

差速转向复合式探测机器人运动学分析

尚伟燕¹ 邱法聚² 杨超珍¹

1. 宁波工程学院, 宁波, 315000 2. 宁波市特种设备检验检测研究院, 宁波, 315000

摘要:为便于探测机器人的导航和跟踪控制,提出了差速转向的复合式移动机器人运动学模型的构建及求解方法。通过对差速转向复合式移动系统结构及运动特性进行分析,推导了探测机器人车体速度与后轮及承重轮速度之间的关系矩阵,提出采用 Householder 变换求解车体运动的方法,为探测机器人越障过程中位置和方位的估计提供了较准确的求解模型。最后对差速转向复合式机器人的行进过程进行仿真试验,验证了运动学模型的正确性及机器人的运动特性。

关键词:差速转向;探测机器人;移动系统;运动学;Householder 变换

中图分类号:TP24

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.010

Kinematics Analysis of Differential Steering Exploration Robot with Compound Walking Mechanism

Shang Weiyan¹ Qiu Faju² Yang Chaozhen¹

1. Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang, 315000

2. Ningbo Special Equipment Inspection & Research Institute, Ningbo, Zhejiang, 315000

Abstract:In order to improve the accuracy of navigation, a kind of new method was presented to establish and solve the kinematics model of wheel-tracked exploration robot. By analyzing the structure of the moving system, a kinematics model of exploration robot was set up and kinematics equations were deduced. Then the kinematics relationships between the bodywork and the wheels were established, and the Householder transformation was used to estimate the least-squares solution of the kinematics equations, which provides an efficient method to obtain more accurate solutions. At last, the effect of the correctness of kinematic model and solution method was testified by computer simulation.

Key words:differential steering; exploration robot; moving system; kinematics; Householder transformation

0 引言

救援机器人具有较好的环境适应性,往往能代替人完成复杂环境下的探测任务,在灾场搜救等方面显示出其优势^[1-3]。轮履复合式探测车在执行探测任务过程中,当路面状态复杂多变,遇到难于跨越的障碍物、沟壕及斜坡等地形时,需要探测车跟踪路径规划器所规划的路径,灵活地进行避障行驶,因此,探测车在执行探测任务中的转向较频繁。笔者设计的差速转向复合式探测机器人

(以下简称为探测机器人)采用滑动转向方式,四轮全驱动,通过控制内外侧轮驱动电机的转速实现探测机器人转向。该转向方式可以实现探测机器人的原地转向,即零半径回转,这样在运动环境比较狭窄的情况下,探测机器人也能行驶自如,顺利完成作业任务^[4-5]。

探测机器人在非结构化的三维环境中移动时,需要随时获取相对准确的自身运动信息,对其自身运动行为进行控制,从而顺利地完转向避障等运动,为探测、救援任务的顺利完成打下基础。因此,进行探测机器人的运动学分析对提高其探测效率具有重要意义。

收稿日期:2011-07-08

基金项目:浙江省教育厅项目(Y201120198)

[5] Garcon F. Recent Developments in Captive Trajectory Systems of the ONERA Modane Wind Tunnels, AIAA-2001-0579[R]. Reston, VA, USA: AIAA, 2001.

[6] 陈万华. 2.4m 风洞大攻角机构系统运动仿真与动态特性研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007.

[7] 庄表中,梁以德. 结构随机振动[M]. 北京:国防工业

出版社,1995.

(编辑 张 洋)

作者简介:陈万华,男,1975年生。中国空气动力研究与发展中心四所副研究员。主要研究方向为风洞结构优化与主动控制。发表论文 10 余篇。王超琪,男,1964年生。中国空气动力研究与发展中心四所研究员。谢国栋,男,1962年生。中国空气动力研究与发展中心四所高级工程师。陈振华,男,1966年生。中国空气动力研究与发展中心四所研究员。

1 探测机器人运动学分析

对探测机器人进行运动学分析,首先要讨论探测机器人各相关杆件之间的运动关系,因此需在各连杆上附加坐标系以构建连杆之间的位姿变换矩阵。探测机器人的结构如图 1 所示。

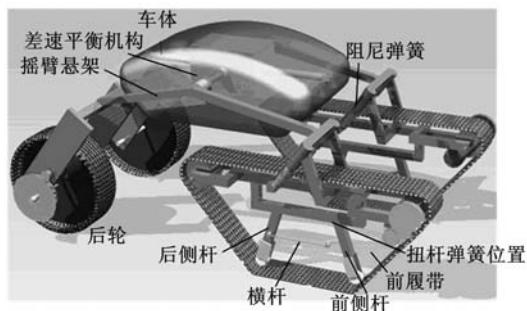


图 1 探测机器人结构简图

1.1 探测机器人的运动学建模

探测机器人在恶劣地面条件下行驶时,其后轮与地面之间是高副接触,并且由于履带厚度仅为 4mm(相对于承重轮半径可以忽略不计),因此其前后承重轮与地面之间的接触也为高副。多个运动部件与地面相接触,构成多个封闭链。为此,采用 Denavit—Hartenberg 规则^[6]对通过回转副连接的连杆进行附体坐标系的选择及参数的规定,并在此基础上结合适于描述高副接触的 Sheth—Uicker 方法^[7],建立探测机器人运动系统的坐标系,以消除多闭环系统坐标系传递矩阵的歧义性。

执行任务过程中,探测机器人坐标系位置处在不断变化中,采用 Sheth—Uicker 方法设置瞬时重合坐标系来描述探测机器人各部件的运动,可以简化运动模型的建立和求解,如图 2 所示。

图 2 中的下标含义如下:G 代表地面全局坐标系;B 代表固联在探测机器人车体中心处的坐标系; \bar{B} 代表坐标系 B 的瞬时重合坐标系,相对于坐标系 G 静止; θ 、 φ 、 ψ 分别为探测机器人在瞬时重合坐标系中的俯仰角、侧向翻滚角和转向角,设探测机器人在惯性坐标系中的位置坐标为 (x, y, z) ,则探测机器人车体相对于地面全局坐标系的位姿变换矩阵为

$$T_B^G = T_G R_B$$

式中, T_G 、 R_B 分别为平移矩阵和旋转矩阵。

基于此位姿变换矩阵可以方便直观地进行高副接触条件下探测机器人运动状态的描述。为了便于建模,假设越障过程中探测机器人不产生转向运动,直线正向行驶。

探测机器人左右两侧对称,结构相同,基于上

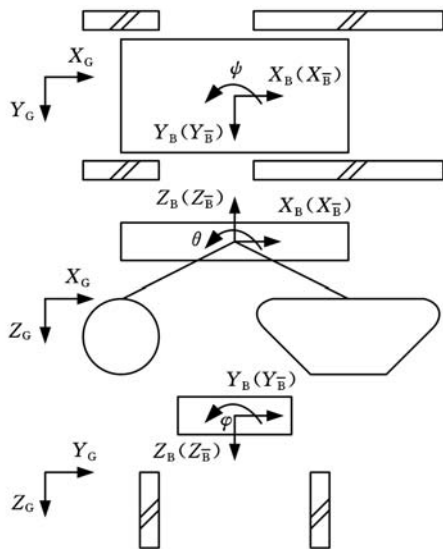


图 2 Sheth—Uicker 运动分析坐标系

述运动建模假设,在越障过程中仅对其一侧建立图 3 所示的坐标系。各坐标系描述如下:D 表示差速齿轮坐标系;R 表示摇臂悬架坐标系;Q 表示固定于摇臂悬架上的坐标系,坐标原点位于阻尼弹簧与摇臂悬架铰接处;H 表示固联于前履带轮悬架上的坐标系,坐标原点位于摇臂悬架与前轮悬架铰接点处; L_F 表示固联于前履带轮悬架上的坐标系,坐标原点位于前侧杆与前轮悬架的铰接处; K_F 表示固联于前侧杆上的坐标系,坐标原点位于前承重轮与前侧杆铰接处; L_H 表示固联于后履带轮悬架上的坐标系,坐标原点位于后侧杆与前轮悬架的铰接处; K_H 表示固联于后侧杆上的坐标系,坐标原点位于后承重轮与后侧杆铰接处; A_F 表示前承重轮与地面(履带)接触点坐标系,位于承重轮上; A_H 表示后承重轮与地面(履带)接触点坐标系,位于承重轮上;C 表示弹簧阻尼与悬架的铰接点坐标系,坐标原点位于悬架上; \bar{A}_F 表示前承重轮与地面(履带)的瞬时重合坐标系(图 3 中未标出); \bar{A}_H 表示后承重轮与地面(履带)的瞬时重合坐标系(图 3 中未标出);W 表示固联于摇臂悬架的坐标系,坐标原点位于后轮与摇臂悬架铰接处;P 表示后轮与地面接触点坐标系; \bar{P} 表示后轮与地面的瞬时重合坐标系。

将只包含常数项的矩阵标记为 T ,将包含变量项的矩阵标记为 Ω ,对探测机器人的参考坐标系到前履带承重轮、后轮的运动链条分别进行分析。

1.2 探测机器人运动学方程

为了估算探测机器人的位置和方向,我们通过坐标的矩阵变换引入车轮的雅可比矩阵,从而由各个车轮的速度计算出车体的速度。最终求得

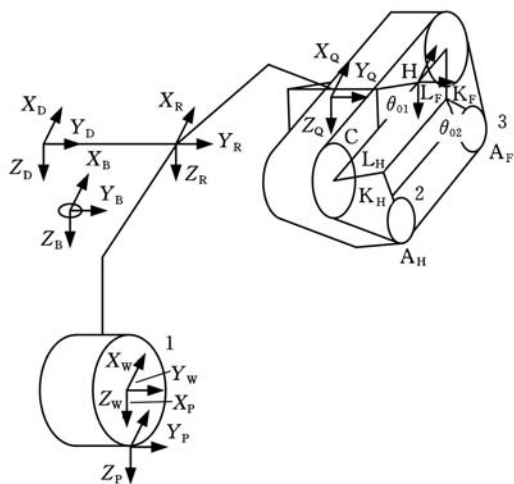


图 3 探测机器人的运动学模型

探测机器人直线正向越障时车体运动与右后轮运动之间的关系表达式:

$$\dot{\bar{p}}_B = \begin{bmatrix} \bar{v}_{BX} \\ \bar{v}_{BY} \\ \bar{v}_{BZ} \\ \bar{\omega}_{BX} \\ \bar{\omega}_{BZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 & L_{R1Y}^D \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -L_{W1}^R & 0 \\ -\sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 & -L_{R1Y}^D \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{v}_{P1X} \\ \bar{v}_{P1Y} \\ \bar{v}_{P1Z} \\ \omega_1 \\ \omega \\ \bar{v}_{W1Z}^R \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_1 = \omega_1, \dot{L}_{W1Z}^R = \bar{v}_{W1Z}^R$$

式中, ω_1 为摇臂悬架转动角速度; \bar{v}_{W1Z}^R 为后轮相对于摇臂悬架在 Z 轴方向上的运动速度; \bar{v}_{P1X}^R 、 \bar{v}_{P1Y}^R 、 \bar{v}_{P1Z}^R 分别为右后轮与地面接触点的坐标系在右后轮与地面瞬时重合坐标系中的 3 个方向上的速度分量; ω 为探测机器人右后轮滑转角速度。

速度 $\dot{\bar{q}}_1 = [\bar{v}_{P1X}^R \ \bar{v}_{P1Y}^R \ \bar{v}_{P1Z}^R \ \omega_1 \ \omega \ \bar{v}_{W1Z}^R]^T$ 中, 右后轮在垂直方向上的速度 \bar{v}_{P1Z}^R 及右后轮驱动速度均可以通过传感器获得, 因而相应可求得右后轮水平方向上的速度分量 \bar{v}_{P1X}^R 。探测机器人转向时内外侧轮速度的分析如图 4 所示。

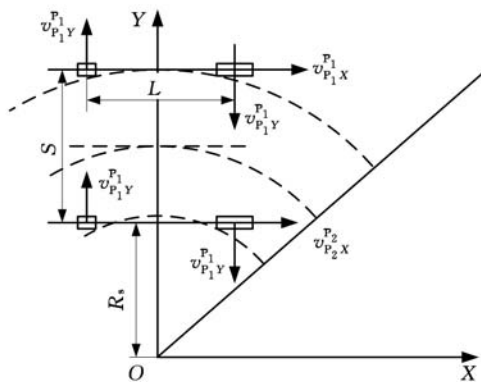


图 4 探测机器人转向运动分析简图

根据几何关系可以求得侧向滑移速度

$$\bar{v}_{P1Y}^R = \bar{v}_{P1X}^R \frac{L}{2R_s + S}$$

式中, L 为前后轮履带中心点之间的距离; S 为内外侧轮间距; R_s 为内侧车轮的转向半径。

通过内外侧轮前进速度关系求得转向半径及探测机器人各轮的滑转角速度分别为

$$R_s = \frac{S}{2} \frac{\bar{v}_{P1X}^R + \bar{v}_{P2X}^R}{\bar{v}_{P1X}^R - \bar{v}_{P2X}^R}$$

$$\omega = 2\bar{v}_{P1X}^R / L$$

假设运动过程中各轮的侧向滑移情况相同, 则以上分析过程建立了探测机器人各轮的侧向滑移角速度与探测车内外侧轮速度、车体结构参数之间的关系, 该关系式适用于实现差速转向的探测车。

右侧各轮速度 $\dot{\bar{q}}_1$ 中, 右后轮相对于摇臂悬架在沿 Z 轴方向上的速度 \bar{v}_{W1Z}^R 为不可直接测得的量, 因此可将其移到式(1)左侧, 作为未知量进行求解。

探测机器人行进过程中, 左右侧摇臂转向角速度 ω_2 、 ω_1 均可以通过传感器获得, 因此车体绕 Y 轴的俯仰角速度可以表示为

$$J_{\Delta j} = \begin{bmatrix} -M & 0 & -R & 0 & 0 \\ -N & 0 & -H & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\bar{\omega}_{BY}^R = -(\omega_1 + \omega_2) / 2$$

其中, M 、 N 、 R 、 H 分别为与车体参数及可测得量相关的表达式。

将可直接测量或求得的分量移到式(1)右侧, 未知各分量置于式(1)左侧, 则探测车右后轮与车体之间的运动关系可表达为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -\cos\theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_{BX} \\ \bar{v}_{BY} \\ \bar{v}_{BZ} \\ \bar{\omega}_{BX} \\ \bar{\omega}_{BZ} \\ \bar{v}_{W1Z}^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & L_{R1Y}^D \cos\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & -L_{W1}^R \\ -\sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & -L_{R1Y}^D \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_{P1X}^R \\ \bar{v}_{P1Y}^R \\ \bar{v}_{P1Z}^R \\ \omega \end{bmatrix}$$

从上式可以看出, 探测车车体速度矢量可以由车轮的速度矢量和各关节的变化关系来决定, 由于左侧后轮与右侧后轮在结构上关于车体左右对称, 所以左侧后轮与右侧后轮和探测车车

体间的变换关系矩阵具有相同的形式。因此,探测机器人车体与左右后轮运动学方程的一般形式为

$$\begin{aligned} [\mathbf{E}_{5 \times 5} \quad \mathbf{J}_i] \dot{\mathbf{p}}_i &= \mathbf{J}_{w_i} \dot{\mathbf{q}}_{w_i} \quad i = 1, 2 \\ \mathbf{J}_i &= [-\sin\theta_1 \quad 0 \quad -\cos\theta_1 \quad 0 \quad 0]^T \\ \mathbf{J}_{w_i} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & L_{R_1^D} \cos\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & -L_{W_1^R} \\ -\sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & -L_{R_1^D} \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

对探测机器人参考坐标系到右侧前履带轮承重轮 1 的运动链条进行分析,可求得探测机器人车体与左右前承重轮之间运动学方程的一般形式:

$$\begin{aligned} [\mathbf{E}_{5 \times 5} \quad \mathbf{J}_{A_j}] [\dot{\mathbf{p}}_j \quad \omega_{01j} \quad \omega_{02j}]^T &= \mathbf{J}_{w_j} \dot{\mathbf{q}}_j \quad (3) \\ \dot{\mathbf{p}}_j &= [v_{B_X}^B \quad v_{B_Y}^B \quad v_{B_Z}^B \quad \omega_{B_X}^B \quad \omega_{B_Z}^B]^T \\ \mathbf{J}_{w_j} &= \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha & L_{R_1^D} \cos\alpha \\ 0 & 1 & 0 & P \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha & -L_{R_1^D} \sin\alpha \\ 0 & 0 & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 0 & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \\ \alpha &= \theta_1 + \theta_{01} + \theta_{02} \end{aligned}$$

其中,角度 θ_{01} 、 θ_{02} 分别如图 3 所示,且 $\dot{\theta}_{01} = \omega_{01}$, $\dot{\theta}_{02} = \omega_{02}$ 。同理,求得探测机器人车体与左右后承重轮之间运动学方程的一般形式:

$$[\mathbf{E}_{5 \times 5} \quad \mathbf{J}_{H_k}] [\dot{\mathbf{p}}_k \quad \omega_{01k} \quad \omega_{02k}]^T = \mathbf{J}_{w_k} \dot{\mathbf{q}}_k \quad (k = 1, 2) \quad (4)$$

在平行四边形机构作用下,探测机器人同一侧连接前后承重轮的前侧杆与后侧杆在运动过程中具有相同的转角,因此存在 $\mathbf{J}_{w_j} = \mathbf{J}_{w_k}$, 式(2) ~ 式(4)中, $i, j, k = 1$ 时代表右侧轮; $i, j, k = 2$ 时代表左侧轮。

将式(2) ~ 式(4)合并,可以得到 6 个轮子形成的复合式运动方程:

$$\mathbf{A}_0 \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} \quad (5)$$

将 $[\mathbf{E}_{5 \times 5} \quad \mathbf{J}_i]$ 、 $[\mathbf{E}_{5 \times 5} \quad \mathbf{J}_{A_j}]$ 、 $[\mathbf{E}_{5 \times 5} \quad \mathbf{J}_{H_k}]$ 中各行向量分别与相应的零向量组合,构成式(5)中 30×11 的参数矩阵 \mathbf{A}_0 , 将 \mathbf{J}_{w_i} 、 \mathbf{J}_{w_j} 、 \mathbf{J}_{w_k} 中的相应行向量与零向量组合,构成 30×21 的矩阵 \mathbf{J} , 未知矢量矩阵为

$$\dot{\mathbf{p}} = [v_{B_X}^B \quad v_{B_Y}^B \quad v_{B_Z}^B \quad \omega_{B_X}^B \quad \omega_{B_Z}^B \quad \omega_{011} \quad \omega_{021} \quad \omega_{012} \quad \omega_{022} \quad v_{W_1^R}^R \quad v_{W_2^R}^R]^T$$

已知量或可测得量矩阵包含 21 个分量:

$$\dot{\mathbf{q}} = [v_{A_{F_1}^X}^A \quad v_{A_{F_1}^Y}^A \quad v_{A_{F_1}^Z}^A \quad v_{A_{H_1}^X}^A \quad v_{A_{H_1}^Y}^A \quad v_{A_{H_1}^Z}^A \quad v_{P_1^X}^P]$$

$$v_{P_1^Y}^P \quad v_{P_1^Z}^P \quad \cdots \quad v_{A_{F_2}^X}^A \quad \cdots \quad v_{P_2^Z}^P \quad \omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega]^T$$

2 运动学方程求解与仿真试验

2.1 运动学方程求解方法的选取

探测机器人运动过程中,需要在一定采样频率下,不断获取 6 个轮子的运动输入信号,并通过运动学方程估算出车体的位置及运动状况,因此,提高运动学方程的求解精度和求解速度有利于快速准确地把握探测机器人运动信息并随时对其运动进行控制。

式(5)是一个超静定的线性系统,想求得精确解是不可能的,该系统可以用最小二乘法求解:

$$\min_p \|\mathbf{A}_0 \dot{\mathbf{p}} - \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}\|$$

文献[8-9]均采用将原超静定方程转化为正则方程的形式,进而求得 $\dot{\mathbf{p}} = (\mathbf{A}_0^T \mathbf{A}_0)^{-1} \mathbf{A}_0^T \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}$ 。该求解线性方程组的方法要通过矩阵求逆,与高斯消元求解相比,精度会降低,并且方程的系数矩阵比原方程的系数矩阵要病态很多。事实上,系数矩阵的条件数变成了原来的平方,即 $\kappa(\mathbf{A}_0^T \mathbf{A}_0) = \kappa(\mathbf{A}_0^2)$ 。如果采用有限精度体系运算,即使 \mathbf{A}_0 的列线性无关,转换后方程的系数矩阵 $\mathbf{A}_0^T \mathbf{A}_0$ 仍可能奇异,从而使 $(\mathbf{A}_0^T \mathbf{A}_0)^{-1}$ 不存在。文献[10]在此基础上,采用加权最小二乘法对探测机器人运动学问题进行求解,在一定程度上能够提高求解精度,但是最小二乘法加权矩阵的确定上具有一定的主观性。

在对各求解方法分析的基础上,本文提出对探测机器人运动学方程采用 Householder 反射来求解最小二乘的方法,其具体求解过程如下:首先构造相应的 Householder 反射矩阵,并将这一系列的 Householder 反射作用于 \mathbf{A}_0 的列,得到矩阵:

$$\mathbf{R} = \mathbf{H}_{11} \mathbf{H}_{10} \cdots \mathbf{H}_1 \mathbf{A}_0$$

采用同样的 Householder 反射作用于式(5)的右端,得到 $\mathbf{R} \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{b}$, 其中 $\mathbf{b} = \mathbf{H}_{11} \cdots \mathbf{H}_2 \mathbf{H}_1 (\mathbf{J} \dot{\mathbf{q}})$ 。通过以上变换,其求解结果表达通式如下:

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,11} \\ 0 & a_{2,2} & \cdots & a_{2,11} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_{11,11} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{30} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,通过 Householder 变换,前 11 个等式构成上三角阵,可以通过回代法求得 $\dot{\mathbf{p}}$ 中各相应分量的近似解。剩余 19 个方程的

系数全为零,对应位置 b 的分量构成了残差项。

2.2 探测机器人运动学求解与仿真试验

探测机器人行驶于复杂地面时,不考虑探测机器人的质量特性和受力情况,使用 MATLAB 软件对其进行仿真分析,根据结构设计中的尺寸要求,车体的几个主要参数设置如下: $L_{R_1^D Y} = 225\text{mm}$, $L_{Q_1^R Z} = 28\text{mm}$, $L_{L_{F_1}^H} = 68\text{mm}$, $L_{A_{F_1}^K Z} = 50\text{mm}$, $L_{W_1^R Z} = 190\text{mm}$, $L_{P_1^W Z} = 100\text{mm}$ 。

为验证运动学模型的正确性,将 Recurdyn 软件下探测机器人在不平路面上前 50s 的仿真运动作为研究对象,将测得的承重轮及后轮在 3 个方向上的运动速度作为运动输入,运动中左右轮存在速度差,且设置右侧车轮速度是左侧对应车轮速度的 2 倍。在 Recurdyn 软件仿真下,测得右侧前后承重轮的运动速度曲线,分别如图 5、图 6 所示。图 5 中,后承重轮上的速度变化曲线形状与前承重轮相似,只是时间上滞后 1s。由于摇臂悬架的存在,测得的右侧后轮速度变化与前后两承重轮的速度有一定差别,其具体变化曲线如图 6 所示。

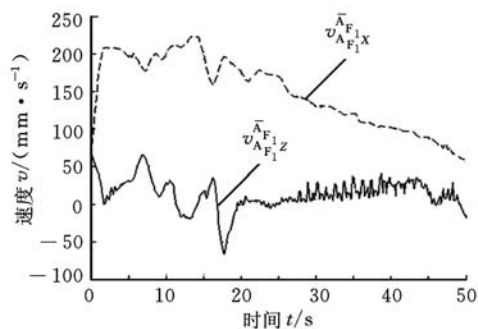


图 5 右侧前承重轮在 X、Z 方向上的运动速度

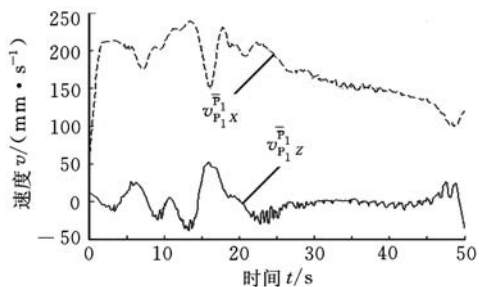


图 6 右侧后轮在 X、Z 方向上的运动速度

同样,根据探测机器人车轮侧向滑移速度与车轮转向角速度之间的关系,可以求得探测机器人车轮侧向滑移角速度 ω 的曲线。将测得的各组速度及角速度作为运动输入,设置采样频率为 50kHz,将各输入量代入运动学方程,并在 MATLAB 环境下编程对运动学方程进行求解。经过迭代,求得探测机器人车体在 3 个方向上的运动速度,如图 7 所示。

对比图 6、图 7 中水平及垂直方向对应的分速

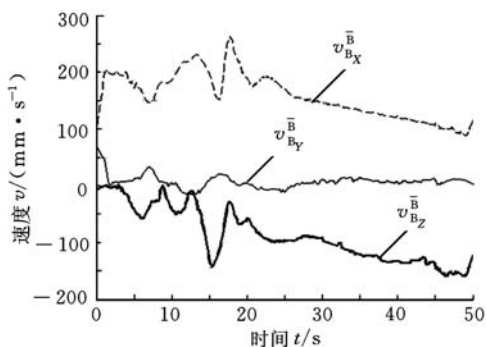


图 7 探测机器人车身运动速度

度曲线,我们可以看出:车体质心的运动曲线与前承重轮运动曲线变化较一致,验证了所建立运动学模型的正确性;车身运动曲线较承重轮运动曲线平缓;左右侧车轮存在速度差,探测机器人存在绕 Z 轴的滑移速度 v_{B_z} 。

在采用上述 Householder 反射进行最小二乘解计算的过程中,前 50s 时间内要进行 2.5×10^5 次采样,计算量较大。为比较算法的精确程度,仅对前 5s 内测得的 25 000 组采样点进行分析计算,最终求得残差项的二范数为 472.9405,而采用传统方法求解时,所有残差项的二范数为 7017.7827。一般而言,残差项越小,求解越为精确,因此,本文提出的采用 Householder 反射来求探测机器人运动学方程最小二乘解的方法结果较为精确。每组采样点循环代入式(6)求解时,均采用三角回代法计算前面 11 个等式,不仅求解时间较短,而且数值稳定性好。

3 结论

(1)将承重轮、后轮的运动作为输入量,提供了一种求解探测机器人车体运动的有效方法。为探测机器人的导航及运动控制提供了理论依据。

(2)将 Householder 变换用于探测机器人超静定复合运动方程的求解后,求解精度和数值稳定性得到了提高。

(3)运动学仿真试验验证了理论模型的正确性,车身运动曲线相对于车轮运动曲线平缓,证明探测机器人悬架结构设计能够提高车身运动的平稳性。

参考文献:

[1] Wang Weidong, Du Zhijiang, Sun Lining. Obstacle Performance Analysis of Mine Research Robot Based on Terramechanics [C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, 2007: 1382-1387.
 [2] Moosavian S A A, Semsarilar H, Kalantari A, et al. Design and Manufacturing of a Mobile Rescue Robot

气动人工肌肉并联平台自适应模糊 CMAC 姿态跟踪控制

施光林¹ 沈 伟²

1. 上海交通大学, 上海, 200240 2. 上海海洋大学, 上海, 201306

摘要:着眼类机器人的腰部应用,设计了一种气动人工肌肉三自由度并联平台。引入一种自适应模糊 CMAC(AFCMAC),实现了并联平台的姿态控制。通过规划输入空间,实现了 AFCMAC 对迟滞力、气压波动等不确定因素和非线性耦合因素的感知。离散抗饱和 PID 并行监督和离线辨识避免了在控制运行初期出现较大的跟踪误差和气压波动,从而使 AFCMAC 的在线实时自学习调整成为可能。进行了定点转动姿态跟踪实验和抗干扰实验,实验结果表明,AFCMAC 具有较好的姿态控制性能和在线学习调整能力。

关键词:气动人工肌肉;三自由度并联平台;姿态控制;自适应模糊 CMAC;迟滞特性

中图分类号: TP13

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.011

Adaptive Fuzzy CMAC Position Tracking Control of Parallel Platform Based on Pneumatic Artificial Muscles

Shi Guanglin¹ Shen Wei²

1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240 2. Shanghai Ocean University, Shanghai, 201306

Abstract: Aiming at the waist of hominoid robot, this paper raised a 3 DOF parallel platform based on pneumatic artificial muscles. And an AFCMAC was introduced for posture tracking control of the parallel platform. By arranging the input space, AFCMAC could learn such uncertainties as hysteresis and pressure fluctuation, as well as nonlinear coupling characteristics. In the beginning of control process, the bigger tracking error and pressure fluctuation phenomenon can be avoided by the design of discrete anti saturation PID parallel supervisory control and offline identification, which make it possible for AFCMAC to online adjust its structure parameters in real time. Finally, the fix point rotation experiments and anti disturbance experiments were carried out. And the results suggest the good control performance and online self learning and adjustment ability of AFCMAC.

Key words: pneumatic artificial muscle; 3 DOF parallel platform; posture control; AF CMAC (adaptive fuzzy cerebellar model articulation controller); hysteresis characteristic

0 引言

气动人工肌肉^[1](pneumatic artificial muscle,

PAM)是一种新型的气动执行器。当对气动人工肌肉充气时,其收缩产生的拉力与外力达到平衡,实现被连接物体的准确定位。由于结构原因,气

收稿日期:2011-02-10

[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2006: 3982-3987.

[3] Matsuno F, Tadokoro S. Rescue Robots and Systems in Japan[C]//2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Shenyang, 2005: 12-20.

[4] Pazderski D, Kozlowski K. Trajectory Tracking of under Actuated Skid-steering Robot[C]//American Control Conference. Washington DC, 2008: 3506-3511.

[5] Solc F, Sembera J. Kinetic Model of a Skid Steered Robot[C]//Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation. Cambridge, UK, 2008: 61-65.

[6] Sheth P N, Uicker J J. A Generalized Symbolic Notation for Mechanisms[J]. Journal of Engineering for Industry, 1971, 93(1): 102-112.

[7] Shin Dong Hun, Park Kyung Hoon. Velocity Kinematic Modeling for Wheeled Mobile Robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, 2001: 3516-3622.

[8] 蔡则苏, 洪炳熔, 吕德生, 等. 基于摇杆-转向架的月球车运动学分析与仿真[J]. 机器人, 2003, 25(7): 636-651.

[9] Muir P F, Neuman C P. Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robot[J]. Robotic Systems, 1987, 4(2): 281-340.

[10] 崔莹, 高峰. 可变直径轮月球探测车运动学建模与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(3): 348-352. (编辑 张 洋)

作者简介: 高伟燕, 女, 1978年生。宁波工程学院机械工程学院讲师。主要研究方向为机器人设计与仿真。发表论文10余篇。
邱法聚, 男, 1979年生。宁波市特种设备检验检测研究院工程师。
杨超珍, 男, 1956年生。宁波工程学院机械工程学院教授。