[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.01.006

基于驱动轮同步转向机构的全向移动机器人

阴贺生^{1,2},张秋菊^{1,2},宁萌^{1,2}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘 要:针对现有轮式全向移动机器人在工程实际应用中存在的同步转向能力差的问题,基于全向移动的轮式机构,设 计了一种全向轮同步转向机构,以实现一个步进电机控制4个驱动轮同步转向。分析该转向机构的工作机理,并将该转 向机构应用于全向移动机器人,在此基础上研制出一款主要应用于食品厂材料搬运工作的产品样机。通过对机器人进 行运动学分析,得到了输入转速与机器人运动速度之间的关系,验证了该机器人的全向移动功能,降低了轮式全向移动 机器人控制难度。研究实现了机器人高速度、高精度、高稳定性全向移动。

关 键 词:全向移动机器人;转向机构;运动学分析;驱动轮

中图分类号:TP242.6 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)01-0024-05

Design of Synchronous Steering Structure of Powered Wheel for Omnidirectional Mobile Robot

YIN Hesheng^{1,2}, ZHANG Qiuju^{1,2}, NING Meng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor synchronization ability of existing rounded omnidirectional mobile robot in engineering application, based on wheeled omnidirectional moving mechanism, an omnidirectional synchronous steering mechanism was designed and it can achieve a stepper motor control four drive wheel synchronous steering. The working mechanism of the steering mechanism was analyzed and the steering mechanism was applied to an omnidirectional mobile robot. On this basis, a product prototype was developed mainly used in food manufacturer material handling. The kinematics of the robot had been analyzed, from which the interrelationship of the input motor speed and the robot's ability of the omnidirectional mobility could be obtained. The result of kinematics analyzing the robot's ability of the omnidirectional mobility can be testified and the foundation of the robot's motion control can be provided.

Keywords: omnidirectional mobile robot; steering mechanism; kinematics analysis; drive wheel

移动机器人根据运动方式的不同,主要分为轮式、 履带式和腿式3大类^[13]。伴随着科技和工业的进步, 移动机器人通过不同运动方式的结合使得行走机构得 到了新的发展,出现轮腿、履腿、轮履及轮履腿等机器 人^[46],这类机器人统称为混合机器人。

轮式移动机器人具有机动灵活、运行稳定,速度快

及载质量大^[78]等特点,广泛应用于工程实际当中。目前全向轮和转向机构是轮式全向移动机器人研究的热点。全向轮主要包括麦克纳姆轮、正交轮和连续切换轮等^[9];转向结构分为滑动转向、艾克曼转向、全轮转向、轴-关节式转向及车体-关节式转向等^[10]。

澳大利亚卧龙岗大学开发了一款名为 Titan 的移

收稿日期:2017-07-26;修回日期:2017-11-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51575236);2016 年度江苏省普通高校专业学位研究生实践创新计划项目(SJLX16_0486)。

第一作者简介:阴贺生(1992),男,山东肥城人,硕士研究生,主要研究方向为智能装备与机器人技术。通信作者:张秋菊(1963),女,四川乐至人,教授,博士生导师,主要研究方向为机械动态分析与优化设计、机械 CAD/CAE/CAM/CNC 和数控与机器人技术。E-mail:6150805054@ vip. jiangnan. edu. cn

动机器人,运用了艾克曼转向机构^[11],4个车轮中的2 个前轮设计为自由万向轮,转向形式为艾克曼转向,2 个后轮由电机驱动并且差速配合完成机器人转向。滑 动转向结构在日本鸟取大学开发设计的 DREAM-1 机 器人^[12]以及加拿大综合理工大学设计研发的 Pioneer 3-AT 机器人^[13]上得到了有效的应用。移动机器人均 有4个车轮,通过2个电机分别控制前后车轮,采用电 机差速来实现机器人运动控制。

目前国内外轮式全向移动机器人多采用麦克纳姆 轮作为机器人全向轮。该全向轮由瑞典的麦克纳姆公 司设计发明,其主要特点在于滚轮自身相对轮轴倾斜 并且规则分布在轮缘周围,靠滚轮与地面的摩擦可实 现机器人横向滑移。但是麦克纳姆全向轮与地面的摩 擦导致机器人运行时震动大、噪声大[14]。传统4轮全 向机器人电机数目多、控制难度大、动作协调性差且运 动形式单一。针对上述存在的问题,课题组在传统轮 式全向移动机器人的基础上进行创新,设计开发了一 种驱动轮同步转向结构,可以实现一个步进电机控制 4 个驱动轮同步转向。课题组主要研究了全向移动机 器人驱动轮同步转向机构以及整机运动性能,以期降 低传统轮式全向移动机器人控制难度,实现机器人高 速度、高精度、高稳定性全向移动。

驱动轮同步转向结构设计 1

1.1 驱动轮同步转向结构设计

如图1所示,全向移动机器人轮式全向轮由转向 电机和驱动电机提供动力,转向电机控制全向轮转向, 驱动电机控制全向轮滚动,因此只要协调配合4个全 向轮的动作就可以实现对机器人的运动控制。



驱动电机

图1 全向移动机器人全向轮实物图 Figure 1 Physical prototype of omnidirectional round of omnidirectional mobile robot 全向移动机器人有4个完全相同的全向轮,当机 器人转向时,需要4个转向电机同步工作,并且需要4

个驱动电机配合同时工作,这对移动机器人8个电机 的配合提出了很高的要求,增加了控制算法的复杂性, 并且会造成全向移动机器人运动不稳定。为了解决上 述问题,必须对机器人转向结构进行改进。为此,考虑 在各个转向传动系统之间加入1个同步转向机构,利 用该机构具有的1个输入可以产生4个同步输出的特 性,使全向移动机器人4个驱动轮做到同步转向。



1-齿轮齿条传动系;2-锥齿轮传动系;3-螺旋齿轮传动系;4-滑轨组件;5-转向轴。 图2 转向机构

Figure 2 Steering mechanism

Pro/E环境下转向机构三维图如图2所示,转向 机构由螺旋齿轮传动系3、锥齿轮传动系2、齿轮齿条 传动系1、滑轨组件4及转向轴5组成,可实现驱动轮 的0°~360°转动。螺旋齿轮传动系包括主动螺旋齿 轮、从动螺旋齿轮及空间交错轴。其中交错轴包含2 根轴,2根轴异面垂直安装,且有2个螺旋齿轮分别安 装在交错轴上。锥齿轮传动系包括主动锥齿轮和从动 锥齿轮,分别安装在2根传动轴上配合传动。移动机 器人共含有2组锥齿轮传动组件,分别安装在其前后 两侧。齿轮齿条传动系包括主动直齿轮、从动直齿轮、 齿条及齿条支撑板。滑轨组件包括直线导轨、导轨支 板及支撑架,用来作为齿条滑动的移动载体。

2 全向移动机器人结构设计及其工作原理 2.1 全向移动机器人结构设计

如图3所示,课题组所研究的轮式全向移动机器 人是采用由单个步进电机利用3级齿轮传动系控制4 个驱动轮实现同步转向的结构形式,整个机器人主要 分为4个部分,包括移动机器人框架、转向驱动装置、 转向机构及驱动轮。转向驱动装置位于移动平台框架 内部,由步进电机和减速器以及联轴器组成;转向机构 由螺旋齿轮传动系、锥齿轮传动系、齿轮齿条传动系、 导轨滑块及转向轴组成。齿轮齿条传动系中齿轮为带 法兰齿轮,法兰通过螺栓与齿轮连接并且内部装有衬 套,衬套用来夹紧转向轴,转向轴一端衬在齿轮内部, 另一端靠螺栓连接全向轮;转向驱动装置利用1个步 进电机通过转向机构传递动力使全向轮转向。每个全 向轮内部自带伺服电机驱动平台移动,二者相互配合 实现机器人的全向移动。移动平台框架采用30 mm × 30 mm 的铝型材框架立方体结构,为保证其刚度,框架 在铰接的基础上又采用厚度为15 mm 的钢板在铰接 处加固。机器人外形尺寸为715 mm × 600 mm × 500 mm(长×宽×高),总质量为45 kg。

机器人框架 驱动轮 转向驱动装置 转向机构



图 3 全向移动机器人 Figure 3 Omnidirectional mobile robot

2.2 驱动轮同步转向机构工作原理

图4所示为加入同步转向机构的全向移动机器人 同步转向示意图。图4中,驱动轮同步转向分为3个 传动阶段:螺旋齿轮传动、锥齿轮传动及齿轮齿条传 动。驱动轮的转向通过3级传动配合实现,因此转向 机构的耦合运动控制是完成机器人转向的关键。全向 移动机器人采用轮式结构,具有4个驱动轮,其实现全 向转向运动的过程为:转向驱动装置中的步进电机带 动减速器转动;减速器的输出轴通过联轴器与一根交 错轴连接,交错轴上安装有主动螺旋齿轮,主动螺旋齿 轮与从动螺旋齿轮配合传动;从动螺旋齿轮与锥齿轮 传动系的主动锥齿轮安装在同一根轴上,从而步进电 机通过螺旋齿轮系将动力均匀传递到移动平台两端的 主动锥齿轮上,主动锥齿轮带动从动锥齿轮转动,从动 锥齿轮与齿轮齿条传动组件中的主动直齿轮连接在同 一根传动轴上,主动直齿轮带动齿条在直线滑轨上滑 动,齿条带动2个从动直齿轮转动;齿轮齿条传动组件 中从动直齿轮为免键直齿轮,通过衬套与转向轴连接 在一起,因此主动直齿轮可以带动转向轴转动,转向轴 与移动机器人的驱动轮相连接,可以实现驱动轮在0° ~360°范围内自由旋转;同时驱动轮由伺服电机驱动运转,在转向驱动装置与驱动轮伺服电机的配合控制下,整个移动机器人可以实现任意方向移动。



图4 加入同步转向机构的机器人同步转向示意图

Figure 4 Illustration of simultaneous steering of robot joined synchronous steering mechanism 图 5 所示为转向机构简图,根据驱动轮同步转向的 3 个传动阶段,可以得到全向轮转向转速与转向驱动装置中步进电机输出轴转速之间的关系,图 5 中ω_为步进电机输出轴瞬时转速;ω₂ 为螺旋齿轮传动轴与电机输出轴相互配合的齿轮轴瞬时转速;ω₄ 为维齿轮传动中与转向轴平行的齿轮轴瞬时转速;ω₄ 为全向轮转向瞬时转速。



图5 转向机构简化图

Figure 5 Simplified diagram of steering mechanism 假定螺旋齿轮平均传功比为 i₁₂,根据螺旋齿轮间 的传动关系,则可以得到

$$\boldsymbol{\omega}_1 / \boldsymbol{\omega}_2 = i_{12} \, \circ \tag{1}$$

假定锥齿轮平均传功比为 i₂₃,根据锥齿轮间的传动关系,则有

$$\omega_2/\omega_3 = i_{23} \circ \tag{2}$$

根据齿轮齿条的传动关系,则有

$$\boldsymbol{\omega}_3 = \boldsymbol{\omega}_4 \tag{3}$$

结合公式(1)~(3)可求解出全向轮瞬时转向转 速与步进电机输出轴瞬时转速之间的关系,有

$$\omega_4 = \frac{\omega_1}{i_{12} \cdot i_{23}} \tag{4}$$

为了简化全向轮转向控制算法,可以近似认为全 向轮转向为匀速转向,则在一定时间 t 内,由式(4)可 得全向轮转向转角 θ_4 与步进电机输出轴转角 θ_1 有

$$\theta_4 = \frac{\theta_1}{i_{12} \cdot i_{23}}$$
(5)

由公式(5)可得驱动轮转向转角与转向驱动装置 中步进电机输出轴转角之间的关系,为移动机器人的 转向运动控制提供依据。

3 全向移动机器人运动学分析

由运动学原理可知,一个系统的速度雅可比矩阵 可以反映系统关节速度与系统中心速度的映射关系, 当系统的速度雅克比矩阵不满秩时,系统存在奇异位 形^[15]。全向移动机器人的运动可以看作是刚体的平 面运动,由于任何刚体的平面运动,都可以分解为刚体 的平行移动和定轴转动,平行移动的具体运动形式有 前后运动及横向移动,可看作是机器人朝着某一个方 向做固定直线运动。定轴转动的具体运动形式主要是 机器人绕着中心转动。







图7 驱动轮在机器人坐标系下的位姿及 驱动轮滚动示意图

Figure 7 Position and posture of drive wheel in robot coordinate system and diagram of rolling wheel

假设移动机器人在平面上移动,将实物简化为模型。移动机器人在世界坐标系下的位姿如图6所示。 运动学建模过程中使用了2个坐标系:世界坐标系和 机器人坐标系。机器人坐标系固定在移动机器人机身 上,表示为 $\{\mathbf{R}\} = X_R O_R Y_R$ 。图7(a)所示为驱动轮在机 器人坐标系下的位姿。世界坐标系固定在地面上,表 示为 $\{\mathbf{O}\} = X_o O_o Y_o$ 。在机器人坐标系固定在地面上,表 示为 $\{\mathbf{O}\} = X_o O_o Y_o$ 。在机器人坐标系 $\{\mathbf{R}\}$ 中,将机器 人坐标系原点 O_R 固定在机器人质心处,设置 X_R 轴与 机器人宽度方向平行, Y_R 轴与机器人长度方向平行, θ 为 X_R 轴相对 X_o 轴的转动角度(逆时针为正,顺时针 为负),则可用向量 $\boldsymbol{\xi} = (x \quad y \quad \theta)^T$ 表示移动机器人 在世界坐标系下的位姿。图7(b)为驱动轮滚动示意 图,假设驱动轮为刚性轮,并且每个轮子都垂直于地面 且与地面只在一点接触;同时假设驱动轮在地面上做 纯滚动且相对于地面无相对滑动,则轮-地接触点的速 度为0,即在驱动轮运动方向和垂直于驱动轮运动方 向上轮-地接触点的速度为0。由此得到轮子在纯滚 动和无相对滑动的条件为

$$[\sin (\alpha + \beta) - \cos (\alpha + \beta) - l\cos \beta] \mathbf{R}(\theta) \dot{\mathbf{\xi}} - r \dot{\varphi} = 0;$$
(6)

 $\left[\cos\left(\alpha+\beta\right)+\sin\left(\alpha+\beta\right)d+l\sin\beta\right]\boldsymbol{R}(\theta)\dot{\boldsymbol{\xi}}+u\dot{\beta}=0;$ (7)

$$\boldsymbol{R}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{\circ}$$
(8)

式中:[t,a]为机器人坐标系上各驱动轮的支撑点在机器人坐标系中的极坐标位置; β 为驱动轮的转向角度; r为驱动轮半径; φ 为驱动轮滚动转过的角度; $\dot{\xi}$ 为机器人的运动速度, $\dot{\xi} = (\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta})^{\mathrm{T}}$;u 为驱动轮水平轴 线相对于垂直轴线的偏移距离; β 为驱动轮转向角速 度; φ 为驱动轮滚动的角速度, $\mathbf{R}(\theta)$ 为世界坐标系与 机器人坐标系之间的变换矩阵。

图 6 中所设计的全向移动机器人由 4 个驱动轮组 成,沿对角线对称布置,4 个驱动轮由 1 个同步转向机 构来控制转向,因此 4 个驱动轮的转向角度与转向角 速度均相等。结合式(6)~(8)得到机器人的运动学 方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{1} \\ \dot{\varphi}_{2} \\ \dot{\varphi}_{3} \\ \dot{\varphi}_{4} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\left(\alpha_{1} + \beta + \theta\right)/r & \cos\left(\alpha_{1} + \beta + \theta\right)/r\right) & l/r\cos\beta \\ -\sin\left(\alpha_{2} + \beta + \theta\right)/r & \cos\left(\alpha_{2} + \beta + \theta\right)/r\right) & l/r\cos\beta \\ -\sin\left(\alpha_{3} + \beta + \theta\right)/r & \cos\left(\alpha_{3} + \beta + \theta\right)/r\right) & l/r\cos\beta \\ -\sin\left(\alpha_{4} + \beta + \theta\right)/r & \cos\left(\alpha_{4} + \beta + \theta\right)/r\right) & l/r\cos\beta \\ \cos\left(\alpha_{1} + \beta + \theta\right)/u & \sin\left(\alpha_{1} + \beta + \theta\right)/u\right) & 1 + l/u\sin\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

(9)

由以上关系可知,该移动机器人有3个运动自由 度,为了避免机器人产生奇异位姿,通过机器人同步转

向机构以及驱动轮的动作组合,控制运动自由度的数 目,保证雅克比矩阵对应的行列式不等于零^[16]。公式 (9)中的 $\dot{\varphi}_1,\dot{\varphi}_2,\dot{\varphi}_3,\dot{\varphi}_4,\dot{\beta}$ 均可由驱动轮驱动电机输入 转速以及同步转向机构驱动电机的输入转速转化得 到,从而获得移动机器人在世界坐标系下的运动速度 与电机输入转速之间的关系,为控制机器人的运动提 供理论依据。

4 结语

针对现有轮式全向移动机器人在工程实际应用中 存在的同步转向能力差的问题,基于机器人全向移动 的轮式机构,设计了一种全向轮同步转向机构,可以实 现1个步进电机控制4个驱动轮同步转向;分析了该 转向机构的工作机理,并将该转向机构应用于全向移 动机器人,在此基础上研制出一款主要应用于食品厂 材料搬运工作的产品样机;最后针对移动机器人做了 运动学分析,降低了轮式全向移动机器人控制难度,实 现了机器人高速度、高精度、高稳定性全向移动的 目标。

参考文献:

- BRUZZONE L, QUAGLIA G. Review article: locom-otion systems for ground mobile robots in unstr-uctured environments [J]. Mechanical ciences, 2012, 3(2):49-62.
- [2] CONDURARU A, DOROFTEI I, CONDURARU I. An over-view on the design of mobile robots with hybrid locomotion [J]. Advanced materials research, 2013, 837:555 - 560.
- [3] 冬雷,马举猛.圆弧形腿机构六足机器人的结构和控制系统设计 [J].机电工程,2016,33(7):883-887.

(上接第23页)

- [7] 李娜. 面向维修的装配序列规划方法研究[D]. 南京:南京航空航 天大学,2012:47.
- [8] 夏平均,姚英学,刘江省,等.基于虚拟现实和仿生算法的装配序 列规划[J].机械工程学报,2007,43(4):44.
- [9] XING Y, CHEN G, LAI X, et al. Assembly sequence planning of automobile body components based on liaison graph [J]. Assembly automation, 2007, 27(2):160.
- [10] CHEN R S, LU K Y, TAI P H. Optimization of assembly plan through a three-stage integrated approach [J]. International journal of computer application in technology, 2004, 19(1):28 - 38.
- [11] MARIAN R M, LUONG L H S, ABHARY K. A genetic algorithm for the optimisation of assembly sequences [J]. Computers & industrial engineering, 2006, 50(4):503 - 527.
- [12] XING Yanfeng, WANG Yansong. Assembly sequence planning based on a hybrid particle swarm optimisation and genetic algorithm [J]. International journal of production research, 2012,50(24):7307.
- [13] ANWAR S. M. Multi criteria assembly sequencing [J]. Computer & industrial engineering, 2006, 50(4):503-527.
- [14] 张以柱,周江奇,林忠钦,等.车身装配序列生成及分总成的识别

- [4] 李智卿,马书根,李斌,等.具有自适应能力轮—履复合变形移动 机器人的开发[J].机械工程学报,2011,47(5):1-10.
- [5] 李允旺,葛世荣,朱华,等.四履带双摆臂机器人越障机理及越障 能力[J].机器人,2010,32(2):157-165.
- [6] 李波,张瑾,李国栋.全地形排爆机器人运动机构设计研究[J].机 电工程,2015,32(6):803-807.
- GHOTBI B, GONZALEZ F, KOVECSES J, et al. Mobility evaluation of wheeled robots on soft terrain: effect of internal force distribution
 [J]. Mechanism and machine theory, 2016, 256(3):259 - 282.
- [8] CHAN R P M, STOL K A, HALKYARD C R. Review of modelling and control of two-wheeled robots [J]. Annual reviews in control, 2013,37(1):89-103.
- [9] 黄涛,张豫南,田鹏,等. 一种履带式全方位移动平台的设计与运 动学分析[J]. 机械工程学报,2014,50(21):206-212.
- [10] 熊光明,龚建伟,徐正飞,等.轮式移动机器人滑动转向研究综述 [J].机床与液压,2003(6):9-12.
- [11] RATNER D, MCKERROW P. Navigating an outdoor robot along continuous landmarks with ultrasonic sensing [J]. Robotics and autonomous systems, 2003, 45(2): 73 - 82.
- MIYATA H, OHKI M, YOKOUCHI Y, et al. Control of the autonomous mobile robot DREAM-1 for a parallel parking [J]. Mathematics and computers in simulation, 1996, 41 (1/2):129 138.
- MAALOUF E, SAAD M, SALIAH H. A higher level path tracking controller for a four-wheel differentially steered mobile robot [J].
 Robotics and autonomous systems, 2006, 54(1):23 - 33.
- [14] 王一治,常德功. Mecanum 四轮全方位系统的运动性能分析及 结构形式优选[J]. 机械工程学报,2009,45(5):307-310.
- [15] 熊有伦. 机器人技术基础 [M]. 武汉:华中科技大学出版社, 1996.
- [16] 王慰军,杨桂林,张驰,等.全向移动机器人驱动万向轮的设计与 实现[J].工程设计学报,2016,23(6):633-638.

[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(6):681.

- [15] 彭涛,李世其,王峻峰,等.基于集成干涉矩阵的蚁群装配序列规 划[J].计算机科学,2010,37(4):180.
- [16] 田兆青,来新民,林忠钦.多工位薄板装配偏差流传递的状态空间模型[J].机械工程学报,2007,43(2):205.
- [17] LIUS C, HU S J. Variation simulation for deformable sheet metal assembly using finite element methods [J]. Journal of manufacturing science & engineering, 1997, 119(3):371.
- [18] 刘海江,李玲玉,张含叶.基于改进粒子群算法的锂电池模块装 配序列规划[J].中国工程机械学报,2014,12(4):306-312.
- [19] 于宏,水丽.改进粒子群算法的装配序列规划方法[J].沈阳理工 大学学报,2015,34(4):29-33.
- [20] 杨耀权,张新胜. 基于自适应变异 SAPSO-LSSVM 的磨煤机一次 风量预测[J]. 自动化仪表,2016,37(7):90.
- [21] 陈莉.基于组合神经网络的数控机床热误差补偿建模的研究[D].太原:太原理工大学,2011:21.
- [22] 李翠.基于三维实时数据的风速短期预测研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2012:29.
- [23] 杜玉平.关于粒子群算法改进的研究[D].西安:西北大学, 2008:18.