

文章编号: 1002-0446(2006)06-0636-06

轮式移动机器人在圆形管道中的运动学建模与分析*

宋章军, 陈 晟, 杨向东

(清华大学精密仪器与机械科学系制造工程研究所, 北京 100084)

摘 要: 为解决圆形管道中轮式移动机器人的运动控制问题, 分析了轮式移动机器人在圆形管道中的运动学特性. 借助接触点的切平面, 单个轮子在平面上的位置和运动描述方法被应用在圆管的柱面上. 推导了单个轮子在柱面上纯滚动时轮心的轨迹和速度. 运用刚体运动瞬时螺旋理论, 对由两个固定轮和一个舵轮组成的 (1, 1) 型三轮机器人在圆形管道中的运动进行了建模分析, 并对此运动学模型进行了仿真.

关键词: 轮式移动机器人; 运动学模型; 柱面; 瞬时螺旋

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Kinematic Modeling and Characteristic Analysis for Wheeled Mobile Robots in Round Ducts/Pipes

SONG Zhang-jun, CHEN Ken, YANG Xiang-dong

(Institute of Manufacturing Engineering, Department of Precision Instruments and Mechanology,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract To solve the motion control problem of wheeled mobile robots in round ducts or pipes, kinematic characteristics of wheeled mobile robots in round ducts or pipes are analyzed. Description of the position and motion of a wheel on a plane is applied to the cylinder of round ducts/pipes by dint of the tangent plane of the contacting point. The trajectory and velocity of the center of the wheel is deduced when it purely rolls in the cylinder. With the theory of instantaneous screw of a rigid-body motion, the kinematic model of three-wheel type (1, 1) robots with two fixed wheels and a steering wheel in the cylinder of round ducts/pipes is presented and discussed. Simulation results are presented to show the performance of the kinematic model.

Keywords wheeled mobile robot; kinematic model; cylinder; instantaneous screw

1 引言 (Introduction)

轮式移动机器人能以相对简单的机构实现高速稳定的移动, 且与其他移动机构相比具有较高的能量利用率, 因此越来越多地应用在农业、工业、火星探测和人们日常生活中. Campion 等人对轮式移动机器人的轮子结构与分类, 轮式移动机器人的分类, 水平平整路面上轮式移动机器人的运动学与动力学模型进行了分析^[1, 2]. 文 [3~5] 对轮式移动机器人在非平整路面上的运动学和动力学进行了分析. 文 [6~7] 对火星探测轮式移动机器人的运动学建模、规划、控制给出了详细的分析和讨论. 但这些运动学模型并不能解决圆形管道环境中轮式移动机器人的运动控制问题.

由于轮式移动机器人在管道的柱面上运动时具有特殊的几何约束, 所以轮式移动机器人在柱面上的运动学模型比较复杂. 为解决圆形管道中轮式移动机器人的运动控制问题, 本文把单个轮子在平面上的运动描述方法通过切平面推广到柱面上, 分析出单个轮子在柱面上纯滚动时轮心的轨迹和速度. 在此基础上, 提出了轮式移动机器人在柱面上位姿的描述方法, 分析了其在柱面上运动时的几何约束, 列出其约束方程, 最后对具有代表性的 (1, 1) 型三轮移动机器人在柱面上的运动进行了建模分析, 并对轮子的轨迹、几何约束条件和 (1, 1) 型三轮移动机器人的原点瞬时速度进行了仿真.

2 圆形管道中单个轮子的运动学分析 (The motion analysis of a single wheel in round ducts/pipes)

为了使分析问题简单, 做如下假设: (1) 轮子简化成一个圆盘, 与壁面接触是点接触; (2) 轮子与壁面之间是纯滚动; (3) 轮子与壁面都是刚性的.

2.1 单个轮子在平面上的纯滚动

如图 1 所示, 单个轮子在平面上的运动用 5 个广义坐标 x, y, α, β 和 ϕ 来描述. x, y 是接触点 Q 的坐标; α 确定了接触点运动方向与 y 轴的关系; β 表示轮子平面的倾斜角度; ϕ 是轮子滚动时的转角. 从接触点在平面上的运动可得到轮子做纯滚动时的两个非完整约束:

$$\begin{cases} \dot{x} = r\dot{\phi}\sin\alpha \\ \dot{y} = r\dot{\phi}\cos\alpha \end{cases} \quad (1)$$

其中 r 为轮子半径. 那么单个轮子在平面上纯滚动时, 有 5 个广义坐标和两个运动约束, 系统的自由度是 $3^{[8]}$.

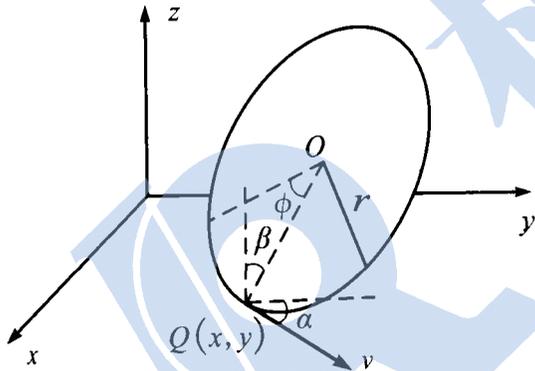


图 1 轮子在平面上纯滚动时运动分析

Fig 1 Kinematic analysis of a pure-rolling wheel on a plane

2.2 单个轮子在柱面上的纯滚动

单个轮子在圆管的柱面上的运动描述借鉴单个轮子在平面上的运动描述, 与其不同的是 α 定义在接触点 O_1 的切平面上. 如图 2 所示, 轮子与管道的柱面相切于 O_1 点. 以圆管轴线为 x 轴, 管道截面中与 x 轴垂直向上的方向为 z 轴, 同时与 x 轴和 z 轴垂直的方向为 y 轴, 建立绝对坐标系. 过 O_1 作管道柱面的切平面和轮缘圆的切线 m . 切平面的法向量 O_1O_2 和切线 m 的法线 O_1O 之间的夹角为 β ; 切线 m 与柱面母线 l 之间的夹角为 α . 它们之间的几何关系如图 2 所示.

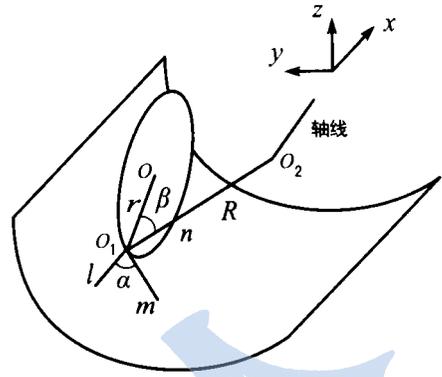


图 2 轮子在圆管的柱面上纯滚动时运动分析

Fig 2 Kinematic analysis of a pure-rolling wheel in the cylinder of round ducts/pipes

当轮子以角速度 ω 在柱面上纯滚动时, 柱面上与轮子接触点的集合为:

$$\begin{cases} x = -\omega t r \cos\alpha \\ y = R \cos\left[\frac{-\omega t r \sin\alpha}{R}\right] \\ z = R \sin\left[\frac{-\omega t r \sin\alpha}{R}\right] \end{cases} \quad (2)$$

其中 R 为柱面的半径, t 为运行时间. 表示成空间曲线为:

$$p(t) = \left[-\omega t r \cos\alpha, R \cos\left[\frac{-\omega t r \sin\alpha}{R}\right], R \sin\left[\frac{-\omega t r \sin\alpha}{R}\right] \right] \quad (3)$$

在不产生混淆的情况下, 本文用 c 表示 \cos , s 表示 \sin .

以曲线在接触点 O_1 处的切矢、主法线与副法线为坐标轴建立活动坐标系, 即弗朗内特 (Frenet) 活动标架^[9], 如图 3 所示.

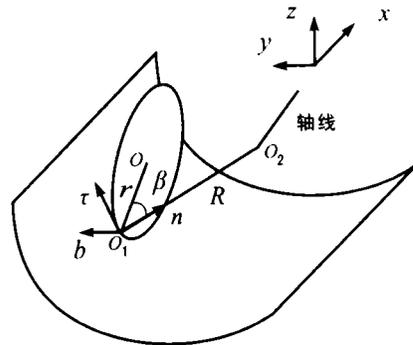


图 3 接触点弗朗内特活动标架的建立

Fig 3 Frenet frame based on the contacting point

单位切矢

$$\tau = \frac{\dot{\mathbf{p}}}{\|\dot{\mathbf{p}}\|} \quad (4)$$

副法矢

$$\mathbf{b} = \frac{\dot{\mathbf{p}} \times \ddot{\mathbf{p}}}{\|\dot{\mathbf{p}} \times \ddot{\mathbf{p}}\|} \quad (5)$$

主法矢

$$\mathbf{n} = \mathbf{b} \times \tau = \frac{(\dot{\mathbf{p}} \times \ddot{\mathbf{p}}) \times \dot{\mathbf{p}}}{\|(\dot{\mathbf{p}} \times \ddot{\mathbf{p}}) \times \dot{\mathbf{p}}\|} \quad (6)$$

坐标转换矩阵, 也称哈登伯特-迪那维特 (Hartenberg-Denavit) 矩阵为:

$$\mathbf{D}^{(ij)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{(ij)} & \vdots & \mathbf{d}_{ij}^{(i)} \\ \dots & \vdots & \dots \\ 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{A}^{(ij)} = \mathbf{e}^{(i)} \cdot \mathbf{e}^{(j)T} = [\tau \ \mathbf{n} \ \mathbf{b}]^T \cdot \mathbf{e}^{(j)T}$.

$$\mathbf{d}_{ij}^{(i)} = \begin{bmatrix} -\omega r \cos \alpha \\ R \cos \left[\frac{(-\omega r \sin \alpha)}{R} \right] \\ R \sin \left[\frac{(-\omega r \sin \alpha)}{R} \right] \end{bmatrix} \quad (8)$$

轮心在弗朗内特活动标架中的坐标为 $(0, r \cos \beta, r \sin \beta)$, 那么轮心在绝对坐标系下的坐标

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{D}^{(ij)} \begin{bmatrix} 0 \\ r \cos \beta \\ r \sin \beta \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r \sin \beta \alpha - \omega r \cos \alpha \\ -r \cos \beta \left(\frac{\omega r \sin \alpha}{R} \right) + r \sin \beta \cos \alpha \left(\frac{\omega r \sin \alpha}{R} \right) + R \cos \left(\frac{\omega r \sin \alpha}{R} \right) \\ r \cos \beta \left(\frac{\omega r \sin \alpha}{R} \right) + r \sin \beta \cos \alpha \left(\frac{\omega r \sin \alpha}{R} \right) - R \sin \left(\frac{\omega r \sin \alpha}{R} \right) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

对上式进行一次微分, 可以得到轮心的速度 $\mathbf{v} = (\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z})$. 过轮心的柱面的半径方向向量为 $\mathbf{n} = (0, -y, -z)$, 由于 $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0$ 所以轮心的速度方向垂直于过轮心的柱面的半径.

轮心的速度大小

$$\begin{aligned} \|\mathbf{v}\| &= \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \\ &= \frac{\omega r}{R} (-2r^2 \cos^2 \beta \cos^2 \alpha + r^2 \cos^2 \beta - 2R \cos \beta \\ &\quad + 2R r \cos \beta \cos^2 \alpha + R^2 + r^2 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta + r^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (10)$$

3 轮式移动机器人在圆管的柱面上位姿描述 (Posture description of wheeled mobile robots in the cylinder of round ducts/pipes)

机器人在管道的柱面上的位姿可以用机器人上一点绝对坐标 (x_0, y_0, z_0) 和它的欧拉角 (φ, θ, ψ) 表示.

欧拉角的定义如下: 移动机器人在管道中的某一位置的位姿可以看成移动机器人由原始位置和姿态经过平移和旋转得到. 旋转的过程如下, 机器人先绕 x 轴旋转 ψ , 然后绕 y 轴旋转 θ 最后绕 z 轴旋转 φ . 欧拉角 ψ, θ, φ 也称为偏转、俯仰和横滚角.

根据欧拉角的定义, 旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}(\varphi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} c\varphi c\theta & c\varphi s\theta s\psi - s\varphi c\psi & c\varphi s\theta c\psi + s\varphi s\psi & 0 \\ s\varphi c\theta & s\varphi s\theta s\psi + c\varphi c\psi & s\varphi s\theta c\psi - c\varphi s\psi & 0 \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据移动自由度和转向自由度的不同, Campin 等人把轮式机器人分为 5 类^[1,2], 其中 (1, 1) 型轮式机器人的实际应用最多. 轮式机器人在管道中通常只有 3 个轮子同时与柱面接触, 所以研究轮式移动机器人在柱面上的运动特性, (1, 1) 型三轮机器人具有代表意义.

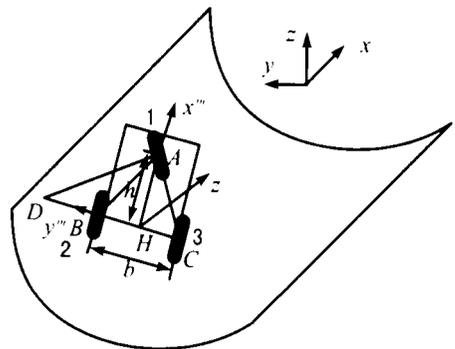


图 4 机器人上移动坐标系的建立

Fig 4 Moving coordinate system in the mobile robot

如图 4 所示, (1, 1) 型三轮机器人的前轮为舵轮, 后两轮为固定轮^[1,2]. 已知后面两轮之间距离为 b , 后轮轴与前轮轮心之间的距离为 h . 在机器人上以垂足 H 点为原点, HA 为 x 轴, HB 为 y 轴以及它们的垂线为 z 轴, 建立移动坐标系. 根据前面横滚、俯仰和偏转角的定义和式 (11), 从移动坐标系到绝对坐标

系的坐标转换矩阵为:

$$D^{(ij)} = \begin{bmatrix} R(\varphi, \theta, \psi) & d_{ij} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 $d_{ij} = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$. 绝对坐标系的建立与 2.2 节中相同, (x_0, y_0, z_0) 为移动坐标系原点 H 在绝对坐标系下的坐标. 机器人上一点在移动坐标系下坐标为 (x, y, z) , 在绝对坐标系下坐标为 (x, y, z) , 有

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = D^{(ij)} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据式 (13), 前轮的轮心在绝对坐标系下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \\ 1 \end{bmatrix} = D^{ij} \begin{bmatrix} h \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(c\varphi c\psi + s\varphi s\psi) + x_0 \\ h \cdot c\theta s\psi + y_0 \\ h(-s\varphi c\psi + c\varphi s\psi) + z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

同理可求出左后轮的轮心在绝对坐标系下的坐标为:

$$\begin{cases} x_B = \frac{b}{2}(-c\varphi s\psi + s\varphi \theta c\psi) + x_0 \\ y_B = \frac{b}{2}c\theta c\psi + y_0 \\ z_B = \frac{b}{2}(s\varphi s\psi + c\varphi \theta c\psi) + z_0 \end{cases} \quad (15)$$

右后轮的轮心在绝对坐标系下的坐标为:

$$\begin{cases} x_C = -\frac{b}{2}(-c\varphi s\psi + s\varphi \theta c\psi) + x_0 \\ y_C = -\frac{b}{2}c\theta c\psi + y_0 \\ z_C = -\frac{b}{2}(s\varphi s\psi + c\varphi \theta c\psi) + z_0 \end{cases} \quad (16)$$

三轮机器人的每个轮子的外缘圆都可以看成是一条空间曲线, 可以用参数方程来表示^[9]. 如图 4 所示, 在移动坐标系中, 前轮外缘圆可表示为:

$$p_1(t_1) = [h + r \cos \gamma \cos t_1 \quad r \sin \gamma \cos t_1 \quad r \sin t_1] \quad (17)$$

左后轮外缘圆可表示为:

$$p_2(t_2) = \left[r \cos t_2 \quad \frac{b}{2} \quad r \sin t_2 \right] \quad (18)$$

右后轮外缘圆可表示为:

$$p_3(t_3) = \left[r \cos t_3 \quad -\frac{b}{2} \quad r \sin t_3 \right] \quad (19)$$

其中 γ 为舵轮转角, t_1, t_2, t_3 为参数, 表示动半径与基半径之间的夹角, 且都属于 $[0, 2\pi)$.

根据式 (13) 可求出 3 个轮子外缘圆在绝对坐标系下的参数方程 $p_1(t_1), p_2(t_2), p_3(t_3)$.

圆上每一点的切向量

$$v = \frac{dp(t)}{dt} \quad (20)$$

机器人在管道的柱面上行驶时, 3 个轮子与管道的柱面始终相切, 轮子外缘圆上接触点的切向量属于柱面上过接触点的切空间, 所以接触点的切向量垂直于切平面的法向量. 根据两向量垂直的条件有:

$$v \cdot n = 0 \quad (21)$$

每个轮子可以列出一个方程, 所以根据上式可以列出 3 个方程. 其中 n 为柱面上接触点 Q 的切平面的法向量, 有:

$$n = (0 \ -y_Q \ -z_Q) \quad (22)$$

其中, (x_Q, y_Q, z_Q) 为接触点 Q 在绝对坐标系下的坐标. 接触点坐标满足参数方程 $p_1(t_1), p_2(t_2), p_3(t_3)$.

同时, 接触点 Q 在绝对坐标系下的坐标满足管道的柱面方程:

$$y_Q^2 + z_Q^2 = R^2 \quad (23)$$

3 个轮子可以列出 3 个方程. 式 (21) 和式 (23) 共有 6 个方程, 包含有 $x_0, y_0, z_0, \varphi, \theta, \psi, t_1, t_2$ 和 t_3 共 9 个未知数. 减掉求解 t_1, t_2 和 t_3 所需要的 3 个方程, 还剩下 3 个方程. 所以用机器人上一点坐标 (x_0, y_0, z_0) 和它的欧拉角 (φ, θ, ψ) 表示机器人的位姿时, 根据相切条件可以得到 3 个约束方程. 从上面的方程组可以看出, x_0 是独立的, 剩下的 5 个变量中如果已知其中的两个, 根据约束方程可以求解出其余的 3 个.

由上面分析得出, 三轮机器人在柱面上的位姿用一点坐标和机器人的欧拉角表示时, 具有 6 个广义坐标和 3 个约束方程, 所以其具有 3 个自由度.

4 轮式移动机器人在圆管的柱面上的运动学模型 (Kinematic model of wheeled mobile robots in the cylinder of round ducts/pipes)

对于图 4 所示的 (1, 1) 型三轮机器人, 假设左后轮 (即轮 2) 为驱动轮, 它的转速为 $\dot{\phi}_2(t)$, 舵轮的方向角为 $\gamma(t)$, 那么控制输入为 $\dot{\phi}_2(t)$ 和 $\gamma(t)$.

在第 3 节中已经分析, 如果已知机器人某时刻的位姿 $(x_0, y_0, z_0, \varphi, \theta, \psi)$, 则根据约束方程可求出轮 2 与柱面接触点 Q_2 的绝对坐标 $(x_{Q_2}, y_{Q_2}, z_{Q_2})$ 和此点的切向量 \vec{v}_{Q_2} .

接触点 Q_2 的切平面的法向量为:

$$\vec{n}_2 = (0 \quad -y_{Q_2} \quad -z_{Q_2}) \quad (24)$$

在轮平面里接触点 Q_2 的切线的法向量为:

$$\vec{Q_2B} = (x_B - x_{Q_2} \quad y_B - y_{Q_2} \quad z_B - z_{Q_2}) \quad (25)$$

其中 (x_B, y_B, z_B) 为轮 2 的轮心坐标, 根据式 (15) 求出.

根据单个轮子在管道里位置与运动描述中 α, β 的定义, 有:

$$\alpha = \arccos \frac{l \cdot \vec{w}_{Q_2}}{\|l\| \cdot \|\vec{w}_{Q_2}\|} \quad (26)$$

$$\beta = \arccos \frac{\vec{Q_2B} \cdot \vec{n}_2}{\|\vec{Q_2B}\| \cdot \|\vec{n}_2\|} \quad (27)$$

式中的 l 为经过接触点母线的方向向量, 可取为:

$$l = (1 \quad 0 \quad 0) \quad (28)$$

得出轮 2 的 α 和 β 之后, 根据式 (10) 可以求出轮 2 的轮心速度大小 $\|v_2\|$.

根据前面单个轮子在柱面上的运动学分析, 对于三轮机器人上的每个轮子, 轮心的速度垂直于过轮心的柱面的半径, 同时垂直于该轮的轴线, 如图 4 所示, 所以轮 1 的轮心速度为:

$$v_1 = \|v_1\| \frac{\vec{DA} \times \vec{n}_A}{\|\vec{DA} \times \vec{n}_A\|} \quad (29)$$

轮 2 的轮心速度为:

$$v_2 = \|v_2\| \frac{\vec{BC} \times \vec{n}_B}{\|\vec{BC} \times \vec{n}_B\|} \quad (30)$$

轮 3 的轮心速度为:

$$v_3 = \|v_3\| \frac{\vec{BC} \times \vec{n}_C}{\|\vec{BC} \times \vec{n}_C\|} \quad (31)$$

其中 \vec{DA} 为前轮轴方向向量, \vec{BC} 为后轮轴方向向量, $\vec{n}_A = (0 \quad -y_A \quad -z_A)$, $\vec{n}_B = (0 \quad -y_B \quad z_B)$, $\vec{n}_C = (0 \quad -y_C \quad -z_C)$. (x_A, y_A, z_A) 为轮 1 的轮心坐标, 由式 (14) 求出; (x_C, y_C, z_C) 为轮 3 的轮心坐标, 由式 (16) 求出.

把机器人看成一个刚体, 机器人在柱面上的运动是一个一般刚体的运动问题. 设瞬时转动轴为直线 L , 用 Plücker 坐标^[10] 表示为:

$$K_L = \begin{bmatrix} e \\ n \end{bmatrix} \quad (32)$$

其中有 $e \cdot e = 1$, $n \cdot e = 0$

瞬时螺旋轴也可以用轴上距离原点最近的矢量 p'_0 来描述, 有:

$$p'_0 = \frac{\omega \times (\dot{a} - \omega \times a)}{\|\omega\|} \quad (33)$$

式中的 ω 是刚体瞬时螺旋的角速度矢量, $\|\omega\|$ 表示角速度的大小, 且 $\omega = \|\omega\| e$, \dot{a} 表示刚体上任一点 A 点速度, a 为 A 点的位置矢量. 根据式 (33), 3 个轮心可以列出 3 个方程. 用 v_{\parallel} 表示 v 平行于直线 L 的速度分量, 即 v 到角速度矢量 ω 上的投影. 因为刚体上所有点的速度到角速度矢量上的投影都是相等的, 所以有:

$$v_{1\parallel} = v_{2\parallel} = v_{3\parallel} \quad (34)$$

即

$$v_1 \cdot e = v_2 \cdot e = v_3 \cdot e \quad (35)$$

由式 (33) 和 (35) 可以列出 5 个方程, 加上 $e \cdot e = 1$ 共有 6 个方程. 方程组中有 $e_x, e_y, e_z, \|v_1\|, \|v_3\|, \|\omega\|$ 共 6 个未知数, 可以解出这 6 个方程.

移动机器人上移动坐标系原点 H 的速度为:

$$v_H = v_{H\parallel} + v_{H\perp} \quad (36)$$

式中 $v_{H\parallel}$ 为平行于直线 L 的速度分量, $v_{H\perp}$ 为垂直直线 L 的速度分量. 那么

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{Hx} \\ v_{Hy} \\ v_{Hz} \end{bmatrix} \quad (37)$$

根据第 3 节的分析, $y_{Q_2}, z_{Q_2}, \varphi, \theta, \psi$ 中只要知道其中的 2 个, 由约束方程可以求出剩下的 3 个变量, 所以式 (37) 即为 (4, 1) 型三轮移动机器人在柱面上的运动学方程.

5 仿真实验 (Simulation experiment)

5.1 单个轮子在柱面上纯滚动的仿真实验

取圆形管道的半径 $R = 250\text{mm}$, 轮子半径 $r = 50\text{mm}$, 角速度 $\omega = 2\text{rad/s}$, $\alpha = \pi/3$, $\beta = \pi/3$, $t < 22\text{s}$ 时, 接触点轨迹、轮心的轨迹和轮子的外缘圆仿真如图 5 所示. 为了使轨迹看得清楚, 把管道“锯掉”了一半.

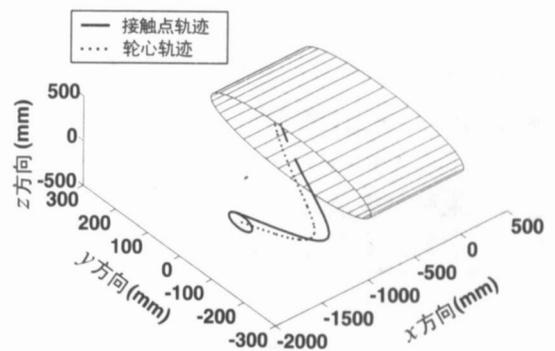


图 5 单个轮子在柱面上纯滚动时接触点、轮心的轨迹
Fig. 5 Trajectory of the center point, tangent point when a wheel purely rolls in the cylinder

5.2 约束方程的求解与运动学仿真

管道和轮子尺寸与前面相同, 设 $b = 280\text{mm}$, $h = 300\text{mm}$, $\forall = \pi/6$ 如果已知 $\theta = \phi = 0$ 即后轮轴线处于水平的位置, 根据前面的分析列出约束方程, 求解剩下的 6 个未知数. 当 $t_1 = t_2 = t_3 = 4.8562\text{rad}$ 时, 去掉复数解, 得到 4 组实数解, 分别为:

$$\begin{aligned} y_0 = 0 \quad z_0 = -157.1232\text{mm}, \quad \varphi = 0.1438\text{rad} \\ y_0 = 0 \quad z_0 = -255.0753\text{mm}, \quad \varphi = 2.9978\text{rad} \\ y_0 = 0 \quad z_0 = 255.0753\text{mm}, \quad \varphi = -0.1438\text{rad} \\ y_0 = 0 \quad z_0 = 157.2132\text{mm}, \quad \varphi = -2.9978\text{rad} \end{aligned}$$

4 组解表示满足相切条件的机器人在空间中可以有 4 种位置: 第一组解表示机器人在管道底部, 与内壁相切; 第二组解表示机器人在管道底部, 与外壁相切; 第三组解表示机器人在管道顶部, 与内壁相切; 第四组解表示机器人在管道顶部, 与外壁相切.

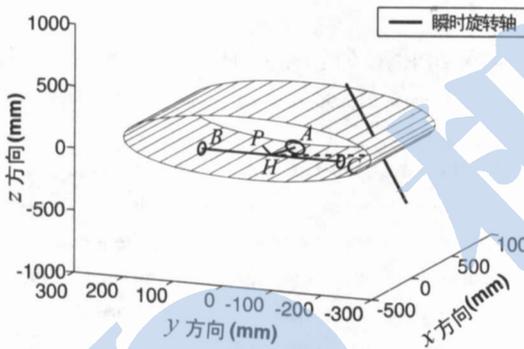


图 6 三轮机器人在柱面上的一个位姿及相应的瞬时旋转轴
Fig 6 A pose of the three-wheeled mobile robot in the cylinder and the homologous axis of instantaneous screw

取轮式移动机器人原点坐标 $x_0 = 100\text{mm}$, $y_0 = 0\text{mm}$, $z_0 = -157.1232\text{mm}$, 欧拉角 $\theta = \phi = 0$, $\varphi = 0.1438\text{rad}$. 根据机器人的结构参数和 3 个轮子的参数方程画出柱面上的 3 个轮子、后轮轴和后轮轴的垂线, 如图 6 所示.

从图中可以看出, 机器人的 3 个轮的外缘圆与柱面相切.

当左后轮作为驱动轮, 输入的转速 $\dot{\phi}_2(t) = 2\text{rad/s}$ 时, 根据式 (33)、式 (35) 和 $e \cdot e = 1$ 求出 $e_x = -0.5357$, $e_y = 0$, $e_z = 0.8444$. 角速度大小 $\|\omega\| = 0.2687\text{rad/s}$. 前轮轮心速度大小 $\|v_1\| = 79.9335\text{mm/s}$. 右后轮轮心速度大小 $\|v_3\| = 43.9245\text{mm/s}$.

那么, 机器人此时在柱面上运动的瞬时螺旋轴为:

$$\frac{x - 71.2898}{-0.5357} = \frac{y + 199.6104}{0} = \frac{z - 45.2273}{0.8444} \quad (38)$$

根据式 (38) 可绘出瞬时旋转轴, 如图 6 所示. 根据式 (37), 求得移动坐标系原点 H 的速度为 $[26.6712 \quad 22.4190 \quad 57.2218]$ (单位为 mm/s), 图 6 中的 \vec{HP} 表示原点的速度.

在计算中发现代入不同的舵轮转角, 根据约束方程解得的接触点坐标不同, 所以机器人位姿也不一样. 在求解瞬时旋转轴的过程中, 驱动轮输入转速 $\dot{\phi}_2(t)$ 不同时, 瞬时旋转轴的空间位置不发生变化, 说明瞬时旋转轴的空间位置只与舵轮转角和机器人当前位姿有关; 而瞬时螺旋的轴向速度和圆周速度随驱动轮输入转速的增大而变大.

6 结论 (Conclusion)

本文介绍的管道环境中轮式移动机器人模型建立在 Campion 等人提出的轮子结构与分类的基础上, 针对圆形管道这一特殊环境, 提出了机器人在圆形管道中的位姿描述方法, 并建立了 (1, 1) 型三轮机器人的运动学模型, 是轮式移动机器人运动学模型理论的扩展和补充.

管道环境中轮式移动机器人的建模与分析对通风管道清污机器人、输油管道、污水管道检测机器人等管道机器人的机械结构设计具有参考意义, 是这一类移动机器人运动分析与控制的基础.

参考文献 (References)

- [1] Campion G, Bastin G, D'Andrea-Novel B. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 47-62.
- [2] Canudas de Wit C, Siciliano B, Bastin G. Theory of Robot Control[M]. New York: Springer, 2001.
- [3] Choi B J, Sreenivasan S V. Motion planning of a wheeled mobile robot with slip-free motion capability on a smooth uneven surface[A]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, USA: IEEE, 1998. 3727-3732.
- [4] Hait A, Siméon T. Motion planning on rough terrain for an articulated vehicle in presence of uncertainties[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Piscataway, USA: IEEE, 1996. 1126-1133.
- [5] Lanon P, Krebs A, Lauria M, et al. Wheel torque control for a rough terrain rover[A]. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, USA: IEEE, 2004. 4682-4687.
- [6] Hacot H. Analysis and Traction Control of a Rocker-Bogie Planetary Rover[D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1998.

在样机试运行过程中,还发现了一些需要改进的不足之处:由于条件限制,使用的轮子并未达到原先设计的要求,采用的轮子接地面积小,接地比压大,在松软地面具有较大的下陷,导致运动阻力增大并且转弯耗能大;轮子上没有圆锥状突起,使得探测车很有可能在翻转时停留在轮子的顶面上.以上问题,都与轮子的结构有关,因此,可以通过不断改进轮子结构来解决.

4 结论 (Conclusion)

(1)本文介绍了一种新型可翻转星球探测车的设计方案,设计了45°轮架机构、新型姿态传感器、特殊的轮子结构和太阳能储能供电装置,以简单可靠的机构实现了探测车四面都可着地行驶,同时又保证翻转不影响太阳能的有效利用.这种探测车具有不怕翻转的优点,运行速度可以加快,为迅速到达指定探测地点执行探测任务创造了条件.

(2)可翻转探测车除可用于星球探测外,在军事、人员搜救、山洞探测等领域还有一定的研究应用价值.

(3)本文给出的可翻转探测车还只是初步的原型设计,仍然存在不少问题,比如它的越障能力还不强,要实现真正的星球探测,这方面还需做进一步的研究加以改进.

参考文献 (References)

- [1] Hayati S, Volpe R, Backes P, *et al*. The Rocky 7 rover on Mars [M]. Beijing: Science Press, 2004. 54-57.
- [2] Siegwart R, Lamon P, Estier T, *et al*. Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain [J]. *Robotics and Autonomous Systems* 2002, 40(2-3): 151-162.
- [3] Kubota T, Kuroda Y, Kuni Y, *et al*. Small lightweight rover "Mico5" for lunar exploration [J]. *Acta Astronautica* 2003, 52(2-6): 447-453.
- [4] 邓宗全, 胡明, 王少纯, 等. 摇臂-转向架式行星探测车移动系统的准静态分析 [J]. *机器人*, 2003, 25(3): 26-30.
- [5] 邓宗全, 高海波, 胡明, 等. 行星越障轮式月球车的设计 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(2): 203-207.
- [6] 刘方湖, 马培荪, 曹志奎, 等. 五轮铰接式月球机器人的运动学建模 [J]. *机器人*, 2001, 23(6): 481-492.
- [7] Chit Y, Shimura N, Igarashi H, *et al*. FUMA: environment information gathering wheeled rescue robot with one-DOF arm [A]. *Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety Security and Rescue Robotics* [C]. Piscataway, USA: IEEE, 2005. 81-86.
- [7] Iagnemma K, Dubowsky S. *Mobile Robots in Rough Terrain: Estimation, Motion Planning and Control with Application to Planetary Rovers* [M]. Berlin, Germany: Springer, 2004.
- [8] 希勒, 叶谋仁, 蔡忠全. *工程系统动力学* [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1986. 76-77.
- [9] 施法中. 计算机辅助设计与非均匀有理 B 样条 (CAGD & NUBRS) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994. 17-25.
- [10] Angeles J, 宋伟刚. *机器人机械系统原理理论、方法和算法*

sciencecraft prototype [A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* [C]. Piscataway, USA: IEEE, 1997. 2458-2464.

- [2] Siegwart R, Lamon P, Estier T, *et al*. Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain [J]. *Robotics and Autonomous Systems* 2002, 40(2-3): 151-162.
- [3] Kubota T, Kuroda Y, Kuni Y, *et al*. Small lightweight rover "Mico5" for lunar exploration [J]. *Acta Astronautica* 2003, 52(2-6): 447-453.
- [4] 邓宗全, 胡明, 王少纯, 等. 摇臂-转向架式行星探测车移动系统的准静态分析 [J]. *机器人*, 2003, 25(3): 26-30.
- [5] 邓宗全, 高海波, 胡明, 等. 行星越障轮式月球车的设计 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(2): 203-207.
- [6] 刘方湖, 马培荪, 曹志奎, 等. 五轮铰接式月球机器人的运动学建模 [J]. *机器人*, 2001, 23(6): 481-492.
- [7] Chit Y, Shimura N, Igarashi H, *et al*. FUMA: environment information gathering wheeled rescue robot with one-DOF arm [A]. *Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety Security and Rescue Robotics* [C]. Piscataway, USA: IEEE, 2005. 81-86.

作者简介:

曹杰 (1978-), 男, 博士生. 研究领域: 机电控制及自动化技术.

彭时林 (1981-), 男, 硕士生. 研究领域: 新型星球探测机器人的设计与控制.

史金飞 (1964-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机电系统工程与一体化技术, 微机控制及自动化技术, 新型电子机械的驱动与控制.

[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. 54-57.

作者简介:

宋章军 (1975-), 男, 博士生. 研究领域: 轮式移动机器人, 管道清扫机器人, 机器人智能控制.

陈 恩 (1954-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人与仿生学, 特种机器人及应用, 机电自动化及系统集成.

(上接第 641 页)