

利用加速度计和角速度仪的笔杆运动姿态检测

曹 丽, 刘 扬, 刘 伟
(清华大学自动化系 北京 100084)

摘 要: 在笔杆上安装加速度和角速度传感器测量笔杆的运动姿态时, 由于两种传感器的性质不同, 再经过运算处理后, 对测量结果精度的作用也不同。为此, 本文利用 3 种卡尔曼滤波观测模型, 分析比较了只利用加速度传感器、只利用角速度传感器以及同时利用加速度和角速度传感器数据 3 种情况下估计笔杆运动姿态的结果及特点。实验表明, 角速度传感器可以较准确地确定角速度, 但角度累计误差较大; 加速度传感器的静态分量可以较准确地确定姿态角度, 但对角度变化不灵敏, 两者结合起来可以互相弥补欠缺, 有利于笔杆的运动姿态检测。

关键词: 加速度计; 陀螺仪; 笔杆运动检测; 姿态角; 姿态角速率

中图分类号: TP223 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.804

Pen motion attitude measurement using accelerometer and gyroscope

Cao Li, Liu Yang, Liu Wei

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: It's necessary for signature recognition and calligraphy research to get the attitude information of a pen by mounting accelerometer and gyroscope on it. In this paper, the difference between the two types of sensors is analyzed and compared on the total accuracy of attitude measurement. As a result, accelerometer corrects the attitude angle but is not sensitive to the angular rate, on the other hand, gyroscope measures the attitude angular rate but the accumulated error of attitude angle is large and the initial angle is hard to get. The experimental results show that integrating the two types of sensors will advantage dynamic attitude measurement.

Key words: accelerometer; gyroscope; pen motion measurement; attitude angle; attitude angular rate

1 引 言

MEMS 惯性传感器由于其小型、轻便、低耗能等特点, 在便携式人机交互设备中受到了关注, 已经有手机装载加速度传感器, 通过持机的手势代替部分键盘输入, 实现菜单选择等应用。利用加速度传感器的笔杆跟踪和机器人手指控制的研究也都在不同程度上达到了相应的应用目的^[1,2]。在复合使用加速度传感器、获取更加丰富和精确的定位信息方面, 文献[3]在笔杆上下两处安装加速度传感器, 通过取其差值得到笔杆旋转角速度, 在文字识别等定性分析中发挥了一定的作用。文献[4-5]在固定坐标轴上安装视频监测器, 视频跟踪笔杆上的彩色标

记(参照在图 1 中标出的视频探头和彩色标记的位置), 以此来修正三轴加速度测量得到的笔杆投影位置的方法, 较好地解决了累计误差的影响。但是, 书写过程中的旋转角速度及其变化量都非常小, 加速度传感器对于转动不够灵敏, 仅使用加速度传感器信息进行三维空间的定位是有局限性的^[6]。

随着 MEMS 器件研究的发展, 同时采用多轴加速度和角速度检测的测量系统已成为可能。2007 年美国模拟器件(ADI 公司)发布了集成 MEMS 加速度传感器和陀螺传感器的新型运动检测传感器 ADIS16355, 可以检测 X/Y/Z 三轴向的加速度及绕 3 个轴的角速度运动。日本和欧洲的厂商也相继发布 6 自由度集成传感器及其测试平台, 今后运用小型惯性传感器的高精度低成本的

运动分析和测量系统将会不断涌现。

尽管陀螺仪元件成本较高,通常不易采用,文献[7-8]已在笔杆上安装加速度计和角速度仪,研究开发新的手写输入设备,并从传感器信息中恢复三维或二维笔迹信息。原理上对传感器的输出实施坐标变换,然后进行积分就可以解决定位问题。但是加速度计和角速度仪的测量噪声以及经过积分后的累计噪声,甚至初始状态值都严重影响了笔杆位置和姿态的测量结果的准确性。此外,两种不同种类传感器在物理模型中的耦合效应导致补偿算法复杂化,急需分别把握两种传感器对求解运动姿态的精度影响。

为了实现笔杆的三维空间位置和姿态准确测量,研究提高定位精度的信息处理方法,合理设计和配置加速度和角速度传感器,本文具体分析安装多轴加速度传感器和角速度传感器所获得测量信息的不同,对位置和速度测量结果的准确性进行对比,以期在复杂的连续笔画中的笔杆运动测量中能更加准确地实现。

2 测量系统和测量原理

2.1 测量系统结构组成

如图1的测量系统结构图所示,在笔杆上安装三轴加速度传感器和两轴角速度传感器。传感器输出信号 $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)^T$ 、 $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y)^T$ 都是基于移动坐标系的 $o-xyz$ 测量结果。目标问题是根据传感器的输入数据信息,输出固定坐标系 $O-XYZ$ 下的笔尖坐标 $(X, Y, Z)^T$ 和笔杆姿态角 $(\varphi, \theta)^T$ 。加速度传感器采用2个双轴传感器 ADXL202 ($-2\text{ g} \sim +2\text{ g}$),角速度传感器采用2个单轴传感器 ADXRS150 ($\sim 150^\circ/\text{s}$)。

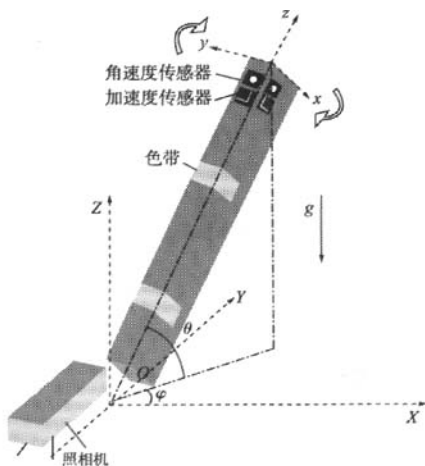


图1 笔杆运动检测系统示意图

Fig.1 System sketch for pen motion measurement

2.2 测量原理

设笔杆没有自转,则笔杆在三维空间的5自由度运动,可以用如下15个状态变量来表示:

$$\mathbf{X} = \left(X, Y, Z, \varphi, \theta; V_x, V_y, V_z, \omega_\varphi, \omega_\theta; a_x, a_y, a_z, \frac{d\omega_\varphi}{dt}, \frac{d\omega_\theta}{dt} \right) \quad (1)$$

用状态转移矩阵 \mathbf{A} 表示的状态方程如下式所示:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{v}_{k-1} \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} I_3 & I_3 \Delta t & I_3 \Delta t^2 / 2 \\ 0 & I_3 & I_3 \Delta t \\ 0 & 0 & I_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

作为观测量的加速度传感器输出 $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)^T$ 包括由于重力 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 引起的静态分量 \mathbf{a}_s 、平动分量 \mathbf{a}_t 以及旋转分量 \mathbf{a}_r 等3个分量。表示成 $\mathbf{a} = \mathbf{a}_s + \mathbf{a}_t + \mathbf{a}_r$, \mathbf{a}_s 、 \mathbf{a}_t 以及 \mathbf{a}_r 的表达式分别为,

$$\mathbf{a}_s = (-g \cos \theta, 0, -g \sin \theta)^T \quad (4)$$

$$\mathbf{a}_t = \mathbf{B}_r^{-1} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{a}_r = \begin{pmatrix} r \frac{d\omega_\theta}{dt} + r \cos \theta \omega_\varphi^2 \sin \theta \\ r \cos \theta \frac{d\omega_\varphi}{dt} \\ r \omega_\theta^2 + r \cos \theta \omega_\varphi^2 \cos \theta \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\text{式中: } \mathbf{B}_r = \begin{pmatrix} \sin \theta & 0 & -\cos \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta & 0 & \sin \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

为移动坐标系 $o-xyz$ 对固定坐标系 $O-XYZ$ 的旋转矩阵, r 为传感器安装点到笔尖的距离。

另外,陀螺仪输出即表示旋转角速度:

$$\begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_\varphi \\ \omega_\theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

综合式(4)~(8)可以得到观测方程式如下:

$$\mathbf{Z}_k = (a_x, a_y, a_z, \omega_x, \omega_y)^T = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{n}_k \quad (9)$$

3 实验方法和数据处理

3.1 实验平台

选用2自由度匀速转动云台,将笔杆固定在云台上,如图2所示。云台转动范围是(φ 方向: $0 \sim 355^\circ$, θ 方向: $-10^\circ \sim 60^\circ$),转动速度及误差范围是(φ 方向: $5.1 \pm 1^\circ/\text{s}$, θ 方向: $3.6 \pm 0.5^\circ/\text{s}$)。利用该云台进行二维旋转的姿态检测和验证实验。此时,式(1)的状态参数简化

为 $X = (\varphi, \theta, \varphi, \theta)$, 即云台旋转的2个角度和2个角速度为云台的状态参数。

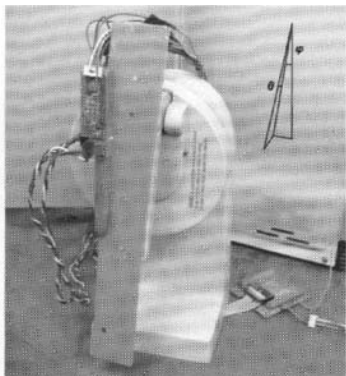


图2 模拟书写动作的云台

Fig. 2 Turning table for pen motion simulation

由于云台转动速度较低, 笔杆低速产生的转动加速度比由于重力产生的静态加速度小很多, 实验中加速度的旋转分量可以暂时忽略不计。对于如下3种情况, 分别得到简化的观测方程式(10)、(11)、(12)。

(1) 仅使用加速度计

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}_k = h(X_k) = \begin{pmatrix} g \sin \varphi_k \\ g \cos \varphi_k \sin \theta_k \\ g \cos \varphi_k \cos \theta_k \end{pmatrix} \quad (10)$$

(2) 仅使用角速度仪

$$\begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{pmatrix}_k = h(X_k) = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_k \\ \dot{\varphi}_k \cos \theta_k \end{pmatrix} \quad (11)$$

(3) 使用加速度计和角速度仪

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ \omega_x \\ \omega_y \end{pmatrix}_k = h(X_k) = \begin{pmatrix} g \sin \varphi_k \\ g \cos \varphi_k \sin \theta_k \\ g \cos \varphi_k \cos \theta_k \\ \dot{\theta}_k \\ \dot{\varphi}_k \cos \theta_k \end{pmatrix} \quad (12)$$

模仿中国书法中“永字8法”的八种基本笔画, 通过计算机编程生成相应笔画的云台转动控制模式, 在图2所示云台上进行基本笔画的轨迹跟踪测试。

图3是其中的“横折竖”和“横折撇”2种笔画下测得的三轴加速度传感器数据(对应左图中3条曲线)和两轴角速度传感器数据(对应右图中2条曲线)。采样速率为每通道100 Hz。笔画持续时间约5~10 s。

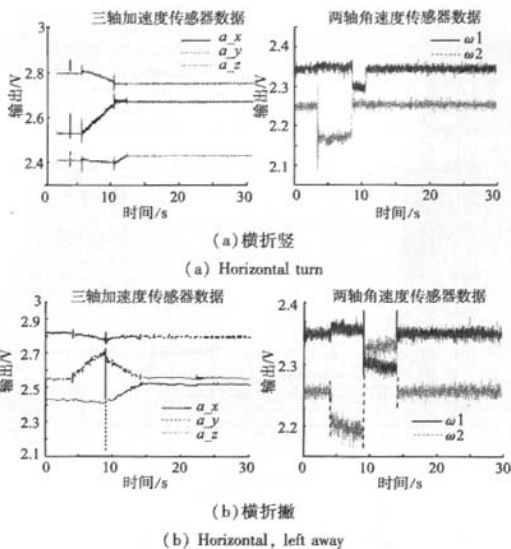


图3 基本笔画动作的数据采集结果

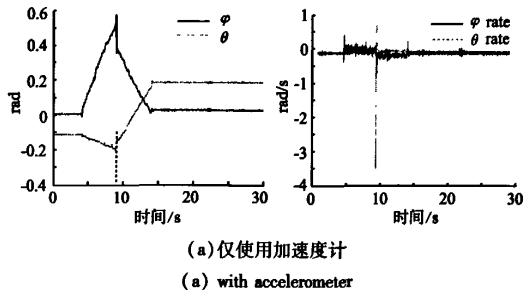
Fig. 3 Acquired data for basic strokes

3.2 卡尔曼滤波处理

卡尔曼滤波是针对线性系统, 通过观测值推测状态的一种数据处理方法, 适合于融合不同种类传感器测量值或冗余信息处理, 与取多个直接测量值然后权重平均的处理方法相比, 其整体处理效率高、测量结果精确。本文中观测模型是含三角函数的非线性系统, 通过一阶线性近似, 即求式(10)~(12)的Jacobi矩阵, 利用扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filtering), 由观测值依然可以估计出状态参数。

式(2)和式(9)中的 v 和 n 分别是高斯型过程噪声和测量噪声。测量噪声通过观测加速度计和角速度仪的输出信号噪声水平获得; 过程噪声结合云台转速的精度指标估计, 最后求得卡尔曼滤波处理中所需要的噪声方差。

运用上述3种观测方程, 对笔画数据进行卡尔曼滤波估计, 图4是笔画“横折撇”的3种估计结果, 左图均为角度估计结果, 右图均为角速度估计结果。



(a) 仅使用加速度计

(a) with accelerometer

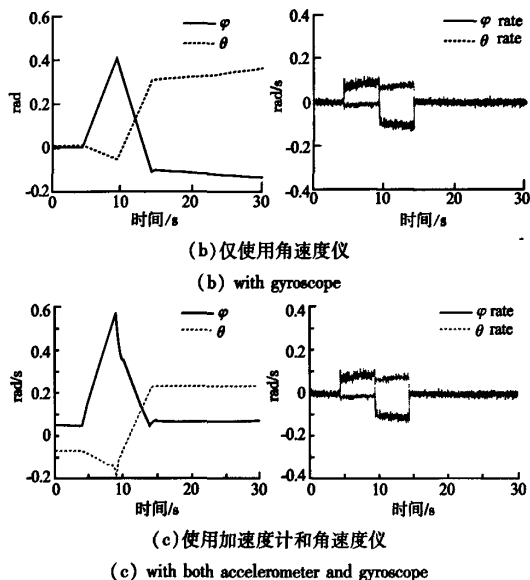


图4 笔画“横折撇”的动作估计

Fig. 4 Motion estimation for horizontal, left away

3.3 结果分析

用同样方法跟踪测试8种笔画^[9],观察比较其结果,可以发现:

(1)仅使用加速度计数据的EKF算法,估计低速运动情况下的姿态角 φ 和 θ 较为准确,且对状态估计时设定的初始值不敏感,能够很快收敛到真实的状态值。对于估计姿态角的时间变化率 $\dot{\varphi}$ 和 $\dot{\theta}$ 效果不佳,往往有较大的噪声存在。如图4(a)所示,对缓慢变化的 φ 和 θ 能紧密跟踪,对拐点处的角度跟踪结果较差,对 $\dot{\varphi}$ 和 $\dot{\theta}$ 的估计结果完全不能接受。

(2)仅使用角速度仪数据的EKF算法,对于估计运动时姿态角 φ 和 θ 的噪声水平较仅使用加速度计数据的EKF算法为好,但是它受到状态估计时设定的初始值影响很大,且在静止情况下存在累计误差。这种算法对于估计姿态角的时间变化率 $\dot{\varphi}$ 和 $\dot{\theta}$ 效果明显好于仅使用加速度计数据的EKF算法。如图4(b)所示,对 φ 和 θ 的跟踪结果信噪比比图4(a)明显有所改善,但误差累计现象严重;对 $\dot{\varphi}$ 和 $\dot{\theta}$ 的估计结果很好。

(3)结合加速度计数据和角速度仪数据的EKF算法,综合了上述两种算法的优点,它在估计姿态角 φ 、 θ 以及姿态角的时间变化率 $\dot{\varphi}$ 和 $\dot{\theta}$ 方面均有良好的结果。如图4(c)所示,(a)和(b)中的欠缺都明显得到改善,体现了同时使用加速度和角速度传感器的必要性。

(4)其他8组基本笔画实验结果都有同样结论,同时,所有笔画测试表明该方法可以实现云台的运动姿态检测。

4 结 论

本文利用3种卡尔曼滤波观测模型,分析比较了只利用加速度传感器、只利用角速度传感器以及同时利用加速度和角速度传感器数据3种情况下估计笔杆运动姿态的结果及特点。实验表明,在笔杆运动姿态定位的高精度定量测量中,有必要采用加速度计和角速度仪并用。增加角速度检测,可以使角速度信息更加可靠,而角度信息则主要依靠加速度计的静态分量准确获得。

本文对于二维转动平台,给出了角度和角速度的定位跟踪结果。对于任意的三维空间定位算法仍需要进一步研究标定和补偿方法,特别是在加速度计动态分量不可忽视的条件下,如何准确分离并利用静态分量是一个需要努力研究的方向。

参考文献

- [1] ADRIAN D C, KRISHNAMOORTHY G K, SIMON P. Micro-Accelerometer based hardware interfaces for wearable computer mixed reality applications[C]. Proceedings of the 6th International Symposium on Wearable Computers, 2002.
- [2] ALAN H F L, RAYMOND H W L, WEN J L, et al. Alexey potanin, dong-yoon kim. motion sensing for robot hands using MIDS[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2003.
- [3] MIYAKAWA T, YUNEZAWA N, ITOH K, et al. Character pattern reproduction from handwriting pen acceleration[J]. 2000, J83-D-II(2): 671-679.
- [4] CAO L, HU CH. Integration of image sensing and acceleration sensors for calligrapher behavior measurement [C]. Proceedings of SICE Annual Conference 2005 in Okayama, 2005: 1711-1716.
- [5] CAO L. Information acquisition and processing technique by integrating internal sensors into external sensing[J]. Journal of the Robotics Society of Japan, 2006, 24(5): 600-603.
- [6] 刘扬, 贾海涛, 曹丽. 手写动态特征采集系统的设计[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8 增刊): 526-528.
LIU Y, JIA H T, CAO L. Dynamic handwriting features Acquisition System Design[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8 Suppl.): 526-528.
- [7] WON-CHUL B, WOOK CH, KYEONG-HO K, et al. Self-contained spatial input device for wearable computers[C]. Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers, 2003.

- [8] GUANGLIE ZH G SH, YILUN L. Towards an ubiquitous wireless digital writing instrument using MEMS motion sensing technology[C]. Proceedings of the 2005 IEEE/ASME, 2005.
- [9] 刘扬. 利用惯性传感器的笔杆运动检测[M]. 北京:清华大学, 2006.
- LIU Y. Pen motion measurement using inertial sensors [D]. Beijing:Tsinghua University, 2006.

作者简介



曹丽, 分别于1987年、1989年和1992年在日本东京工业大学获得学士、硕士和工学博士学位, 现为清华大学自动化系副教授, 主要研究方向为传感器原理、检测方法

与信号处理、自动化装置。

地址:北京清华大学自动化系, 100084

电话:010-62792559; E-mail:caoli@tsinghua.edu.cn

Cao Li received BSc, MSc and PhD in control and systems all from Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, in 1987, 1989 and 1992, respectively. She is an associate professor in Tsinghua University now. Her main research interests include principle of sensor, measurement method, signal processing and automatic instrument.

Address: Dept. of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Tel: +86-10-62792559; E-mail:caoli@tsinghua.edu.cn



刘扬, 分别于2004年、2006年在清华大学获得学士、硕士学位, 现为美国肯塔基大学博士研究生, 主要研究方向为检测系统、制造系统性能评价。

E-mail:Yang.Liu@uky.edu

Liu Yang received BSc and MSc both from Tsinghua University in 2004 and 2006 respectively. He is a doctoral student in University of Kentucky now. His main research fields include measurement system, manufacturing system performance evaluation.

E-mail:Yang.Liu@uky.edu

利用加速度计和角速度仪的笔杆运动姿态检测

作者: [曹丽](#), [刘扬](#), [刘伟](#), [Cao Li](#), [Liu Yang](#), [Liu Wei](#)
作者单位: [清华大学自动化系, 北京, 100084](#)
刊名: [仪器仪表学报](#) [ISTIC](#) [EI](#) [PKU](#)
英文刊名: [CHINESE JOURNAL OF SCIENTIFIC INSTRUMENT](#)
年, 卷(期): 2008, 29 (4)
被引用次数: 2次

参考文献(9条)

1. GUANGLIE ZH;G SH;YILUN L [Towards all ubiquitous wireless digital writing instrument using MEMS motion sensing technology](#) 2005
2. WON-CHUL B;WOOK CH;KYEONG-HO K [Self-contained spatial input device for wearable computers](#)[外文会议] 2003
3. 刘扬;贾海涛;曹丽 [手写动态特征采集系统的设计](#)[期刊论文]-[仪器仪表学报](#) 2005(zk)
4. 刘扬 [利用惯性传感器的笔杆运动检测](#) 2006
5. CAO L [Information acquisition and processing technique by integrating internal sellgors into external sensing](#) 2006(05)
6. CAO L;HU CH [Integration of image sensing and acceleration sensors for calligrapher behavior measurement](#)[外文会议] 2005
7. MIYAKAWA T;YUNEZAWA N;ITOH K [Character pattern reproduction from handwriting pen acceleration](#) 2000(02)
8. ALAN H F L;RAYMOND H W L;WEN J L [Alexey potanin, dong-yoon kim. motion sensing for robot hands using MIDS](#) 2003
9. ADRIAN D C;KRISHNAMOORTHY G K;SIMON P [Micro—Accelerometer based hardware interfaces for wearable computer mixed reality applications](#) 2002

引证文献(2条)

1. 钱昌忠. [吴仲城](#). [申飞](#). [吴宝元](#). [任阳](#) [姿态传感器在仿人机器人足部感知系统中的应用](#)[期刊论文]-[仪表技术](#) 2010(9)
2. [朱翔明](#). [刘书朋](#). [陈林](#) [便携低功耗三维加速度采集卡的设计](#)[期刊论文]-[电子测量技术](#) 2008(10)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_yqyb200804030.aspx