全地形移动机器人轮–地几何接触角估计

宋小康 [1, 2] 王越超 [1] 谈大龙 [1] 吴镇炜 [1]

摘 要 研究全地形移动机器人在不平坦地形中轮–地几何接触角的实时估计问题. 本文以带有被动柔顺机构的六轮全地形移动机器人为对象, 抛弃轮–地接触点位于车轮支撑臂延长线上这一假设, 通过定义轮–地几何接触角 δ 来反映轮–地接触点在轮缘上位置的变化和地形不平坦给机器人运动带来的影响, 将机器人看成是一个串–并联多刚体系统, 基于速度闭链理论建立考虑地形不平坦和车轮滑移的机器人运动学模型, 并针对轮–地几何接触角 δ 难以直接测量的问题, 提出一种基于模型的卡尔曼滤波实时估计方法. 利用卡尔曼滤波对机器人内部传感器的测量值进行噪声处理, 基于机器人整体运动学模型对各个轮–地几何接触角进行实时估计, 物理实验数据的处理结果验证了本文方法的有效性, 从而为机器人运动学的精确计算和高质量的导航控制奠定了基础.

关键词 全地形移动机器人, 轮–地几何接触角, 运动学建模, 卡尔曼滤波
中图分类号 TP24

Wheel-terrain Geometric Contact Angle Estimation of All-terrain Mobile Robots

SONG Xiao-Kang[1, 2] WANG Yue-Chao[1] TAN Da-Long[1] WU Zhen-Wei[1]

Abstract A real-time estimate method of wheel-terrain geometric contact angle for all-terrain mobile robots is studied in this paper. For a six-wheeled all-terrain mobile robot with a passive-compliant mechanism, the wheel-terrain geometric contact angle δ is defined to reflect the effects of terrain profile and the contact relationship between the driven wheel and the terrain. The robot is treated as a series-parallel multi-rigid body system. The kinematical model of the robot body considering the unevenness of the terrain and wheel slips is developed based on closed velocity chain. Since δ is hardly measured directly by on-board sensors, this paper proposes a model-based estimate method by using common on-board sensor data to on-line estimate the contact angle δ. The Kalman filter is used to fuse noisy sensor data. The experimental results demonstrate the availability and effectiveness of this method.

Key words All-terrain mobile robots, wheel-terrain geometric contact angle, kinematics modeling, Kalman filter

对于室内结构化环境或平坦硬质地形中的普通移动机器人, 地形属性对机器人移动性能的影响通常可不予考虑. 但随着移动机器人技术的发展, 移动机器人越来越多地应用于复杂地形环境中, 如星球探测机器人[1−3]、军事机器人[4] 以及其他野外作业移动机器人[5−6]. 野外地形环境可能崎岖不平, 既可能有岩石, 也可能是洼地, 甚至是松软地质, 复杂的环境地形给机器人的移动性能和地形通过能力提出严重挑战. 区别于结构化环境下的普通移动机器人, 非结构环境下考虑地形影响的轮式移动机器人被称为复杂地形移动机器人或全地形移动机器人[7]. 全地形移动机器人与普通移动机器人的关键区别之一是不能忽略环境地形的影响, 机器人与环境地形的接触是全地形移动机器人移动性能的基础[8], 同样的移动机器人在平坦硬质路面上与在沙地上的移动性能会差别很大. 因此对于全地形移动机器人, 无论建模、位姿估计, 还是路径规划、控制策略等方面, 考虑地形属性的影响都是非常必要的.

对于全地形移动机器人, 地形属性可从两个方面考虑: 1) 几何属性, 比如地形的崎岖不平程度; 2) 物理属性, 比如地形是硬质还是软质, 需要考虑地形的土壤特性. 不同的地形条件下, 机器人与地形的相互接触关系不同, 既影响机器人的运动学问题, 又涉及到机器人与地形的接触力学问题. 不少学者围绕全地形移动机器人的轮–地接触关系进行了大量研究, 根据地形条件的不同建立了不同的轮–地接触模型, 通常包括刚性轮–硬质地形接触和刚性轮–软质地形接触两种类型. 对于刚性轮–硬质地形接触的情况, 主要考虑地形的几何属性, 即在建立机器人模型时如何考虑地形不平度的影响. 王佐伟等[9] 以一个六轮悬臂式月球探测车为对象, 利用闭链坐标变换和瞬时重合坐标法研究了它的运动学问题, 但该研究假设车轮与地形的接触点位于车轮竖向支撑臂的延长线上, 这个假设本质上忽略了地形的几何变化, 认为车轮与地形的接触点是固定的, 这与实际情况有一定差距. 事实上, 对于全地形移动机器人而言, 地形不再是平坦地形, 而是三维不平坦地形, 在机器人移动过程中轮–地接触点不一定在车轮竖向支撑臂的延长线上, 而是在车轮轮缘上发生变化. Tarokh 等[10] 在建立 Rocky7 火星车的运动学模型时分别定义了车轮坐标系和轮–地接触点瞬时坐标系, 利用这两个坐标系坐标轴之间的夹角定义了

收稿日期 2007-04-10 收修改稿日期 2007-12-05
Received April 10, 2007; in revised form December 5, 2007
国家自然科学基金 (60535010) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60535010)
1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016 2. 中国科学院研究生院 北京 100049
1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016 2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.00778

接触角 (Contact angle) 概念, 这里的接触角不仅与地形坡度有关, 还与机器人自身的姿态有关, 可以说这里的接触角反映了轮 – 地几何接触关系, 但研究并没有说明如何在物理系统上获取接触角的值. Iagnemma 等[11] 针对一些力矩控制算法中用到的车 – 地接触角 (Vehicle-ground contact angle), 提出了一种基于卡尔曼滤波的车 – 地接触角估计方法, 利用车载传感器对移动机器人轮 – 地接触点处的车 – 地接触角进行估计. 需要指出的是, Iagnemma 等使用的接触角概念, 实际上是地形坡度角. 地形坡度角描述的是地形本身的几何属性, 并不反映车轮与地形的接触关系. 对于刚性轮 – 软质地形接触的情况, 主要考虑地形的物理属性, 需要计算车轮与地形之间的接触力, 与地形的土壤特性有关. 喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 的 Sohl 等[12] 考虑了星球表面探测车在不平地形上移动时的物理行为, 基于车轮与地形点接触假设, 研究了仿真环境下的轮 – 地接触模型; 麻省理工大学的 Shibly 等[13] 研究了松软地形下刚性轮与土壤的接触力学, 给出了刚性轮 – 软质地形接触力的等效计算公式. 轮 – 地接触力与特定地形的物理特性有关, 需要已知诸如粘性系数、摩擦角等物理参数, 为此, Iagnemma 等[14−15] 提出了一种关键地形参数在线估计方法, 可利用里程计、陀螺等机器人内部传感器对地形粘性系数和摩擦角进行实时计算, 从而为轮 – 地接触力的计算提供了可行方法. 为了克服地形的影响, 全地形移动机器人通常具有较为复杂的移动机构, 使得它的建模工作更加困难, 特别对于具有被动柔顺机构的六轮全地形移动机器人, 由于它的移动速度较低, 在建立它的模型时通常只考虑运动学模型, 并假设驱动轮与地形的接触为刚性轮 – 硬质地形接触, 通过定义轮 – 地接触角来反映驱动轮与地形的几何接触关系, 为了区别于 Iagnemma 等定义的车 – 地接触角, 这里特别地将轮 – 地接触角称为轮 – 地几何接触角, 它受地形表面的几何变化和机器人本身姿态两方面的影响. 但由于轮 – 地几何接触角难以直接测量, 从而使得精确的运动学求解难以进行. 针对这一问题, 本文以带有被动柔顺机构的六轮全地形移动机器人为对象, 在深入分析其运动学模型的基础上, 提出了一种基于模型的轮 – 地几何接触角在线估计方法, 并利用卡尔曼滤波方法对机器人内部传感器的测量噪声进行滤波处理. 通过对轮 – 地几何接触角进行实时估计, 可更好地了解机器人在移动过程中驱动轮与地形的几何接触关系, 为复杂地形下机器人的运动学精确求解和运动控制奠定了基础.

1　运动学建模

本文以作者所在实验室研制的六轮全地形移动机器人为对象 (如图 1 所示). 该机器人为六轮独立驱动, 前后四轮通过舵轮实现独立转向, 六个驱动轮分别通过左右两侧的摇杆 – 转向架机构与车体相连, 转向架将中、后轮连接至摇杆, 摇杆将前轮和转向架连接至车体.

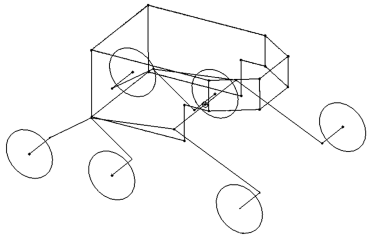

图 1　六轮全地形移动机器人示意图

Fig. 1　A six-wheeled all-terrain mobile robot

1.1　建立坐标系

建立运动学模型时, 假设各驱动轮与地形的接触为点接触, 接触点位于车轮的轮缘上. 定义右侧前、中、后车轮的编号分别为 1、2、3 轮, 对应左侧前、中、后车轮的编号分别为 4、5、6 轮. R 为车体坐标系; D 为差动铰中心的坐标系; B_1、B_2 分别为右、左两侧转向架坐标系; O_1、O_4 分别表示右、左两侧中间轮 2、4 的过渡坐标系, 建立在对应中间轮的正上方; S_1、S_4 分别为右、左两侧前舵轮坐标系, S_3、S_6 分别为右、左两侧后舵轮坐标系; $A_i(i = 1, 2, \cdots, 6)$ 表示各车轮的坐标系, 坐标原点在轮心轴上. 车体右、左两侧摇杆绕 D 系 z 轴的转角分别记为 β_1 和 β_2, 由于左右两侧的摇杆用差动器相连, 所以左右两侧的摇杆转角相差一个负号, 若记 $\beta_1 = \beta$, 则 $\beta_2 = -\beta$; 右、左两侧转向架分别绕 $B1$、$B2$ 系 z 轴的转角记为 ρ_1 和 ρ_2. 关节角 β、ρ_1、ρ_2 随着地形几何属性的不同而不同, 当机器人在平坦地形上移动时, $\beta = \rho_1 = \rho_2 = 0$; 当地形崎岖不平时, 这些关节角可被动地适应地形的变化. 各驱动轮的转角记为 θ_i, $i = 1, \cdots, 6$; 各舵轮的转角记为 ψ_j, $j = 1, 3, 4, 6$; 图 2 所示为车体右侧坐标系的位置和方向, 左侧坐标系与右侧类似. 车体上各坐标系之间的位姿关系可用 D-H 参数描述.

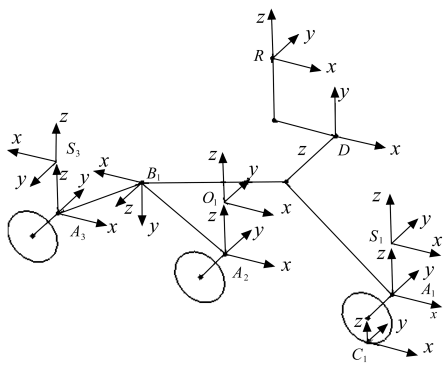

图 2　机器人右侧坐标系

Fig. 2　The robot′s coordinate system on the right side

1.2 轮–地几何接触角及车轮滑移模型

各轮接地点的坐标系 C_i, $i = 1, \cdots, 6$, 如图 3 所示. C_i 坐标系的 z 轴垂直于接触的地面向上, x 轴沿地形的切线方向, y 轴方向按右手法则确定. 车轮坐标系 A_i 建立在轮心处, 与车轮固接. 定义 z_{Ai} 与 z_{Ci} 之间的夹角 δ_i 为轮–地几何接触角. 在平坦地形下, 轮–地接触点 C_i 位于 z_{Ai} 轴延长线与轮缘的交点处, 此时 z_{Ai} 与 z_{Ci} 重合, 轮–地几何接触角 δ_i 恒为 0. 图 4 为轮–地接触点的滑移模型. $(t-\Delta t)$ 时刻驱动轮 i 的轮–地接触点坐标系记为 $C_i(t-\Delta t)$, t 时刻驱动轮 i 的轮–地接触点坐标系记为 $C_i(t)$, 车轮的前向滑移记为 ξ_i, 加上车轮滚动产生的位移量 $r\theta_i$, 车轮在 Δt 时间内的前向位移量为 $r\theta_i + \xi_i$, η_i 和 ζ_i 分别表示车轮的侧向滑移和转动滑移.

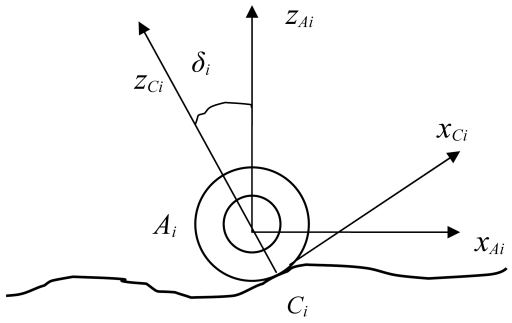

图 3 轮–地接触点 C_i 坐标系示意图

Fig. 3 Coordinate frame of wheel-terrain contact point C_i

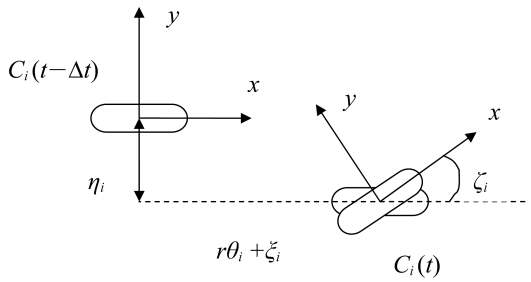

图 4 车轮滑移示意图

Fig. 4 Wheel slips

1.3 运动学模型

建立车体的各坐标系后, 利用矩阵变换可推导出各坐标系之间的位姿关系. 设车体坐标系 R 相对于固定世界坐标系 W 的位姿为 $\boldsymbol{u} = [x\ y\ z\ \phi_x\ \phi_y\ \phi_z]^{\mathrm{T}}$, 其中, $[x\ y\ z]^{\mathrm{T}}$ 表示车体的位置, ϕ_x、ϕ_y、ϕ_z 分别表示车体的横滚角、俯仰角和航向角. 对于该六轮全地形移动机器人, 车体的速度来自于每个驱动轮速度. 将该六轮移动机器人看成是一个混合串–并联多刚体系统, 从每个轮–地接触点坐标系 C_i 到车体坐标系 R 形成一个串联子系统. 对于每个串联子系统, 形成一个封闭的速度链, 在这个速度闭链中存在速度等价关系, 可直接写出每个车轮的速度与车体速度之间的运动关系. 将车体速度 $\dot{\boldsymbol{u}}$、摇杆的摆动速度 $\dot{\beta}$、转向架的摆动速度 $\dot{\rho}$(包括 $\dot{\rho}_1$、$\dot{\rho}_2$)、舵轮转向速度 $\dot{\psi}_j$、轮–地几何接触角速度 $\dot{\delta}_i$ 称为车体构形空间速度, 将驱动轮转速 $\dot{\theta}_i$、车轮前向滑移速度 $\dot{\xi}_i$、车轮侧向滑移速度 $\dot{\eta}$、车轮转动滑移速度 $\dot{\zeta}_i$ 称为车轮构形空间速度, 则对于每个驱动轮, 在车体坐标系中, 车体构形空间速度在轮心处的线速度投影之和与车轮构形空间速度在轮心处的线速度投影之和等价, 可直接列出速度方程如下

$$\dot{\boldsymbol{X}} + D_i\dot{\boldsymbol{\phi}} + \boldsymbol{D}_{1i}\dot{\beta} + \boldsymbol{D}_{2i}\dot{\rho} = \boldsymbol{M}_i r\dot{\theta}_i + \boldsymbol{M}_i\dot{\xi}_i + \boldsymbol{N}_i\dot{\eta}_i \quad (1)$$

其中, 方程左边为车体坐标系下车体构形空间速度在轮心处的线速度投影之和, 右边为车体坐标系下车轮构形空间速度在轮心处的线速度投影之和; $\dot{\boldsymbol{X}} = [\dot{x}\ \dot{y}\ \dot{z}]^{\mathrm{T}}$ 表示车体线速度; $\dot{\boldsymbol{\phi}} = [\dot{\phi}_x\ \dot{\phi}_y\ \dot{\phi}_z]^{\mathrm{T}}$ 表示车体角速度; r 为驱动轮半径; $D_i = \begin{bmatrix} 0 & r_z & -r_y \\ -r_z & 0 & r_x \\ r_y & -r_x & 0 \end{bmatrix}$ 为一负对称矩阵, 表示车体角速度到驱动轮轮心的投影矩阵; $\boldsymbol{D}_{1i} = [r_z\ 0\ -r_x]^{\mathrm{T}}$, 表示在车体坐标系下, 摇杆摆动角速度 $\dot{\beta}$ 到驱动轮轮心的投影矢量; $\boldsymbol{D}_{2i} = [r_{\rho z}\ 0\ -r_{\rho x}]^{\mathrm{T}}$, 表示在车体坐标系下, 转向架摆动角速度 $\dot{\rho}$ 到驱动轮轮心的投影矢量; $\boldsymbol{M}_i$、$\boldsymbol{N}_i$ 均为 3×1 向量, 分别表示在车体坐标系下驱动轮 i 的前向滑移速度 $\dot{\xi}_i$ 和侧向滑移速度 $\dot{\eta}_i$ 到轮心处的投影矢量, 且有如下关系

$$\boldsymbol{M}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_i = \boldsymbol{N}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}_i = 1 \quad (2)$$

$$\boldsymbol{M}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}_i = 0 \quad (3)$$

另外, 对于每个串联子系统, 表示在车体坐标系 R 中的车体构形空间速度在对应驱动轮轮心处的角速度投影之和, 与表示在车体坐标系 R 中的车轮构形空间速度在对应驱动轮轮心处的角速度投影之和相等, 这样, 对第 i 个驱动轮还可直接列出轮心处的角速度等价方程如下

$$\dot{\boldsymbol{\phi}} + \boldsymbol{C}_{1i}\dot{\beta} + \boldsymbol{C}_{2i}\dot{\rho} + \boldsymbol{C}_{3j}\dot{\psi}_j + \boldsymbol{C}_{4i}\dot{\delta}_i = \boldsymbol{O}_i\dot{\zeta}_i \quad (4)$$

式 (4) 中, 左边为表示在车体坐标系 R 中的车体构形空间速度在轮心处的角速度投影之和, 右边为表示在车体坐标系 R 中的车轮构形空间速度在轮心处的角速度投影之和; $\dot{\boldsymbol{\phi}} = [\dot{\phi}_x\ \dot{\phi}_y\ \dot{\phi}_z]^{\mathrm{T}}$ 为车体的角速度; $\dot{\beta}$、$\dot{\rho}$ 分别表示为摇杆和转向架的摆动角速度; $\dot{\psi}_j$ 为舵轮的转向角速度; $\dot{\zeta}_i$ 为驱动轮的转动滑移速度; 各系数 $\boldsymbol{C}_{1i}$、$\boldsymbol{C}_{2i}$、$\boldsymbol{C}_{3j}$、$\boldsymbol{C}_{4i}$、$\boldsymbol{O}_i$ 分别为对应矢量 $\dot{\beta}$、$\dot{\rho}$、$\dot{\psi}_j$、$\dot{\delta}_i$、$\dot{\zeta}_i$ 的方向轴在车体坐标系 R 中的方向投影, 且有

$$\boldsymbol{C}_{1i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{1i} = \boldsymbol{C}_{2i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{2i} = 1 \quad (5)$$

$$\boldsymbol{C}_{3j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{3j}=\boldsymbol{C}_{4i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{4i}=\boldsymbol{O}_{i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{O}_{i}=1 \tag{6}$$

$$\boldsymbol{O}_{i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{4i}=\boldsymbol{C}_{3j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{4i}=\boldsymbol{C}_{3j}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{1i}=0 \tag{7}$$

定义了机器人的 D-H 参数并推导出各坐标系之间的齐次变换矩阵之后, 式 (1)、(4) 中的系数矩阵可直接写出, 对于每个串联子系统, 可直接写出形如式 (1)、(4) 的速度等价方程, 六个串联子系统联立可建立车体的整体速度方程.

2　轮 – 地几何接触角的估计

定义轮 – 地几何接触角 δ_i 为第 i 轮轮 – 地接触点坐标系 C_i 的 z_{Ci} 轴相对于第 i 轮坐标系 A_i 的 z_{Ai} 轴的转角, 物理上反映了轮 – 地接触点在轮缘上的位置. 当机器人在平地上移动时总有 $\delta_i=0$. δ_i 反映了车轮与地形的几何接触关系, 即地面环境的约束变量. 如果 δ_i 能够直接测量, 将保证在复杂地面环境下各轮协调运动的准确性. 遗憾的是 δ_i 难以直接测量, 只能通过其他参数的测量进行计算或估计而间接获得. 基于前面推导出的运动学模型, 从角速度方程中可以直接求出 $\dot{\delta}_i$ 的表达式, 得到系统的状态方程, 将其离散化之后, 进行卡尔曼滤波处理, 下面以驱动轮 1 (右前轮) 为例说明.

对驱动轮 1, 从式 (4) 可推得

$$\begin{aligned}\dot{\delta_1}=&-\boldsymbol{C}_{41}^{\mathrm{T}}\dot{\phi}-\boldsymbol{C}_{41}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{11}\dot{\beta}=\\&\cos(\beta)\sin(\psi_1)\dot{\phi_x}-\cos(\psi_1)\dot{\phi_y}+\\&\sin(\beta)\sin(\psi_1)\dot{\phi_z}+\cos(\psi_1)\dot{\beta}\end{aligned} \tag{8}$$

将式 (8) 离散化

$$\begin{aligned}\delta_1(t)=&\delta_1(t-1)+\dot{\delta_1}\Delta t=\\&\delta_1(t-1)-\boldsymbol{C}_{41}^{\mathrm{T}}\dot{\phi}\Delta t-\boldsymbol{C}_{41}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{11}\dot{\beta}\Delta t=\\&\delta_1(t-1)+\cos(\beta)\sin(\psi_1)\Delta t\dot{\phi_x}-\\&\cos(\psi_1)\Delta t\dot{\phi_y}+\sin(\beta)\sin(\psi_1)\dot{\phi_z}\Delta t+\\&\cos(\psi_1)\Delta_1\dot{\beta}\end{aligned} \tag{9}$$

取系统状态变量为

$$\boldsymbol{x}=[\delta_1\ \dot{\phi}_x\ \dot{\phi}_y\ \dot{\phi}_z\ \dot{\beta}\ \dot{\rho}]^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

取观测变量为

$$\boldsymbol{z}=[\dot{\phi}_x\ \dot{\phi}_y\ \dot{\phi}_z\ \dot{\beta}\ \dot{\rho}]^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

则用于滤波的标准形式的状态方程和观测方程如下

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}_k=A\boldsymbol{x}_{k-1}+\boldsymbol{w}_{k-1}\\ \boldsymbol{z}_k=H\boldsymbol{x}_k+\boldsymbol{v}_k\end{cases} \tag{12}$$

其中, $\boldsymbol{w}$ 和 $\boldsymbol{v}$ 分别为过程噪声和观测噪声, 若假设为高斯白噪声, 则: $P(\boldsymbol{w})\sim N(0,QQ)$, $P(\boldsymbol{v})\sim N(0,RR)$, 即满足正态分布, 则轮 – 地几何接触角 δ_i 的 Kalman 滤波算法如下

时间更新为

$$\begin{cases}\hat{\boldsymbol{x}}_k=A\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}\\ \hat{P}_k=A\tilde{P}_kA^{\mathrm{T}}+QQ\end{cases} \tag{13}$$

观测更新为

$$\begin{cases}\tilde{\boldsymbol{x}}_k=\hat{\boldsymbol{x}}_k+K_k(\boldsymbol{z}_k-H\hat{\boldsymbol{x}}_k)\\ K_k=\hat{P}_kH^{\mathrm{T}}(H\hat{P}_kH^{\mathrm{T}}+RR)^{-1}\\ \tilde{P}=(I-K_kH)\hat{P}_k\end{cases} \tag{14}$$

需要指出的是, 在求解滤波增益时, 由于矩阵接近奇异, 因此求逆时需要考虑矩阵的奇异性问题, 这里采用奇异值分解的办法.

3　实验

为了验证本文方法的有效性, 应用作者所在实验室研制的六轮全地形移动机器人对轮 – 地几何接触角 δ_i 估计进行了实验研究. 该机器人上安装有惯性测量单元、电位计、码盘, 车体的三个角速度 $\dot{\phi}_{xm}$、$\dot{\phi}_{ym}$、$\dot{\phi}_{zm}$, 摇杆和转向架摆角 β、ρ_1、ρ_2, 舵轮转角 ψ_j 以及各个驱动轮的转速 $\dot{\theta}_i$ 均可通过车载传感器测得, 摇杆和转向架的角速度 $\dot{\beta}$、$\dot{\rho}_1$、$\dot{\rho}_2$ 可通过差分计算得到.

分别进行两组实验: 1) 机器人在平坦硬质地形上直线前进; 2) 机器人跨越一个高度约为 30 cm 的台阶形障碍物. 根据前面的分析, 当机器人在平坦地形下移动时, 各轮的轮 – 地几何接触角均为 0. 图 5 和图 6 是机器人在平坦硬质地形下直线前进时估计出的右前轮轮 – 地几何接触角的变化曲线. 当机器人在非平坦地形下移动时, 车轮与地形的接触点 C_i 不一定位于车轮竖向轴 z_{Ai} 延长线与轮缘的交点处, 而是沿车轮轮缘动态变化. 轮 – 地几何接触角会根据接触关系的变化而发生变化, 图 7 和图 8 是机器人跨越高度为 30 cm 的台阶形障碍物时右前轮轮 – 地几何接触角的变化曲线. 从图中可以看出, 车轮与地形的几何接触角并不是固定值, 而是随着地形的不同而发生变化的. 当地形的几何轮廓发生突然变化时, 轮 – 地接触点坐标系 C_i 的 z_{Ci} 轴方向发生突变, 而轮心坐标系 A_i 的 z_{Ai} 轴方向不会突然变化, 因此轮 – 地几何接触角将发生突变, 此时卡尔曼滤波算法估计的值相对于真实值会有一定滞后.

估计出的轮 – 地几何接触角一方面可用于运动学计算, 提高里程计计算的精度; 另一方面可用于牵引力控制. 这里的轮 – 地接触角在物理上反映了轮 – 地接触点在轮缘上的位置变化. 特别地, 文献 [11] 中定义的车 – 地接触角实际上反映的是机器人轮 – 地接触点处的地形坡度, 而本文讨论的轮 – 地几何接触角反映的是机器人车轮与地形接触时的几何

关系, 不仅与地形表面的几何变化有关, 还与机器人本体的姿态有关, 如当机器人处于同一个斜面上时, 轮 – 地几何接触角为 0, 但地形坡度并不为 0, 因此两者之间并不完全相同.

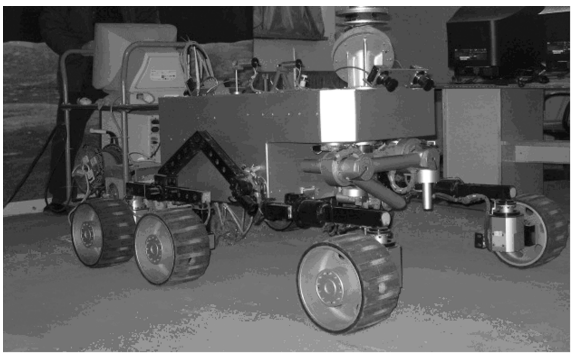

图 5 机器人

Fig. 5 The robot

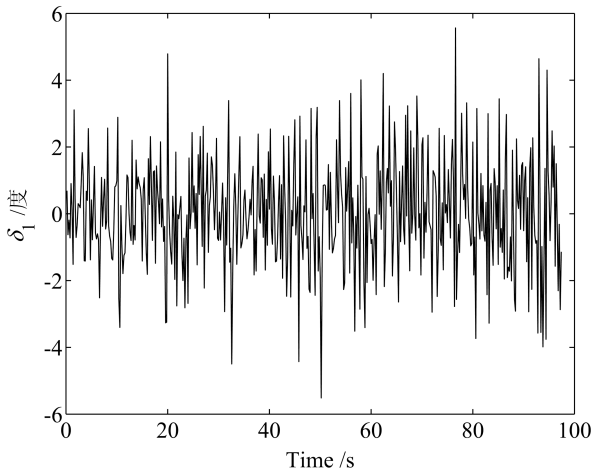

图 6 机器人在平坦硬质地面直线前进时右前轮轮 – 地几何接触角的变化曲线

Fig. 6 The curve of estimated wheel-terrain contact angle of right-front wheel when moving straightly on a flat terrain

图 7 机器人

Fig. 7 The robot

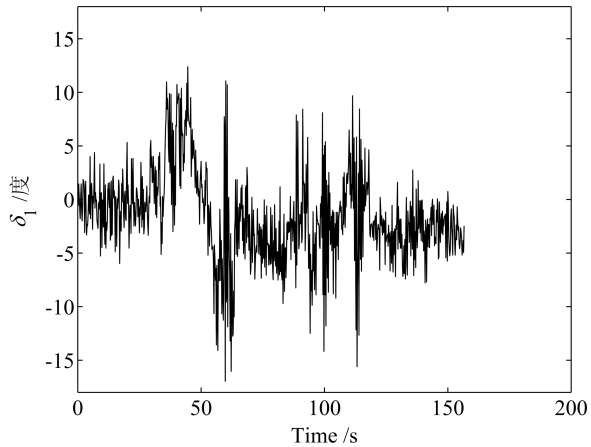

图 8 机器人跨越高度为 30 cm 的台阶形障碍物时右前轮轮 – 地几何接触角的变化曲线

Fig. 8 The curve of estimated wheel-terrain contact angle of right-front wheel when moving straightly on a uneven terrain with a sidestep-shaped obstacle of about 30 cm height

4 结论

全地形移动机器人的精确运动控制是一个具有挑战性的问题, 与一般平坦地形下的移动机器人具有很大差异, 地形复杂性所带来的影响不可忽略. 本文以一个六轮全地形移动机器人为对象, 从车轮与地形相互作用的角度出发, 将机器人看作为一个串 – 并联多刚体系统, 考虑车轮与地形的几何接触关系以及车轮平面滑移, 基于速度闭链理论建立了机器人整体运动学模型. 在机器人运动学模型中, 通过轮 – 地几何接触角 δ 来反映地形不平坦给机器人运动带来的影响, 并针对 δ 难以直接测量的问题提出了一种基于模型的卡尔曼滤波估计方法, 对轮 – 地几何接触角进行实时估计. 但当地形的几何轮廓发生突然变化时, 轮 – 地几何接触角会随之发生突变, 此时卡尔曼滤波算法估计的值相对于真实值会有一定滞后. 通过估计轮 – 地几何接触角, 可反映出驱动轮与地形之间的几何接触关系, 为机器人运动学的精确求解和车轮滑移分析奠定了基础, 有利于进一

步提高机器人在复杂地形下的移动性能.

References

1 Volpe R, Balaram J, Ohm T, Ivlev R. The rocky 7 Mars rover prototype. In: Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Pasadena, USA: IEEE, 1996. 1558−1564

2 Mishkin A H, Morrison J C, Nguyen T T, Stone H W, Cooper B K, Wilcox B H. Experiences with operations and autonomy of the Mars pathfinder microrover. In: Proceedings of the 1998 IEEE Aerospace Conference. Snowmass at Aspen, USA: IEEE, 1998. 337−351

3 Schenker P S, Huntsberger T L, Pirjanian P, Baumgartner E T, Tunstel E. Planetary rover developments supporting Mars exploration, sample return and future human-robotic colonization. *Autonomous Robots*, 2003, **14**(2-3): 103−126

4 Weisbin C R, Blitch J, Lavery D, Krotkov E, Shoemaker C, Matthies L. Miniature robots for space and military missions. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 1999, **6**(3): 9−18

5 Astrand B, Baerveldt A J. An agriculture mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control. *Autonomous Robots*, 2002, **13**(1): 21−35

6 Hellstrom T, Johansson T, Ringdahl O. Development of an autonomous forest machine for path tracking. In: Proceedings of the 4th International Conference on Field and Service Robotics. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2006. 603−614

7 Song Xiao-Kang, Wang Yue-Chao, Tan Da-Long, Wu Zhen-Wei. Study on modeling and control of all-terrain mobile robots. *Robot*, 2007, **29**(5): 289−296
(宋小康, 王越超, 谈大龙, 吴镇炜. 全地形移动机器人建模与控制研究综述. 机器人, 2007, **29**(5): 289−296)

8 Ellery A. Environment-robot interaction — the basis for mobility in planetary micro-rovers. *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, **51**(1): 29−39

9 Wang Zuo-Wei, Liang Bin,Wu Hong-Xin. Kinematical modeling and analysis of six-wheel lunar rover. *Journal of Astronautics*, 2003, **24**(5): 456−462
(王佐伟, 梁斌, 吴宏鑫. 六轮月球探测车运动学建模与分析. 宇航学报, 2003, **24**(5): 456−462)

10 Tarokh M, McDermott G J. Kinematics modeling and analyses of articulated rovers. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, **21**(4): 539−553

11 Iagnemma K, Dubowsky S. Vehicle-ground contact angle estimation with application to mobile robot traction. In: Proceedings of the 7th International Conference on Advances on Robot Kinematics. Portoroz, Slovenia: IEEE, 2000. 137−146

12 Sohl G, Jain A. Wheel-terrain contact modeling in the roams planetary rover simulation. In: Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conference. Long Beach, USA: DETC, 2005. 1−9

13 Shibly H, Iagnemma K, Dubowsky S. An equivalent soil mechanics formulation for rigid wheels in deformable terrain, with application to planetary exploration rovers. *Journal of Terramechanics*, 2005, **42**(1): 1−13

14 Iagnemma K, Shibly H, Dubowsky S. On-line terrain estimation for planetary rovers. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D. C., USA: IEEE, 2002. 3142−3147

15 Iagnemma K, Kang S, Shibly H, Dubowsky S. Online terrain parameter estimation for wheeled mobile robots with application to planetary rovers. *IEEE Transactions on Robotics*, 2004, **20**(5): 921−927

宋小康 中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生. 主要研究方向为全地形移动机器人. 本文通信作者.
E-mail: songxiaokang@sia.cn
(**SONG Xiao-Kang** Ph. D. candidate at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is all-terrain mobile robots. Corresponding author of this paper.)

王越超 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为智能机器人.
E-mail: ycwang@sia.cn
(**WANG Yue-Chao** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is intelligent robots.)

谈大龙 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为机器人智能控制和多机器人系统.
E-mail: dltan@sia.cn
(**TAN Da-Long** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers intelligent control of robots and multi-robot systems.)

吴镇炜 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为机器人控制.
E-mail: wuzw@sia.cn
(**WU Zhen-Wei** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is robot control.)