

基于内部传感器的轮式移动机器人运动速度估计

宋亦旭, 谈大龙

(中国科学院 沈阳自动化研究所 机器人学开放实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 讨论了在无速度传感器的情况下轮式移动机器人的速度估计问题, 采用了加速度传感器和位置传感器的输出实时估计轮式移动机器人速度, 并用一种按加速度扰动调整权值的方法融合来自不同传感器的数据. 实验验证了方法的有效性.

关键词: 移动机器人; 传感器; 数据融合; 估计

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Velocity estimation of wheeled mobile robot with inner-sensors

SONG Yi-xu, TAN Da-long

(Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academic of Sciences, Liaoning Shenyang 110016, China)

Abstract: This paper discussed the velocity estimation for a wheeled mobile robot without velocity sensors. Velocities of the mobile robot were estimated real-time using accelerometers and position-measurement sensors. A method for adjusting weights by the vehicle acceleration disturbance was proposed to fuse data from different sensors. The effectiveness of the method was demonstrated by experiments.

Key words: mobile robot; sensor; data fusion; estimation

1 引言(Introduction)

由于轮式移动机器人的工作环境比较复杂, 其速度估计一直是一个比较困难的问题, 正确地实时表达轮式移动机器人的运动速度, 不仅是有效控制机器人位姿的前提, 同时对特定负载(如车载操作手)进行实时扰动补偿也很有意义.

轮式移动机器人在全局坐标系中的定位一般需要使用视觉、激光、超声及 GPS 等传感器, 不过这些方法由于受到采样周期和数据处理算法的限制, 其信号很难用于移动机器人的实时速度估计, 尤其当机器人运动速度较快或存在扰动的情况下, 轮式移动机器人在相对坐标系的速度估计最常见的方法是利用与车轮同轴的码盘的输出信号得到关节(车轮)转动角度, 然后由运动学正解得到机器人移动距离(一般称为里程计), 从而求得机器人在相对坐标系中的速度. 由于码盘安装在关节空间, 使用里程计表达机器人速度的局限性较大, 比如当轮式机器人存在减震器等柔性机构或地面不平整时, 里程计速度很难全面表达机器人整体的运动状态.

而对于一类全方位轮式移动机器人, 即使地面

平整, 也会存在轮与地面的动力学扰动. 这类机器人大多通过特殊的机构来保证其全方位运动能力的实现, 比如瑞典轮、正交轮^[1]、及文[2]提出的机构等, 其平面三自由度的运动是依靠轮系中一组轮不断切换着地实现的, 这样带来的问题就是轮切换时的扰动转矩会对机器人运行姿态产生影响. 尤其在机器人实际应用中, 由于加工误差和装配未对准及大负载下轮变形等因素的影响, 单纯保证关节驱动电机的跟踪精度将加大车体的动力学扰动, 甚至使机器人产生侧滑, 影响轮式移动机器人的轨迹跟踪精度, 也即是说, 此时只用里程计解得的速度信号进行反馈得不到满意的控制效果.

当轮与地面存在扰动时, 估计轮式移动机器人的速度一般有两种方法, 由机器人动力学方程解得是方法之一, 但前提条件是输出转矩可测及动力学模型足够精确(包括考虑大负载下的时滞). 另一种方法就是基于惯性传感器的实时速度估计. 这种方法不需要对机器人进行精确建模, 得到的方法和结果适用性广泛, 所以在机器人的位姿和速度的实时估计中得到较广泛的研究和应用. 文[3]使用加速度

计和陀螺对移动机器人的姿态(pitch, roll)进行了估计,文[4,5]研究了复杂地面环境中移动机器人利用惯性传感器进行定位的问题,文[6]利用加速度计进行了人体运动的实时捕获,而文[7]利用加速度计进行了轿车的横摆速率估计,文[8]利用加速度计和陀螺进行了运动刚体的姿态估计.对于传感器噪声,一般多采用标准的卡尔曼滤波器(SKF)或扩展的卡尔曼滤波器(EKF)进行传感器数据后处理,但由于加速度计输出中不可避免地含有标定误差,这个系统误差很难采用最优滤波器去除.在使用加速度计信号积分求取速度或位置时,这个误差信号将使积分结果出现很大的漂移.所以一般都采用加速度计信号积分与其他传感器信号(如速率陀螺)进行数据融合,以获得较理想的估计结果.文[9]详细分析了这种标定误差引起的积分不稳定,并利用一种光纤视觉位置传感器与加速度计的积分结果进行周期加权,结果表明虽然位置传感器给定权值很小,也可使加速度信号的积分结果稳定.

当轮式移动机器人的关节与地面接触平滑的情况下,其移动距离是可以通过里程计估算的,而加速度计输出则真实的反映了关节与地面存在力矩扰动时的车体加速度.基于上述思想本文采用了加速度计积分与通过里程计求得的速度信号进行数据融合的方法,对轮式移动机器人的运行速度进行实时估计,并以正交轮式全方位移动机器人平台进行了实验研究.

2 正交轮式移动机器人的运动学模型及基于运动学模型的控制(Kinematics of the mobile robot with orthogonal-wheel assemblies and its control based on the kinematic model)

正交轮式移动机器人是一种具有完整约束的全方位移动机器人,其特点是运动过程中依靠一组轮系中两个相互正交的轮子交替接触地面,然后由3组轮系的速度合成保证了这种机器人在工作空间的三自由度移动.

不考虑轮子切换的影响,正交轮式全方位移动机器人的运动学逆解如下:

$$r\omega = J^{-1}\dot{X}_m, \quad (1)$$

其中

$$J = \begin{bmatrix} 1/2 & -\sqrt{3}/2 & L \\ -1 & 0 & L \\ 1/2 & \sqrt{3}/2 & L \end{bmatrix}$$

为机器人的逆雅可比矩阵; $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ 表示三个关节驱动电机的转速; $\dot{X}_m = (\dot{x}_m, \dot{y}_m, \dot{\varphi})^T$ 表示机器人在相对坐标系各方向的速度向量;机器人相对坐标的定义及轮分布见图1,其中3个圆代表3个轮系的几何位置; r 为每组轮系的等效半径.

定义滑动面 $s = \dot{e} + \lambda e$, 其中: $\lambda \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为正定的对角阵; $\dot{e} = \omega_d - \dot{q}$, $e = \int \omega_d - q$, ω_d 表示期望速度, $q, \dot{q}$ 分别表示来自码盘的关节位置反馈值、由此位置信号求得的速度反馈值,简单的PID控制率可表示为

$$u = ks, \quad (2)$$

$k \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为正定的对角阵.

3 车体加速度的测量(Measurement of vehicle accelerations)

3.1 加速度计的安装(Mount of accelerometers)

a_1, a_2, a_3, a_4 四个线加速度计在车体的安装位置如图1所示(俯视).其中箭头方向表示其正敏感方向.

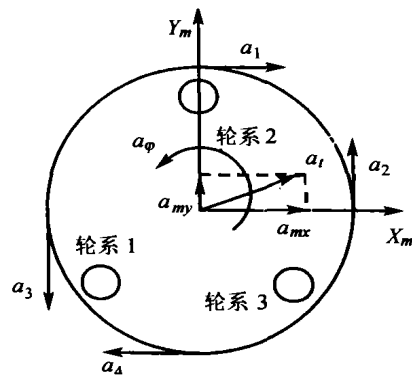


图1 相对坐标系定义及加速度计安装点的示意图

Fig. 1 Definition of the relative frame and the mount of accelerometers

3.2 车体加速度信号的解耦(Decoupled accelerations of the vehicle's body)

正交轮式移动机器人的全方位运动能力使车体加速度计的输出同时耦合各方向的加速度,设车体平动加速度为 a_t ,转动加速度为 a_φ ,如图1所示,此时各加速度计的 outputs 为

$$\begin{aligned} a_1 &= a_{mx} - a_\varphi R, \\ a_2 &= a_{my} + a_\varphi R, \\ a_3 &= -a_{my} + a_\varphi R, \\ a_4 &= -a_{mx} - a_\varphi R. \end{aligned}$$

通过下式的解算,可求得车体在 X_m, Y_m, Φ 方向上的加速度.

$$\begin{aligned} a_{\phi} &= (a_2 - a_1 + a_3 - a_4)/4R, \\ a_{mx} &= (a_1 - a_4)/2, \\ a_{my} &= (a_2 - a_3)/2. \end{aligned} \quad (3)$$

其中: a_1, a_2, a_3, a_4 表示 4 个加速度传感器的实时测量值; a_{mx}, a_{my}, a_{ϕ} 表示解出的车体在 X_m, Y_m, Φ 方向上的加速度值; R 表示安装点到车体中心的距离.

这种安装方法可以使加速度计的定位更方便,并可通过运算滤掉加速度计输出信号中混有的共模噪声.

4 由里程计解得的轮式移动机器人速度信号 (Measurements of vehicle velocities by odometry)

由于机器人的移动距离实际是通过增量码盘信号得到的,而通常由位置信号差分获得的速度信号有很大的噪声,本文采用了滑模状态观测器的方法进行速度观测,这种方法不仅有很强的鲁棒性,不求机器人的准确模型,而且对信号的高频噪声有强的滤波作用,为解决等速趋近率的滑模观测器的趋近速度和抖振大小之间的矛盾,本文采用指数趋近率的滑模观测器^[10].

设系统动力学模型可表达为

$$\dot{x} = f(x, u, t). \quad (4)$$

状态空间表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x, u, t), \\ y = x_1. \end{cases}$$

滑模观测器的表达形式如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - k_{11}(\hat{x}_1 - x_1) - k_{12}\text{sgn}(\hat{x}_1 - x_1), \\ \dot{\hat{x}}_2 = f - k_{21}(\hat{x}_1 - x_1) - k_{22}\text{sgn}(\hat{x}_1 - x_1), \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\text{sgn}()$ 表示开关函数

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x = 0, \\ -1 & x < 0; \end{cases}$$

x_1 表示由传感器测得的机器人位置信号; $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ 分别表示位置信号和速度信号的估计值; $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$ 为正常数.

5 数据融合(Data fusion)

基于前述思想,本文的数据融合原则如下:

1) 当车体加速度扰动(给定加速度与实测加速度之差)在一段时间内 T 持续小于给定的阈值 d_i ($i = X_m, Y_m, \Phi$ 表示任务空间 3 个方向)时,则认为关

节与地面间的力矩扰动较小,此时置信由里程计求得的机器人速度.

2) 当车体加速度扰动大于给定的阈值时,则认为关节与地面间存在较大的力矩扰动,应置信加速度计积分求得的车体速度.

3) 每个采样周期用融合后数据修正加速度信号的积分.

基于上述原则,可以选择各种不同的数据融合方法,本文采用了一种简单的权值调节方法,主要考虑到伺服控制周期较短,尽量降低算法的复杂性.

设

$$v_r = kv_a + (1 - k)v_c, \quad (6)$$

其中: $v_r = (v_{rx}, v_{ry}, v_{r\phi})^T$ 表示轮式移动机器人在任务空间各方向的估计速度; $v_a = (v_{ax}, v_{ay}, v_{a\phi})^T$ 表示不断被 v_r 修正的由加速度积分估计出的任务空间各方向的车体速度; $v_c = (v_{cx}, v_{cy}, v_{c\phi})^T$ 表示由里程计求得的机器人速度; $I \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 表示单位矩阵;

$$k = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix}$$

表示各运动方向的融合权值.

权值

$$k_i = \frac{1}{1 + (t_i/T_i)^n},$$

$i = 1, 2, 3$ 表示任务空间 3 个方向. 其中 $T_i = f(v_{di}, d_i)$, v_{di} 表示期望速度, f 的选取原则是 v_{di} 越大, T_i 越小, 而 d_i 越大, T_i 越大; 当加速度扰动大于阈值 d_i 时, $t_i = 0$, 当加速度扰动小于阈值 d_i 时, 作为新的计时起点, t_i 随采样周期不断增大; n 为大于 1 的整数.

k 值的特点是 $0 < k_i \leq 1$, 当 $t_i < T_i$ 时, $k_i \approx 1$, 当 $t_i > T_i$ 时, k_i 快速趋近零. 在过渡阶段, 则体现出 v_a 和 v_c 的加权值.

为了防止不同的传感器信号过快地切换导致融合信号中引入高频噪声, 应在切换的快速性与信号的平稳性之间进行折衷, 这样权值 k 也可以采用其他形式, 如:

$$k_i = \frac{1}{1 + (t_i/T_i)(t_i/t_{ai})(t_i/t_{bi})(t_i/t_{ci})\cdots}, \quad T_i \leq t_{ai} \leq t_{bi} \leq t_{ci}\cdots \quad (7)$$

6 实验结果(Experimental results)

令正交轮式全方位移动机器人沿 X_m 方向直行 900 mm, 速度 100 mm/s, 采用梯形波速度规划(以最大加速度 0.5 m/s^2 加速到 100 mm/s, 然后匀速运

动,最后以 0.5 m/s^2 的加速度减速到停止). 加速度信号与里程计信号的采样周期均为 1 ms , d_{mx} 取 0.1 m/s^2 , 图2表示只用加速度计信号积分得到的移动机器人在 X_m 方向的速度(未经数据融合), 由图可见由于标定误差的影响, 在若干采样周期之后, 其积分得到车体速度值已经不可信. 图3显示了由里程计信号求得的移动机器人在 X_m 方向的速度, 由于关节电机的刚度较大, 由里程计解得的速度体现不

出地面与轮之间的力矩扰动对车体速度的影响, 得到的车体速度不能正确反映车体的扰动情况, 图5显示了机器人运动过程中 X_m 方向的加速度值, 可见车体运行并不平稳. 图4显示了数据融合后的速度信号(X_m 方向), 由式(7)并考虑正交轮式移动机器人的轮切换周期, 取

$$k = \frac{1}{1 + (t/100)^2(t/150)^2(t/200)^2}.$$

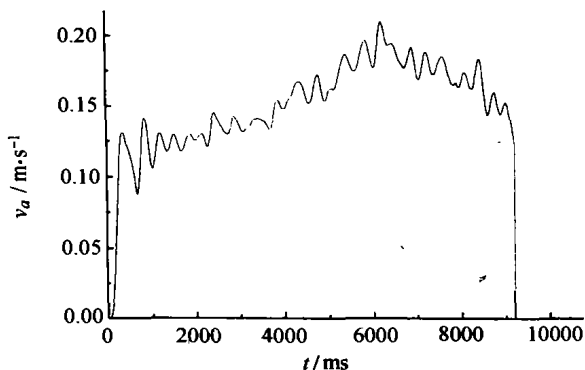


图2 加速度计信号积分求得的移动机器人速度
Fig. 2 Estimated velocity of the mobile robot using accelerometers in X_m -direction

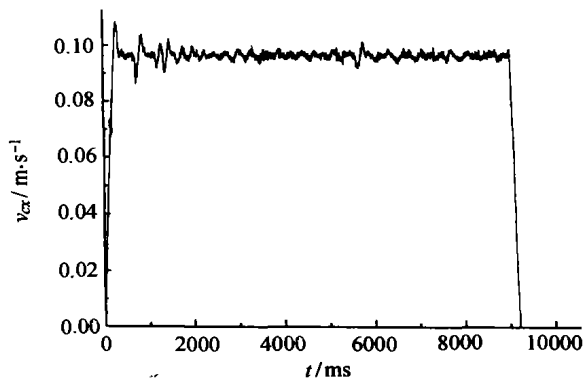


图3 由里程计解得的移动机器人速度
Fig. 3 Estimated velocity of the mobile robot using odometry in X_m -direction

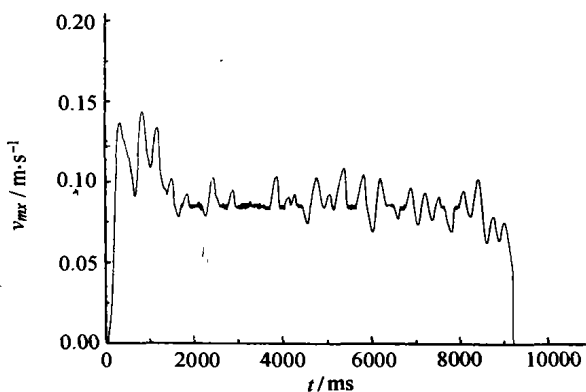


图4 数据融合后的移动机器人速度
Fig. 4 In X_m -direction the vehicle velocity obtained by fused data

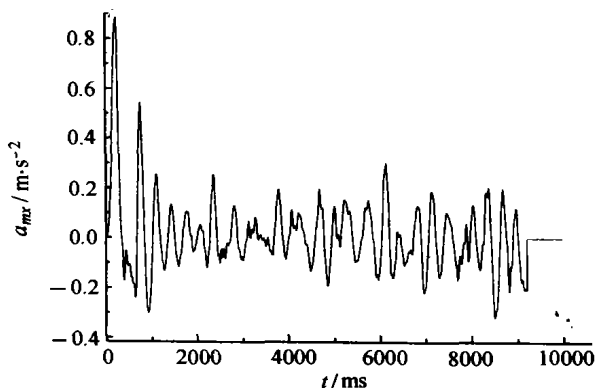


图5 X_m 方向车体加速度计输出信号
Fig. 5 Output of accelerometers in X_m -direction

7 结论(Conclusion)

以上的研究表明, 由于电机码盘安装在关节空间, 以其解得的速度反馈信号可以满足电机本身的伺服跟踪, 但却很难表达机器人车体的真实运动状况, 在任务空间引入车体加速度计信号可以补充这种不足. 本文采用了加速度传感器和位置传感器输出进行数据融合的方法实时估计轮式移动机器人在相对坐标系中的速度, 并实验验证了该方法的有效性. 在同样的前提下, 同样的思路和方法也可以应用于轮式移动机器人的位姿估计.

参考文献(References):

- [1] FRANCOIS G P, STEPHEN M K. A new family of omni-directional and Holonomic wheeled platforms for mobile robots [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1994, 10(4): 480 - 489.
- [2] HAJIME A, MASATOSHI S, et al. Development of an omni-directional mobile robot with 3DOF decoupling drive mechanism [A]. *Proc of the 1995 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Piscataway NJ: The Institute of Electrical and Electronics Engineer, Ins, 1995: 1925 - 1930.

(下转第 546 页)

6 结论(Conclusion)

实现高性能转矩无脉动控制一直是开关磁阻电动机控制的难点,本文从 SRM 转矩特性的非线性本质出发,将一种变结构模糊神经网络应用于开关磁阻电动机转矩控制中,基于转矩分配函数,实时在线优化出期望转矩所需要的绕组相电流波形.仿真结果表明,该控制策略能够有效的解耦、补偿和抵消 SRM 非线性转矩脉动特性,实现了高性能转矩控制.

参考文献(References):

- [1] LOVATT H C, STEPHENSON J M. Computer-optimised smooth-torque current waveforms for switched reluctance motors [J]. *IEE Proc Electronic Power Applications*, 1997, 144(5): 310 - 316.
- [2] SEYEED M, MALIK E E, IQBAL H. Torque-ripple minimization in switched reluctance motors using adaptive fuzzy control [J]. *IEEE Trans on Industrial Applications*, 1999, 35(2): 461 - 468.
- [3] 孙增圻. 智能控制理论与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
(SUN Zengqi. *Intelligence Control Theory and Technique* [M].

Beijing: Tsinghua University Press, 1997.)

- [4] IQBAL H, EHSANI M. Torque Ripple Minimization in switched reluctance motor drives by PWM current control [J]. *IEEE Trans on Power Electronics* 1996, 11(1): 83 - 88.
- [5] KJAEER P C, GRIBBLE J J, MILLER T J E. High-grade control of switched reluctance machines [J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 1997, 33(6): 1585-1593.
- [6] SCHRAMM D S, WILLIAMS B W. High bandwidth measurement of SRM torque ripple [A]. *Electrical Machines and Drives* [M]. [s.l]: 6th Int Conf on Published, 1993: 647 - 651.

作者简介:

郑洪涛 (1974 —), 男, 浙江大学电气工程学院博士生, 主要从事电力电子与电力传动, 智能控制等方面的研究. E-mail: zhengzju@yahoo.com.cn;

陈新 (1972 —), 男, 浙江大学电气工程学院硕士生, 主要从事电力电子与电力传动, 智能控制等方面的研究. E-mail: cxzju@sohu.com;

蒋静坪 (1935 —), 男, 浙江大学电气工程学院教授, 主要从事电力传动及其自动化, 智能控制, 计算机实时控制等方面的研究. E-mail: eejiang@dia1.zju.edu.cn.

(上接第 540 页)

- [3] VAGANAY J, ALDON M J, FOURNIER A. Mobile robot attitude estimation by fusion of inertial data [A]. *Proc of the 1993 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Los Alamitos, California: The IEEE Computer Society Press, 1993: 277 - 282.
- [4] STERGIOS I R, GAURAV S S, GEORGE A B. Smoother based 3D attitude estimation for mobile robot localization [A]. *Proc of the 1999 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Piscataway NJ: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1999: 1979 - 1986.
- [5] STERGIOS I R, GAURAV S S, GEORGE A B. Circumventing dynamic modeling: evaluation of the error-state Kalman filter applied to mobile robot localization [A]. *Proc of the 1999 IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. Piscataway NJ: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1999: 1656 - 1663.
- [6] LEE J, HA I. Sensor fusion and calibration for motion captures using accelerometers [A]. *Proc of the 1999 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Piscataway NJ: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1999: 1954 - 1959.
- [7] SIVASHANKAR N, UIISOY A G. Yaw rate estimation for vehicle

control applications [J]. *J of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1998, 120 (6): 267 - 274.

- [8] REHBINDER H, HU X. Drift-free attitude estimation for accelerated rigid bodies [A]. *Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Korea, 2001: 4244 - 4249.
- [9] PARSA K, ANGELES J, MISRA A K. Pose-and-twist estimation of a rigid body using accelerometers [A]. *Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Korea, 2001: 2873 - 2878.
- [10] SLOTINE J J E, HEDRICK J K, MISAWA E A. On sliding observer for nonlinear systems [J]. *J of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1987, 109(9): 245 - 252.

作者简介:

宋亦旭 (1972 —), 男, 现为中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生, 主要研究方向为机器人控制. E-mail: yxsong@ms.sia.ac.cn;

谈大龙 (1940 —), 男, 研究员, 博士生导师, 研究领域主要包括: 机器人智能控制, 多机器人系统, 可重构, 机器人加工系统等.