

Research on Calibration Method for the Installation Error of Three-Axis Acceleration Sensor

ZHANG Hui*, CHAI Wei, LUO Qiang, LIU Manxia

(Research Center of Intelligent Transportation System, Sun Yat-Sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Guangzhou 510006, China)

Abstract: For the important role of three-axis acceleration sensor in the vehicle state measurement, the installation error was studied when the acceleration sensor installed in the vehicle. A calibration method based on a mathematical model is proposed. Without any other measuring instruments, the calibration process can be completed by the model calculating several measurement data from the fixed sensor. Experiments result proves the validity of this method, and the calibration error is less than 3%.

Key words: acceleration sensor; error calibration; Euler theorem; vehicle attitude

EEACC: 7230; 7320E

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.11.006

三轴加速度传感器安装误差标定方法研究

张辉*, 柴伟, 罗强, 刘漫霞

(中山大学智能交通研究中心, 广东省智能交通系统重点实验室, 广州 510006)

摘要: 针对三轴加速度传感器在车辆行驶状态测量方面的应用, 研究了三轴加速度传感器在车辆上的安装误差问题, 提出了一种通过数学解算模型对安装误差进行标定的方法。标定过程无需借助其他测量仪器, 只需要使用安装后的传感器进行多次测量, 通过数学模型解算这组测量数据即可实现安装误差的测量与标定。通过实验验证, 此方法方便有效, 标定误差小于 $\pm 3\%$ 。

关键词: 加速度传感器; 误差标定; 欧拉定理; 车辆姿态

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)11-1542-05

近年来微机电系统 (MEMS) 的研究发展迅速, 加速度传感器在汽车电子领域的应用日益广泛^[1]。在这些应用中, 通常需要测量以车辆坐标系为基准的加速度数据, 这就需要加速度传感器的各感应轴方向与车辆坐标系一致^[2-3]。但是由于安装工艺的影响, 在设备安装过程中往往出现加速度传感器感应轴方向与理想的感应轴方向存在误差的情况, 这一安装误差对车辆状态数据的测量精度有关键的影响, 有必要对这一安装误差进行标定和校准。

在飞机等需要高精度测量的应用中, 机载设备安装姿态的传统校准方法都需要利用水准仪、光学经纬仪和激光雷达等精密测量仪器^[4], 这些仪器不仅价格比较高, 而且操作比较复杂, 完成一次校准过程比较耗时耗力, 对于低成本的应用不太适合。在捷联惯导系统的各种初始对准方法中, 都需要依靠加速度传感器以及陀螺仪测量数据才能完成粗对准^[5-6], 而陀螺仪同样价格比较高, 维护困难。

为了能够在简易安装的情况下尽量降低安装误差的影响, 本文首先对安装误差进行分析和推导, 并

根据欧拉定理建立了误差标定模型, 通过解算传感器自身测量数据来实现安装误差的标定和校准。标定过程不需要借助其他测量仪器, 操作简单且成本很低, 并通过模拟数据验证了此方法的可靠性。

1 安装误差分析与定义

在安装基于三轴加速度传感器的车辆状态测量设备时, 最理想的安装状态是使三轴加速度传感器的三个感应轴分别与车辆坐标系 (如图 1 所示) 的三轴平行^[7], 此时测量与记录的数据最接近车辆的真实行驶状态。三轴加速度传感器的坐标系在出厂时已标定完成, 并认为其三个轴是相互正交的^[8]。

实际安装完成后不可能保证传感器的坐标系三轴与车辆坐标系三轴完全平行, 将两个坐标系之间的偏差定义为安装误差。为了更直观的描述安装误差, 引入旋转矩阵来表示两个坐标系的相对关系, 并用欧拉角定义安装误差角度。根据欧拉定理, 两个空间直角坐标系可以经过三次绕轴转动后完全重合^[9]。传感器坐标系 $X_S Y_S Z_S$ 与车辆坐标系 $X_V Y_V Z_V$

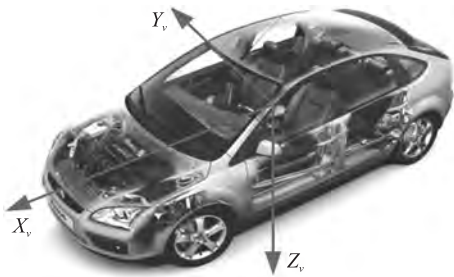


图 1 车辆坐标系

的转动关系如图 2 所示, 每次转动的角度即为安装误差角度, 并定义绕轴转动的顺时针方向为正。

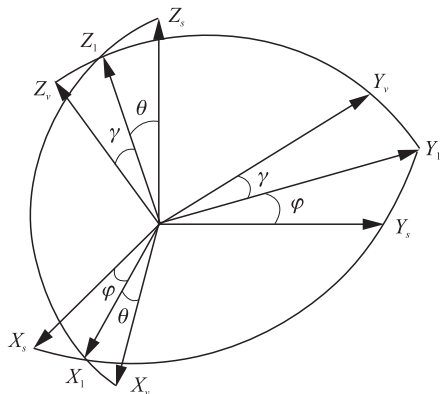


图 2 转动关系

$$\begin{bmatrix} A_{VX} \\ A_{VY} \\ A_{VZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\varphi & & \\ \cos\gamma\sin\varphi + \sin\gamma\sin\theta\cos\varphi & \cos\gamma\cos\varphi - \sin\gamma\sin\theta\sin\varphi & -\sin\gamma\cos\theta \\ \sin\gamma\sin\varphi - \cos\gamma\sin\theta\cos\varphi & \sin\gamma\cos\varphi + \cos\gamma\sin\theta\sin\varphi & \cos\gamma\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{SX} \\ A_{SY} \\ A_{SZ} \end{bmatrix}$$

式(3)通过矩阵形式表示空间向量在传感器坐标系和车辆坐标系之间的转换关系, 系数矩阵中的三个角度 φ 、 θ 、 γ 就是传感器的安装误差角度。只要获得了安装误差角 φ 、 θ 、 γ , 就可以通过式(3)的转换克服安装误差带来的影响, 获得车辆坐标系的加速度测量值。

2 安装误差的标定方法

对安装误差的标定即求解三个安装误差角 φ 、 θ 、 γ 。考虑到在静止状态下, 加速度传感器仍然会由于重力加速度的原因, 在各个轴上感应到相应的加速度数值, 同时由于车辆坐标系与地理坐标系之间同样存在着欧拉转动关系, 当车辆静止在某一平面上时, 通过重力加速度 g 在坐标系之间的转换关系建立欧拉矩阵方程^[11], 与式(3)联立之后就可以建立误差标定模型, 从而解算出安装误差角。

2.1 安装误差标定模型

为了推导安装误差的标定模型, 首先假设车辆停放在一个平面上, 此平面与水平面夹角为 α (即坡角), 车头方向与平面最大坡度方向的夹角为 β , 此

转动过程如下:

$$X_s Y_s Z_s \xrightarrow[\varphi]{\text{绕 } Z_s \text{ 轴}} X_1 Y_1 Z_1 \xrightarrow[\theta]{\text{绕 } Y_1 \text{ 轴}} X_v Y_v Z_v \xrightarrow[\gamma]{\text{绕 } X_v \text{ 轴}} X_v Y_v Z_v$$

三次转动变换矩阵分别为 $C_\varphi, C_\theta, C_\gamma$, 坐标系的转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} = C_\gamma C_\theta C_\varphi \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{其中, } C_\gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \quad C_\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$C_\varphi = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

任一空间向量 A 在传感器坐标系中的坐标与其在车辆坐标系中的坐标满足以下关系:

$$\vec{A}_V = C_\gamma C_\theta C_\varphi \cdot \vec{A}_S \quad (2)$$

其中 \vec{A}_V 表示在车辆坐标系下的向量, $\vec{A}_V = [A_{VX} \ A_{VY} \ A_{VZ}]^T$, \vec{A}_S 表示传感器的输出向量, $\vec{A}_S = [A_{SX} \ A_{SY} \ A_{SZ}]^T$, 向量 A 在坐标系中的转换关系写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} -\cos\theta\sin\varphi & \sin\theta \\ \cos\gamma\sin\varphi - \sin\gamma\sin\theta\cos\varphi & \cos\gamma\cos\varphi - \sin\gamma\sin\theta\sin\varphi \\ \sin\gamma\sin\varphi - \cos\gamma\sin\theta\cos\varphi & \sin\gamma\cos\varphi + \cos\gamma\sin\theta\sin\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{SX} \\ A_{SY} \\ A_{SZ} \end{bmatrix} \quad (3)$$

时车辆坐标系 $X_v Y_v Z_v$ 与地理坐标系 NEU 之间的关系可以根据欧拉定理通过两次转动来表示^[12]。首先假设车辆停放在绝对水平面, 此时的车辆坐标系 $X_v Y_v Z_v$ 与地理坐标系 NEU 完全重合, 如图 3 所示。两次转动过程如图 4 所示。

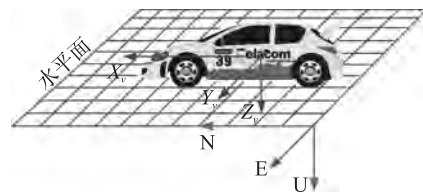


图 3 坐标系重合

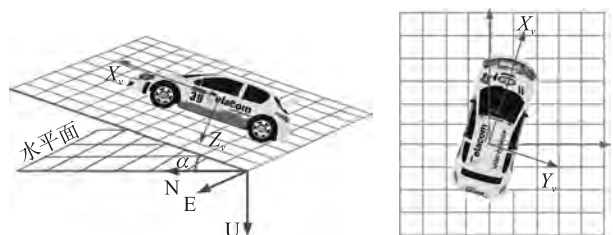


图 4 转动过程

转动关系表示为:

$$NEU \xrightarrow[\alpha]{\text{绕 } E \text{ 轴}} X_V E Z_V \xrightarrow[\beta]{\text{绕 } Z_V \text{ 轴}} X_V Y_V Z_V$$

其中 α 表示平面的倾斜角, β 表示车辆前进方向与平面倾斜方向之间的夹角, 两次转动变换矩阵为 C_α, C_β , 任意向量在两个坐标系中的转换关系可以表示为:

$$\vec{A}_V = C_\beta C_\alpha \cdot \vec{A}_G \quad (4)$$

其中, \vec{A}_G 表示在地理坐标系下的向量, \vec{A}_V 表示经过转换在车辆坐标系下的向量。由于车辆静止只受到重力加速度 g , 由此可知 $\vec{A}_G = [0 \ 0 \ g]^T$, 那么式(4)可以写为:

$$\begin{bmatrix} \cos\theta\cos\varphi & -\cos\theta\sin\varphi & \sin\theta \\ \cos\gamma\sin\varphi + \sin\gamma\sin\theta\cos\varphi & \cos\gamma\cos\varphi - \sin\gamma\sin\theta\sin\varphi & -\sin\gamma\cos\theta \\ \sin\gamma\sin\varphi - \cos\gamma\sin\theta\cos\varphi & \sin\gamma\cos\varphi + \cos\gamma\sin\theta\sin\varphi & \cos\gamma\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{SX} \\ A_{SY} \\ A_{SZ} \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} -\cos\beta\sin\alpha \\ \sin\beta\sin\alpha \\ \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于车辆停放的平面与水平面的夹角 α 固定不变, 因此重力加速度 g 沿车辆坐标系 Z_V 轴的分量 $g\cos\alpha$ 是一个定值, 不随车辆在平面停放角度 β 变化而变化, 由式(8)可以得到一个等式:

$$(\sin\gamma\sin\varphi - \cos\gamma\sin\theta\cos\varphi)A_{SX} + (\sin\gamma\cos\varphi + \cos\gamma\sin\theta\sin\varphi)A_{SY} + (\cos\gamma\cos\theta)A_{SZ} = g\cos\alpha \quad (9)$$

由于 A_{SX}, A_{SY}, A_{SZ} 是重力加速度在传感器各轴分量的测量值, 可以通过多组测量值求解三角方程组得到 $\alpha, \gamma, \varphi, \theta$ 值。但是由于测量误差的存在, 直接求解可能无解或误差比较大。因此, 需要通过数值分析的方法来进行求解。

2.2 安装误差的求解

式(9)可以看做是一个空间平面方程:

$$A \cdot A_{SX} + B \cdot A_{SY} + C \cdot A_{SZ} = 1 \quad (10)$$

如果把加速度传感器三轴的输出看作是空间点的坐标 (A_{SX}, A_{SY}, A_{SZ}) , 那么这些点就分布在这个空间平面上, 在式(10)中:

$$\begin{cases} A = \frac{\sin\gamma\sin\varphi - \cos\gamma\sin\theta\cos\varphi}{g\cos\alpha} \\ B = \frac{\sin\gamma\cos\varphi + \cos\gamma\sin\theta\sin\varphi}{g\cos\alpha} \\ C = \frac{\cos\gamma\cos\theta}{g\cos\alpha} \end{cases} \quad (11)$$

如果可以确定空间平面方程(10)及停放平面与水平面的夹角 α 的值, 就可以求解方程组(11)得到安装误差角度 φ, θ, γ ^[13]。

对空间平面方程(10)中 A, B, C 的确定可以用空间平面的最小二乘拟合方法, 假设得到 n 组传感器测量数据 $(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n$, 则空间平面的最小二乘拟合方程如下:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n y_i z_i & \sum_{i=1}^n z_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过方程(12)可以解得 A, B, C 的值^[14]。 α 的值也可以通过解算加速度传感器测量数据来确定。上文提到传感器坐标系向车辆坐标系的转动关系, 通过欧拉定理建立方程(3)。同理将车辆坐标系 $X_V Y_V Z_V$ 向传感器坐标系 $X_S Y_S Z_S$ 转动三次, 每次转动角度 λ, δ, ω 可以得到方程:

$$\begin{bmatrix} A_{SX} \\ A_{SY} \\ A_{SZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta\cos\lambda & -\cos\delta\sin\lambda & \sin\delta \\ \cos\omega\sin\lambda + \sin\omega\sin\delta\cos\lambda & \cos\omega\cos\lambda - \sin\omega\sin\delta\sin\lambda & -\sin\omega\cos\delta \\ \sin\omega\sin\lambda - \cos\omega\sin\delta\cos\lambda & \sin\omega\cos\lambda + \cos\omega\sin\delta\sin\lambda & \cos\omega\cos\delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{VX} \\ A_{VY} \\ A_{VZ} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} A_{VX} \\ A_{VY} \\ A_{VZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (5)$$

化解上式可得:

$$\begin{bmatrix} A_{VX} \\ A_{VY} \\ A_{VZ} \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} -\cos\beta\sin\alpha \\ \sin\beta\sin\alpha \\ \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

联立式(2)和式(4)可以得到一个等式:

$$\vec{A}_V = C_\gamma C_\theta C_\varphi \cdot \vec{A}_S = C_\beta C_\alpha \cdot \vec{A}_G \quad (7)$$

将式(3)和式(6)带入, 式(7)写成矩阵形式为:

式(13)与式(6)联立可以得到:

$$\begin{bmatrix} A_{SX} \\ A_{SY} \\ A_{SZ} \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} \cos\delta\cos\lambda & -\cos\delta\sin\lambda & \sin\delta \\ \cos\omega\sin\lambda + \sin\omega\sin\delta\cos\lambda & \cos\omega\cos\lambda - \sin\omega\sin\delta\sin\lambda & -\sin\omega\cos\delta \\ \sin\omega\sin\lambda - \cos\omega\sin\delta\cos\lambda & \sin\omega\cos\lambda + \cos\omega\sin\delta\sin\lambda & \cos\omega\cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos\beta\sin\alpha \\ \sin\beta\sin\alpha \\ \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (14)$$

如果车辆在平面上两次停放角度 β 相差 180° 将两次传感器数据求和可以得到:

$$\begin{bmatrix} A_{SX}(\beta) \\ A_{SY}(\beta) \\ A_{SZ}(\beta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{SX}(\beta+\pi) \\ A_{SY}(\beta+\pi) \\ A_{SZ}(\beta+\pi) \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} 2\sin\delta\cos\alpha \\ -2\cos\delta\sin\omega\cos\alpha \\ 2\cos\delta\cos\omega\cos\alpha \end{bmatrix} \quad (15)$$

化简上式可以得到:

$$\cos\alpha = \frac{\sqrt{(A_{SX}(\beta) + A_{SX}(\beta+\pi))^2 + (A_{SY}(\beta) + A_{SY}(\beta+\pi))^2 + (A_{SZ}(\beta) + A_{SZ}(\beta+\pi))^2}}{2g} \quad (16)$$

求解上式可以得到车辆停放平面与水平面夹角 α 。

将 A, B, C 和 α 的值代入式(11), 通过求解该方程组即可解得安装误差角 φ, θ, γ , 完成安装误差的标定。

3 标定方法的验证

为了验证标定方法的性能, 通过模拟实验来进行测试。首先假设误差角度 $\gamma = 5^\circ, \theta = 6^\circ, \varphi = 7^\circ$, 停放平面与水平面夹角 $\alpha = 5^\circ$ 。假设车辆在平面停放角度 β 分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, \dots, 330^\circ$, 对应的模拟数据如表 1 所示, 其中 X, Y, Z 表示传感器相应轴的数据, 考虑到实际测量时加速度传感器静态随机误差 ($\pm 0.001 g_n$) 的存在, 在数据中人为加入 $0.001 g_n$ 的随机噪声。

表 1 模拟数据

$\beta / (^\circ)$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
$X / (\times 10^{-3} g_n)$	-178	-162	-125	-82	-41	-13	-6	-23	-59	-104	-145	-174
$Y / (\times 10^{-3} g_n)$	107	149	177	184	167	132	89	46	17	11	27	62
$Z / (\times 10^{-3} g_n)$	977	976	975	979	984	992	995	999	999	996	989	983

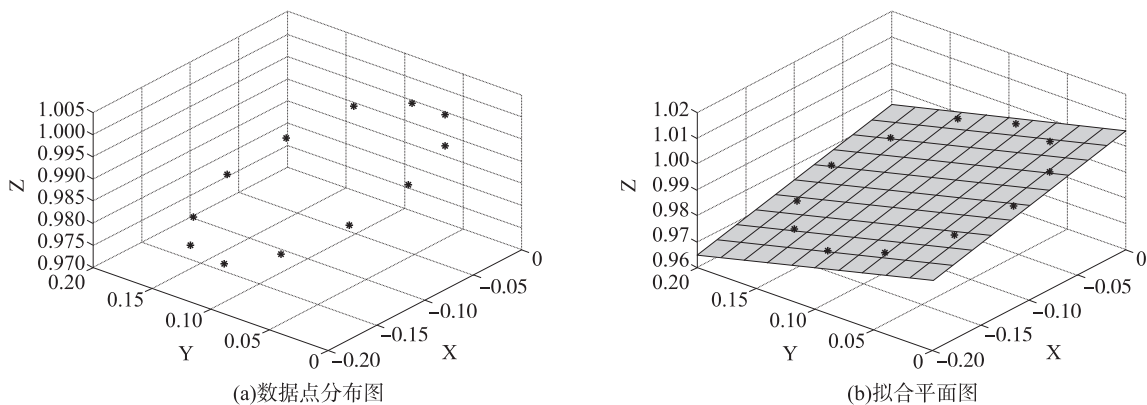


图 5

12 组数据点 (X, Y, Z) 在三维空间内的分布如图 5(a) 所示, 通过最小二乘法拟合出的空间平面在三维空间内的分布如图 5(b) 所示, 拟合出的空间平面方程为:

$$-0.0944x + 0.1094y + 0.9941z = 1 \quad (17)$$

将表 1 中 β 相差 180° 的数据代入式(16), 可以得到 6 个 α 的值。取 α 的均值 $\alpha = 5.1192^\circ$, α 解算的相对误差为 $E_r(\alpha) = 2.38\%$ 。

将式(17)的系数和 α 的值带入式(11)得到:

$$\begin{cases} \sin\gamma\sin\varphi - \cos\gamma\sin\theta\cos\varphi = -0.0940 \\ \sin\gamma\cos\varphi + \cos\gamma\sin\theta\sin\varphi = 0.1045 \\ \cos\gamma\cos\theta = 0.9901 \end{cases} \quad (18)$$

求解方程组 (18), 得到 $\gamma = 5.2999^\circ, \theta = 6.1020^\circ, \varphi = 6.8984^\circ$ 。解算得到安装误差角平均相对误差为 $E_r = 2.84\%$, 完全能够满足工程应用需求, 证明标定方法是有效可行的。

4 结论

本文提出基于数学解算模型的三轴传感器安装误差的标定方法,不需要借助其他精密测量仪器,只需要安装传感器的车辆在任意平面停放数次,通过传感器的输出数据就可以完成安装误差的标定。通过模拟实验验证了该标定方法结算结果与预设值偏差小于3%,在可接受范围内,因此标定方法是有效的。在简易安装的情况下,经过标定后的三轴加速度传感器就可以实现对车辆行驶状态数据测量与采集。

参考文献:

- [1] 亓凤,顾青. MEMS 传感器在汽车性能测试中的应用[J]. 自动化仪表,2010,31(7):69-71.
- [2] 罗健飞,吴仲城,申飞. 基于 ARM 的三维汽车振动加速度测量方法研究[J]. 仪表技术与传感器,2010,4(4):87-88.
- [3] 杨华波,张士峰,蔡洪. 无陀螺仪惯性系统构型中安装误差分析与标定[J]. 中国惯性技术学报,2007,15(1):39-43.
- [4] 胡宇群,秦龙刚,黄翔. 基于激光雷达的机载设备安装姿态校准[J]. 南京航空航天大学学报,2010,42(1):112-116.
- [5] 马建萍. GPS 辅助捷联惯导系统动基座初始对准新方法[J]. 传感技术学报,2010,23(11):1656-1661.
- [6] 戴洪德,陈明,周绍磊,等. 惯性导航系统非线性初始对准的 LS-SVM 方法研究[J]. 传感技术学报,2007,20(7):1573-1576.
- [7] MALEKI A F. Two-Point Calibration of a Longitudinal Acceleration Sensor[P]. US,6347541B1. 2002-2-19.
- [8] TAKAHASHI M, KONDO Y. Three-Axis Acceleration Sensor Variable in Capacitance under Application of Acceleration[P]. US,5383364. 1995-1-24.
- [9] 张金. 基于 ARM 的车辆姿态测量系统设计[D]:[硕士学位论文]. 北京:北京交通大学电子信息工程学院,2008.
- [10] 杨杰,史震,岳鹏,等. 三轴加速度计 GFSINS 安装误差标定与补偿方法[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(4):869-878.
- [11] KROHN A, BEIGL M, DECKER C, et al. Inexpensive and Automatic Calibration for Acceleration Sensors[J]. Ubiquitous Computing Systems,2005:245-258.
- [12] 李怡凡,吴黎明,张力镛. 一种车身姿态的捷联测量[J]. 传感技术学报,2010,23(8):1189-1194.
- [13] 覃方君,许江宁,傅军,等. 一种简化的无陀螺惯导系统安装误差校准方法[J]. 测试技术学报,2008,22(2):155-159.
- [14] 崔敏,马铁华,张慧,等. 基于十二加速度计的 GFSINS 安装误差标定及补偿[J]. 中国惯性技术学报,2009,17(4):413-418.



张 辉(1973-),男,河南郑州人,副教授,主要研究方向为交通监控系统与安全,zhanghui@mail.sysu.edu.cn;



柴 伟(1986-),男,山西朔州人,硕士研究生,主要研究方向为车载电子与车辆状态估计,chaiwei-2005@163.com。