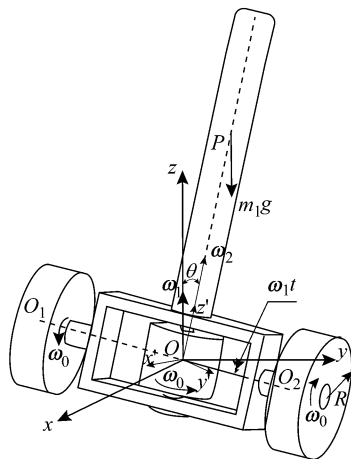


图 2 坐标系设定

Fig. 2 Coordinate systems of the two-wheeled mobile robot

获取合适的陀螺力矩改变机器人本体状态必须满足以下条件:

(1) 转子安装时让其质心同 O 点重合(为了后面简化定量分析需要),并且要高速旋转,其转向必须满足转子高速旋转产生的角动量的方向为从 O 点指向质心 P 方向,如图 2 所示.

(2) 机器人的双轮必须按图 2 中所示的方向旋转(两轮转向相反).为简化分析,使双轮旋转的角速度一样,均为 ω_0 ,则整个机器人运动时有一点保持不动,即在机器人的运动过程中, O 点始终不动.俯视时机器人是绕 O 点逆时针旋转(也即转子运动是绕 O 的定点运动),角速度为 ω_1 ,其方向朝上(同 z 轴重合).

由于转子安装在本体上,整个机器人绕 O 点逆时针运动同时也是旋转轴 z 轴进动的过程,而 z 轴的进动必然需要外力矩,它由转子支承轴承提供,根据牛顿第三定律,这个外力矩的反作用力矩即陀螺力矩就会通过支承轴承作用到双轮移动机器人的本体上,该陀螺力矩作用的结果根据付科规则^[5]为:力图使自转角速度矢量沿最短途径与进动角速度矢量重合,而本文转子进动角速度矢量方向是朝上的(图 2 中 ω_1 的方向),故该陀螺力矩作用的结果就是使自转轴 z 轴趋于朝上同 z 轴重合,也即双轮移动机器人本体趋于直立状态.

进一步分析该陀螺力矩的作用效果,在 $Oxyz$ 坐标系中转子的角速度为

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 + \dot{\theta}n \quad (1)$$

式中: θ 为章动角,如图 3 所示,章动角速度矢量 n

方向为从 O 指向 O_2 . 把转子单独分离进行分析, 将 ω_1 沿 ω_2 方向及垂直于 ω_2 的方向分解, 并设 $\omega_1 = \omega_{11} + \omega_{12}$, 且有

$$\omega_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \omega_2 \cos \theta \quad (2)$$

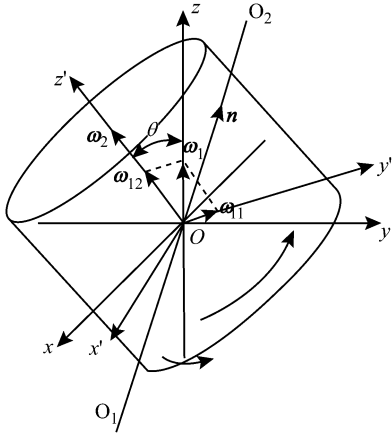


图3 转子定点运动分析

Fig. 3 Coordinate system of the rotor

由于转子是均质旋转体, 通过 O 点与转轴垂直的任意 2 条直线都是惯性主轴, 且相对所有这些直线的转动惯量相同, 并设为 I_0 . 故转子角动量为

$$\begin{aligned} L &= I_z (\omega_2 + \omega_{12}) + I_0 \omega_{11} + I_0 \dot{\theta} n = \\ &= I_z (\omega_2 + \omega_{12}) + I_0 (\omega_1 - \omega_{12}) + I_0 \dot{\theta} n = \\ &= \left[I_z + (I_z - I_0) \frac{\omega_1}{\omega_2} \cos \theta \right] \omega_2 + I_0 \omega_1 + I_0 \dot{\theta} n \end{aligned} \quad (3)$$

由于 $\omega_2 \gg \omega_1$ 且本体的质量占主要部分, 故 θ 的值不会太大, 在 θ 的某微小范围内可以近似认为是规则进动, 因此有如下等式:

$$\begin{aligned} M &\approx \omega_1 \times L = \omega_1 \times \left\{ \left[I_z + (I_z - I_0) \frac{\omega_1}{\omega_2} \cos \theta \right] \omega_2 + I_0 \omega_1 + I_0 \dot{\theta} n \right\} = \\ &= \left[I_z + (I_z - I_0) \frac{\omega_1}{\omega_2} \cos \theta \right] \omega_1 \times \omega_2 + \\ &+ I_0 \dot{\theta} \omega_1 \times n = M_1 + M_2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中:

$$I_z = \frac{1}{2} m_2 r^2, \quad I_0 = \frac{1}{12} m_2 (3r^2 + h_2^2)$$

$$M_1 = \left[I_z + (I_z - I_0) \frac{\omega_1}{\omega_2} \cos \theta \right] \omega_1 \times \omega_2$$

$$M_2 = I_0 \dot{\theta} \omega_1 \times n$$

将 M_1 和 M_2 的反作用力矩分别记为 M_1' 和 M_2' , 并且有:

$$\begin{aligned} M_1' &= -M_1 = - \left[I_z + (I_z - I_0) \frac{\omega_1}{\omega_2} \cos \theta \right] \omega_1 \times \omega_2 = \\ &= \left[I_z + (I_z - I_0) \frac{\omega_1}{\omega_2} \cos \theta \right] \omega_2 \times \omega_1 \end{aligned} \quad (5)$$

$$M_2' = -M_2 = -I_0 \dot{\theta} \omega_1 \times n = I_0 \dot{\theta} n \times \omega_1 \quad (6)$$

注意到矢量 ω_1 和 ω_2 均与矢量 n 垂直, 不难判断 $\omega_2 \times \omega_1$ 和 $n \times \omega_1$ 垂直, 因此 M_1' 与 M_2' 垂直, 两者都作用在双轮移动机器人的本体上. M_2' 作用的效果是使机器人本体绕着 x 轴旋转, 易知 $|M_2'|$ 值不大, 作用效果可以忽略. M_1' 的作用效果使机器人本体朝竖直方向转动, 如图 2 所示; 只要 M_1' 足够大至能够克服本体的重力力矩, 机器人本体就会从平卧状态转变到竖直状态, 故对于高速转子进动产生的陀螺力矩可以用来使平卧的双轮移动机器人竖立起来.

2 动力学分析

一般情况下双轮移动机器人的本体质量占整个机器人质量的绝大部分, 如果质心远离定点 O , 则本体相对转轴 $O_1 O_2$ 的转动惯量就会很大, 改变状态需要很大的陀螺力矩. 不同的质心质量和位置需要不同的陀螺力矩来改变质心状态, 因此有必要进一步确定转子的各个参数 (包括转子的质量、转动惯量和转速等) 对改变本体状态的定量关系.

根据上述分析已知陀螺力矩只有 M_1' 的作用效果能够改变本体状态, 因此只分析 M_1' 对于改变本体状态的定量关系. 由式 (5) 知

$$\begin{aligned} M_1' &= -M_1 = \left[I_z + (I_z - I_0) \frac{\omega_1}{\omega_2} \cos \theta \right] \omega_2 \times \omega_1 = \\ &= \left[I_z + (I_z - I_0) \frac{\omega_1}{\omega_2} \cos \theta \right] \omega_1 \omega_2 k' \times k \end{aligned} \quad (7)$$

又有

$$k' = -\sin \theta \cos \omega_1 t \cdot i - \sin \theta \sin \omega_1 t \cdot j + \cos \theta \cdot k$$

将上式代入式 (7) 得

$$\begin{aligned} M_1' &= - \left[I_z + (I_z - I_0) \frac{\omega_1}{\omega_2} \cos \theta \right] \omega_1 \omega_2 \sin \theta \times \\ &= (\sin \omega_1 t \cdot i - \cos \omega_1 t \cdot j) \end{aligned} \quad (8)$$

另外, 质心处重力 G 相对转轴 $O_1 O_2$ 的阻力矩为

$$M_G = m_1 g h_1 \sin \theta (\sin \omega_1 t \cdot i - \cos \omega_1 t \cdot j) \quad (9)$$

比较式 (8)、(9) 可知矢量 M_1' 和 M_G 在同一轴线上, 且方向相反, 这再一次证明了 M_1' 可以改变本体状态. 因此只要 $|M_1'| > |M_G|$, 则理论上双轮移动机器人本体能够从平卧状态转变到竖直状态; 如果 $|M_1'| \leq |M_G|$, 则高速转子在做规则进动.

对于不等式 $|M_1'| > |M_G|$ 进行简化得:

$$6\omega_1 \omega_2 + (3 - h_2^2 / r^2) \omega_2^2 \cos \theta > 12 m_1 g h_1 / (m_2 r^2) \quad (10)$$

由于 $\omega_2 \gg \omega_1$, 式(10)左边的第二项值要远比第一项小, 简化计算将第二项省略, 并将 $\omega_1 = 2R\omega_0/d$ 和 $\omega_2 = 2\pi n_2/60$ 代入式(10)得:

$$n_2 r^2 > \frac{30}{\pi} \frac{m_1}{m_2} \frac{d}{R} \frac{gh_1}{\omega_0} \quad (11)$$

式中, n_2 为转子转速. 对不等式(11)进行讨论:

(1) 设 $\lambda = m_1/m_2$, 考虑到转子及双轮驱动电动机安装空间的要求以及保留一定的余度, 设定 $d = 5R$, 则不等式(11)转化为

$$n_2 r^2 > 150\lambda g h_1 / (\pi \omega_0) \quad (12)$$

(2) 以双轮移动机器人模型的设计参数为例对转子的各个参数进行估算. 一般 $m_1 = 10$ kg 左右(比如著名的 Joe^[2] 双轮移动机器人总体质量约为 12 kg), 取 $m_1 = 10$ kg, 设 $\lambda = 20$, 则 $m_2 = 0.5$ kg, 如此质量的转子获取高转速并不十分困难. 由于大部分的质量集中在本体部分, 参照 Joe 机器人, 设 $h_1 = 0.3$ m (Joe 机器人的总高为 0.65 m, $h_1 = 0.3$ m 比较合理). 另外, 本文采用的 maxon 电动机其输出旋转频率为 20 s^{-1} . 根据以上数据, 陀螺力矩和机器人本体阻力矩相等时转子转速 n_2 和半径 r 的关系曲线如图 4 所示.

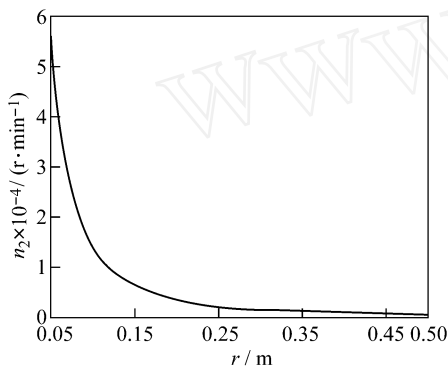


图 4 转子转速与半径的关系

Fig. 4 The relation between rotor's velocity and wheel radius

(3) 由图 4 可知转子半径越大, 对转速的要求越低, 也就越容易实现. 然而并不是 r 值越大越好, 对 r 值还有一定的限制: $r < R$. r 越大, 则轮子半径也越大. 当 $r > 0.2$ m 时, 双轮移动机器人的轮子直径 $D = 2R > 0.4$ m, 机器人外观比较不协调、体积也会较大. 因此, r 的取值不宜太大.

(4) 仅 $|M_1'| > |M_G|$ 还远远不够, 因为对于双轮移动机器人即使质心位置很靠近定点 O , 即 h_1 很小, 其相对 O_1O_2 轴的转动惯量也有可能很大. 如果其本体关于双轮转轴 O_1O_2 的转动惯量较大, 若 $|M_1'|$ 值同 $|M_G|$ 值接近, 实现该类型机器人自行直立的过程将会非常缓慢, 从而没有实际意义. 因此如

何获取较大的陀螺力矩 $|M_1'|$ 始终是一个关键问题.

根据上述分析, 具有较大转子半径、高速旋转的转子和较高平面旋转速度的双轮移动机器人较易获取较大的陀螺力矩实现该类型机器人自行直立.

3 仿 真

以上推导的结果采用 ADAMS 进行仿真, 结果如图 5、6 所示.

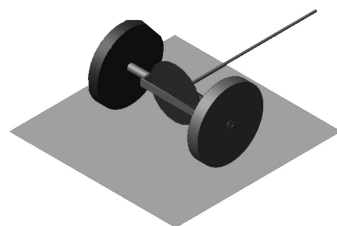


图 5 虚拟样机

Fig. 5 The virtual model

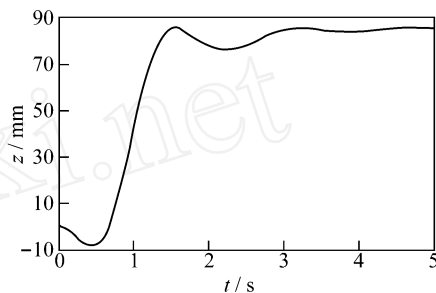


图 6 本体质心位置

Fig. 6 The position coordinates for the centre of mass of body

由于只需证明原理和方法的可行性, 对上述机器人的外形和估计的各种参数此处略作改变, 并在 ADAMS 中绘制虚拟样机模型, 如图 5 所示. 该虚拟样机的主要参数如下: $n_2 = 6\,000 \sim 7\,000 \text{ r/min}$; $r = 120 \text{ mm}$; $z = 5 \text{ mm}$, $\omega_0 = 20 \sim 30 \text{ s}^{-1}$. 首先对图 5 中的各个部件设定好约束、运动和施加力作用后, 确定地面的静摩擦系数和动摩擦系数, 再对其进行动力学仿真, 并输出本体质心的坐标位置, 如图 6 所示.

图 6 中曲线代表本体质心的竖直坐标位置. 由于虚拟样机的初始位置是水平放置的, 因而图中本体质心坐标在重力场作用下初始阶段有一个下沉的过程, 之后因为力矩 M_1' 的作用逐渐趋于直立, 在到达最高点后, 由于还有角速度本体不会立即停止, 而是继续朝前转动然后又被 M_1' 拉回最高点位置, 如此反复直至趋于平稳. 图 6 仿真结果证明了采用该方法能够使双轮移动机器人自行直立.

(下转第 1841 页)

系.由图可见,很容易发现随着插入力及弹性的增大,相应的变形量及插入量随之增加.比较图 6(a)与(b)可见,随着变形量的增大,插入增量也增加.因此,如果材料有足够的弹性,增大插入力可以在一定程度上缓解或排除楔紧现象.当然,这将产生很大的接触应力.

4 结 语

本文提出了近刚性弹性装配的摩擦接触问题,并对其约束系统进行了接触动力学建模分析.在库仑摩擦模型及接触动力学模型的基础上,根据方程系统中系数矩阵的奇异性来分析相应的卡阻、楔紧现象.根据系统的运动学及动力学行为对系统的卡阻现象进行了系统分析,而楔紧是一种静态几何现象.发生楔紧时,由于弹性变形的发生,系统的反作用力是不确定的,在接触区域存储弹性变形能.利用赫兹应力分析,可知楔紧的发生率并不高,尤其在自动化装配系统中.如果装配部件的弹性足够大,插入力不破坏环境设备及装配件本身,楔紧现象是可以避免的,且随着设备承载能力的增大及材料弹性的增强,楔紧的发生几率减小.

参考文献:

- [1] Mason M T, Wang Y. On the inconsistency of rigid-body frictional planar mechanics[C]// **IEEE Conf Robotic and Automation**. Philadelphia, Pa, USA: IEEE, 1988: 524 - 528.
- [2] Wang Y, Mason M T. Modeling impact dynamics for robotic operations[C]// **IEEE Int Conf Robotics and**

Automation. Raleigh, NC, USA: IEEE, 1987: 678 - 685.

- [3] Rajan V T, Burrige R, Schwartz J T. Dynamics of a rigid body in frictional contact with rigid walls[C]// **IEEE Int Conf Robotics and Automation**. Raleigh, NC, USA: IEEE, 1987: 671 - 677.
- [4] 梅凤翔,刘桂林. 分析力学基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,1987.
- [5] Austin D, McCarragher B. Force control command synthesis for assembly using a discrete event framework[C]// **IEEE Int Conf on Robotics and Automation**. Albuquerque, New Mexico, USA: IEEE, 1997: 933 - 938.
- [6] Sturges R H, Laowattana S. Passive assembly of non-axisymmetric rigid parts[C]// **IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and System (IROS '94)**. Munich, Germany: IEEE, 1994:1218 - 1225.
- [7] Asada H, Kakumoto Y. The dynamic RCC hand for high-speed assembly[C]// **IEEE Int Conf on Robotics and Automation**. Philadelphia, Pa, USA: IEEE, 1988: 120 - 125.
- [8] Whitney D E. Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts[J]. **J of Dynamic Systems, Measurement and Control**, 1982,104(2): 65 - 77.
- [9] Villarreal A, Asada H. A geometric representation of distributed compliance for the assembly of flexible parts[C]// **IEEE Conf on Robotics and Automation**. Sacramento, California, USA: IEEE, 1991: 2708 - 2715.
- [10] 万长森. 滚动轴承的分析方法[M]. 北京:机械工业出版社,1985.

(上接第 1835 页)

4 结 语

本文介绍了一种利用高速转子强迫进动产生的陀螺力矩使双轮移动机器人能够从平卧状态自行直立的方法,从理论上证明了该方法的可行性,用 ADAMS 从动力学分析角度证明了能够实现该类型机器人的自行直立.定量分析了转子的一些参数对实现该类型机器人自行直立的影响.得出的一些结果对于设计自行直立双轮移动机器人具有一定的参考意义.

参考文献:

- [1] Baloh M, Parent M. Modeling and model verification of an intelligent self-balancing two-wheeled vehicle for

an autonomous urban transportation system[C]// **Conf Comp Intelligence, Robotics and Autonomous Systems**. Singapore:[s.n.], 2003:101 - 107.

- [2] Grasser F, D'Arrigo A, Colombi S, et al. Joe: A mobile, inverted pendulum[J]. **IEEE Trans Industrial Electronics**, 2002, 49(1):107 - 114.
- [3] Hemami H, Weimer F, Koozekanani S. Some aspects of the inverted pendulum problem for modeling of locomotion systems[J]. **Automatic Control**, 1973, 18(6): 658 - 661.
- [4] Pathak K, Franch J, Agrawal S K. Velocity control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization[J]. **Robotics**, 2005, 21(3): 505 - 513.
- [5] 肖尚彬,董秋泉. 陀螺力学[M]. 北京:人民教育出版社,1980.