

文章编号:1004-9037(2012)06-0730-07

# 便携式方位与姿态检测系统

顾 超 邹艳辉 程 超

(东南大学美国德州仪器数字信号处理实验室,南京,210096)

**摘要:**基于MSP430和OMAP3530平台,实现了便携式方位与姿态检测系统。系统前端由三轴磁强计、三轴加速度计、三轴陀螺仪和MSP430组成。MSP430负责接收和校准传感器数据,并通过串口发送给OMAP3530 EVM。OMAP3530对接收数据进行卡尔曼滤波,并利用OMAP3530强大的3D硬件加速功能,通过触摸屏进行方位与姿态信息的三维人机交互显示。测试实验结果表明,该系统性能稳定,定位精度高,三轴陀螺仪和卡尔曼滤波算法的引入提高了系统的精度和抗干扰性能。

**关键词:**姿态检测;卡尔曼滤波;磁强计

**中图分类号:**U666.12

**文献标识码:**A

## Portable Attitude Detection System

*Gu Chao, Zou Yanhui, Cheng Chao*

(Texas Instruments DSPS Laboratory, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

**Abstract:** Based on MSP430 and OMAP3530 platforms, the paper designs a portable attitude detection system. The front-end of the system consists of a three-axis magnetometer, a three-axis accelerometer, a three-axis gyroscope and an MSP430 MCU. The role of MSP430 is to receive and calibrate sensor data, and send the data to the OMAP3530 EVM through the serial port. Then, OMAP3530 conducts the Kalman filter algorithm on the received data. With the powerful three-dimensional hardware acceleration function of OMAP3530, attitude information is displayed through the touch screen using three-dimensional software interface. Experiment results show good stability and high accuracy of the demo system, and they also demonstrate that the introduction of three-axis gyroscope and Kalman filter algorithm can improve the accuracy and robustness of the system.

**Key words:** attitude detection; Kalman filtering; magnetometer

## 引 言

姿态检测(为了叙述方便,这里的姿态已经包括方位,指航向角,俯仰角和横滚角,下同)在虚拟现实和驾驶员疲劳驾驶检测等应用中扮演着重要的角色,这些应用要求系统数据采集部分功耗低,体积小,便于穿戴。

陀螺是最常用的姿态传感器。微机械陀螺与其他陀螺相比,具有体积小、成本低、易于批量生产等优点,极大扩展了陀螺的应用领域<sup>[1]</sup>。但是微机械陀螺精度比较低,其漂移会引起较大的姿态误差,只能在短时间内提供可靠的姿态信息。因此微机械

陀螺必须与其他姿态传感器(例如GPS、加速度计、磁强计等)组合使用才能给出长期的稳定可靠的姿态信息。

如何融合不同传感器数据准确得出当前的姿态是算法设计的主要任务,解决上述问题的常用方法是采用卡尔曼滤波器<sup>[2-8]</sup>。卡尔曼滤波器利用其他姿态传感器的数据来补偿陀螺漂移引起的姿态误差。文献[4]提出一种用于估算惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)姿态的扩展卡尔曼滤波器,该IMU由9个传感器组成:3个加速度计、3个陀螺和3个磁强计。Luinge H J<sup>[5]</sup>等人采用倾斜计的数据进行姿态误差补偿。Rios J A<sup>[6]</sup>描述了一种利用GPS和磁强计来补偿姿态误差的卡

尔曼滤波器。

本文采用文献[4]中给出的IMU架构,以磁强计、加速度计、微机械陀螺和MSP430为组合自制了数据采集模块,在OMAP3530上运用锥运动优化的等效旋转矢量算法更新姿态,并据此设计卡尔曼滤波器融合不同传感器数据修正姿态得到其精确值,实现了一个方位与姿态检测系统,功能如下:(1)测定姿态角,即航向角,俯仰角和横滚角;(2)三维界面直观显示姿态角;(3)具有调整三维图像大小以及显示或隐藏航向角刻度功能;(4)引入OMAP3530 EVM触屏功能,一指轻松控制设备。(5)系统可抗短时磁干扰和线加速干扰;(6)系统传感器数据采集模块充分利用了MSP430低功耗结构,功耗低。最后通过实际系统性能和结果测试验证了此检测系统的稳定性和精确性。

## 1 算法介绍

本文完成姿态(航向角、俯仰角、横滚角)检测,主要步骤包括:利用磁强计,加速计数据由坐标旋转关系更新姿态,利用陀螺仪数据由等效旋转矢量法更新姿态,设计卡尔曼滤波器融合上述两组姿态。

### 1.1 四元数

姿态就是联系动坐标系和参考坐标系角位置的参数。欧拉角和四元数是常用的表示姿态的两种方式。四元数由于可以避免欧拉角的奇异问题而应用得更加广泛。四元数一般可写为

$$n = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k \quad (1)$$

式中, $i^2=j^2=k^2=-1$ , $ij=k$ , $jk=i$ , $ki=j=-ik$ 。

四元数可用来表示矢量旋转,其矢量部分定义了旋转轴,标量部分定义了旋转角度。如果旋转轴由参考系的方向余弦来定义,并且四元数范数限制为单位范数,则可以方便地表示旋转。假设方向余弦角为 $\theta$ , $\gamma$ 和 $\phi$ ,旋转角度为 $\delta$ ,则旋转四元数可表示为

$$= \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} & \cos \theta \sin \frac{\delta}{2} & \cos \gamma \sin \frac{\delta}{2} & \cos \phi \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} & \mathbf{n} \cdot \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为沿旋转轴的单位矢量, $\mathbf{n} = [\cos \theta \quad \cos \gamma \quad \cos \phi]^T$ 。矢量 $\mathbf{u}$ 绕 $\mathbf{n}$ 轴旋转 $\delta$ 角度后的矢量 $\mathbf{v}$ 为

$$\mathbf{v} = \mathbf{q} \times \mathbf{u} \times \mathbf{q}^{-1} = \mathbf{T}\mathbf{u} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{q}^{-1} = q_0 - q_1i - q_2j - q_3k,$$

$\mathbf{T} =$

$$\begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

利用式(3)可由磁强计,加速计数据计算得到粗略姿态,具体计算过程可见文献[9]。

### 1.2 等效旋转矢量法

等效旋转矢量法在利用角增量计算等效旋转矢量时对刚体旋转的不可交换性误差做了适当的补偿,在姿态更新周期内包含的角增量子样越多,补偿就越精确。相比四元数毕卡算法精确度更高,并且旋转矢量算法可获得锥运动环境下的优化算法,因此特别适用于高动态环境下工作。

本文采用锥运动环境下等效旋转的三子样优化算法进行姿态更新,详细推导过程参见文献[10, 11],该算法为

$$\mathbf{Q}(t+h) = \mathbf{Q}(t) \otimes \mathbf{q}(h) \quad (5)$$

式中: $\otimes$ 表示四元数乘法,运算过程参见文献[10], $\mathbf{q}(h)$ 为 $t$ 到 $t+h$ 时间段内的姿态变化四元数, $\mathbf{Q}(t)$ 为 $t$ 时刻的姿态四元数, $\mathbf{Q}(t+h)$ 为 $t+h$ 时刻的姿态四元数,其中

$$\mathbf{q}(h) = \cos \frac{\Phi}{2} + \frac{\Phi}{\Phi_b} \sin \frac{\Phi}{2} \quad (6)$$

$$\Phi = [\Phi_x, \Phi_y, \Phi_z]^T =$$

$$\Delta \theta_1 + \Delta \theta_2 + \Delta \theta_3 + \frac{9}{20} \Delta \theta_1 \times$$

$$\Delta \theta_3 + \frac{27}{40} \Delta \theta_2 \times (\Delta \theta_3 - \Delta \theta_1) \quad (7)$$

式中: $\Phi$ 为对应 $t$ 到 $t+h$ 的等效旋转矢量, $\Phi_x$ ,  $\Phi_y$ ,  $\Phi_z$ 分别为 $x$ 轴, $y$ 轴, $z$ 轴上对应的等效旋转矢量分量, $\Phi_b = |\Phi|$ , $\Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \Delta \theta_3$ 为 $t=1/3h, 2/3h, h$ 时的角增量。

### 1.3 卡尔曼滤波器的设计

1960年,卡尔曼发表了他著名的用递归方法解决离散数据线性滤波问题的论文<sup>[12]</sup>。从那以后,得益于数字计算技术的进步,卡尔曼滤波器已成为推广研究和应用的主题,尤其是在自主或协助导航领域。

本文采用文献[13]中的伪线性卡尔曼滤波器,考虑如下系统

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k \quad (8)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (9)$$

式(8)为卡尔曼滤波器的状态方程,式(9)为卡尔曼

滤波器的观测方程。其中,  $\mathbf{x}_k$  是状态矢量,  $\mathbf{A}$  是状态转移矩阵,  $\mathbf{w}_k$  是协方差阵为  $\mathbf{W}_k$  的过程噪声矢量;  $\mathbf{y}_k$  是观测矢量,  $\mathbf{C}$  是系统观测矩阵,  $\mathbf{v}_k$  是协方差阵为  $\mathbf{V}_k$  的观测噪声矢量。

卡尔曼滤波器是计算状态  $\mathbf{x}$  的最优估计  $\hat{\mathbf{x}}$  的递归算法。卡尔曼滤波器在利用几个不同噪声测量来估计无法直接测量的变量方面非常有效。因此, 尽管陀螺是通过对角速率信号积分来获得姿态, 加速度计和磁强计却能提供不同噪声、无漂移的姿态。卡尔曼滤波器能够适当权衡两方面信息, 充分利用从各个传感器得到的数据。

下面分别给出所采用的卡尔曼滤波器的状态矢量  $\mathbf{x}$ , 状态转移矩阵  $\mathbf{A}$ , 观测矢量  $\mathbf{y}$  和系统观测矩阵  $\mathbf{C}$ 。

式(5)可以看作差分方程, 将其时域离散化即得

$$\mathbf{Q}_{k+1} = \mathbf{Q}_k \otimes \mathbf{q}_k(h) = \mathbf{M}_k \mathbf{Q}_k \tag{10}$$

式中:  $\mathbf{Q}_k = (q_0^k, q_1^k, q_2^k, q_3^k)^\top$ ;  $\mathbf{q}_k(h) = (q_{h0}^k, q_{h1}^k, q_{h2}^k, q_{h3}^k)^\top$ , 根据四元数的乘法有

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} q_{h0}^k & -q_{h1}^k & -q_{h2}^k & -q_{h3}^k \\ q_{h1}^k & q_{h0}^k & q_{h3}^k & -q_{h2}^k \\ q_{h2}^k & -q_{h3}^k & q_{h0}^k & q_{h1}^k \\ q_{h3}^k & q_{h2}^k & -q_{h1}^k & q_{h0}^k \end{bmatrix} \tag{11}$$

选取卡尔曼滤波器的状态矢量为

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{Q}_k = (q_0^k, q_1^k, q_2^k, q_3^k)^\top \tag{12}$$

对应状态转移矩阵为

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} q_{h0}^k & -q_{h1}^k & -q_{h2}^k & -q_{h3}^k \\ q_{h1}^k & q_{h0}^k & q_{h3}^k & -q_{h2}^k \\ q_{h2}^k & -q_{h3}^k & q_{h0}^k & q_{h1}^k \\ q_{h3}^k & q_{h2}^k & -q_{h1}^k & q_{h0}^k \end{bmatrix} \tag{13}$$

式中  $q_{h0}^k, q_{h1}^k, q_{h2}^k, q_{h3}^k$  是式(6)中  $\mathbf{q}(h)$  的各个分量。

观测矢量和状态变量相同, 为姿态角四元数, 观测矢量由磁强计和加速计数据计算并平滑后得到。由于观测矢量和状态变量相同, 所以此时的系统观测矩阵为

$$\mathbf{C} = \mathbf{I}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

至此, 卡尔曼滤波器设计完成。

MARG 传感器是一种混合惯性和磁性的传感器。每个 MARG 传感器包括 1 个三轴磁强计、1 个三轴角速率传感器和 1 个三轴加速度计安装在一个“捷联”式的结构上, 用四元数表示定位。对于

MARG 传感器, 卡尔曼滤波的“标准”方法一般有 7 种状态变量(三维角速率和四维四元数)和 9 种观测变量(9 种直接来自 MARG 传感器的测量)。观测方程证明是高度非线性的, 结果是扩展卡尔曼滤波器变得非常复杂, 在实时系统中很难实现<sup>[4]</sup>。

本文算法中使用三子样优化算法由陀螺仪数据计算等效旋转矢量, 三子样优化算法对于锥运动情况下的算法漂移进行了优化, 且算法每次姿态更新过程中陀螺仪数据积分时间仅为 10 ms, 相对较短, 综合考虑算法的实时性和陀螺仪角速度漂移建模本身的复杂性, 选择只把四维姿态四元数作为状态变量, 所以此时卡尔曼滤波器相对“标准”方法状态变量由 7 种变为 4 种, 观测变量由 9 种变为 6 种; 更进一步, 本文算法利用磁强计和加速计数据计算的平滑后的姿态四元数代替传感器直接观测值作为卡尔曼滤波器的观测矢量, 这样卡尔曼滤波器的输出就由 6 个变成 4 个(由磁强计和加速计计算得到的四维四元数), 更重要的是, 此时系统观测矩阵变成单位矩阵, 对应观测方程变为线性。通过上述的简化, 扩展卡尔曼滤波器最终变为伪线性卡尔曼滤波器, 简化了算法建模难度和计算复杂度, 可在 Cortex-A8 上实现实时运算, 且算法效果良好。

## 2 算法在 OMAP3530 上的实现

本节主要介绍算法在 OMAP3530 ARM 核 Cortex-A8 上的具体实现。包括平台的选择, 算法在 OMAP3530 上的实现难点与优化方案。

### 2.1 平台的选择

德州仪器(TI)公司推出的 OMAP3530 处理器在单芯片上集成了 ARM, DSP, 图形引擎以及外设集, 其集成的图形引擎采用的是 Imagination Technology 公司的 PowerVR IP 核, 支持 OpenGL ES1.1 和 OpenGL ES2.0, 所集成的具有弹性架构的 600 MHz Cortex-A8 内核, 可应用于便携式导航设备、因特网设备以及便携式病人监护设备等。

根据对算法及 OMAP 处理器特点和应用分析, 选择 TI OMAP3530 EVM 作为算法实现平台。开发平台软硬件环境如下:

(1) 硬件环境: OMAP3530 EVM 开发板、自制的传感器数据采集模块(包括 MSP430 和三轴加速计, 三轴磁强计, 三轴陀螺仪), PC 一台(运行 Linux 系统)。

(2) 软件环境: Ubuntu 10.04, Qt for OMAP35xx with OpenGL ES accelerated by

SGX,eclipse 等开发软件。

## 2.2 实现难点与优化方案

### 2.2.1 系统方案

图1 是方位与姿态检测系统的方案框图。系统分为两部分,传感器数据采集部分和数据处理显示部分。传感器数据采集部分由三轴磁强计、三轴加速计、三轴陀螺仪和 MSP430 组成。3 个传感器分别捕获  $x,y,z$  三个坐标上的地磁场信息,加速度信息和角加速度信息;MSP430 负责接收及校准这些数据,并通过串口发送给数据处理显示部分。数据处理和显示由 OMAP3530 EVM 负责,其通过串口接收 MSP430 传来的数据,由 Cortex-A8 处理器完成卡尔曼滤波融合算法,实现抗干扰、校正处理,融合不同传感器数据,解算并控制屏幕显示姿态角。依靠 OMAP3530 强大的 3D 硬件加速功能并结合 OpenGL ES2.0 和 Qt,设计出友好的三维人机交互软件界面,并通过 Tslib 库在 OMAP3530 EVM 上的移植引入触屏功能,使设备更易操控。

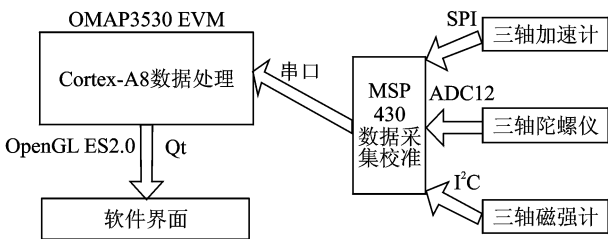


图1 系统方案框图

### 2.2.2 算法流程

如图 2 所示算法一方面利用加速度计和磁强计数据由旋转矩阵变换关系计算得到粗略姿态角,由于实际加速度计和磁强计特别是磁强计的噪声较大,此时得到的数据并不准确,需要先进行平滑处理,再把平滑后的姿态角转化为四元数形式作为卡尔曼滤波器观测矢量。同时另一方面利用陀螺仪数据通过针对锥运动优化的等效旋转矢量算法计算得到对应的等效旋转矢量。得到姿态角的四元数形式  $q$  和等效旋转矢量  $q(h)$  后,利用卡尔曼滤波器将两组数据融合得到较精确的四元数姿态角,并通过全姿态捷联式姿态角算法计算得到最终的精确姿态角。

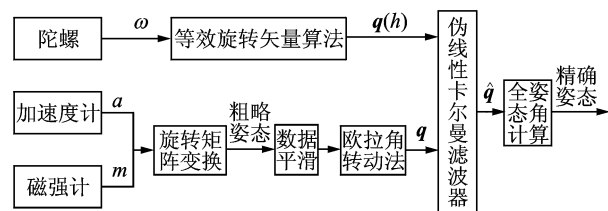


图2 算法框图

### 2.2.3 实现难点与解决方案

实际算法在 OMAP3530 上的实现过程中主要有以下难点:

#### (1)软件开发平台的搭建

开发平台的搭建,包括 Tslib 触屏库的移植和图形界面开发环境,即 Qt for OMAP35xx with OpenGL ES accelerated by SGX 的移植。Tslib 库移植的主要目的是引入 OMAP3530 EVM 的触屏功能,方便软件操作;Qt for OMAP35xx with OpenGL ES accelerated by SGX 移植的目的是为了在 OMAP3530 EVM 上使用 OpenGL ES 2.0 开发三维图形界面,以直观显示物体姿态。Qt for OMAP35xx with OpenGL ES accelerated by SGX 的移植比较困难,具体过程参考文献[15],必须指出的是上述网页并不完整,相关内容有遗漏,实际搭建环境的时候必须要将 OMAP35x-Graphics-SDK\_3\_00\_00\_09/GFX\_Linux\_KM 下的 makefile 中的第 1 句改为 export KERNELDIR = \$(HOME)/OMAP35x-PSP-SDK-02.01.03.11/src/kernel/linux-02.01.03.11,否则通不过编译。

#### (2)减小卡尔曼滤波器的观测噪声

由磁强计和加速计数据计算姿态角时,由于传感器特别是磁强计噪声比较大,所得的姿态角数据抖动很厉害,而所设计的卡尔曼滤波器需要利用由磁强计和加速计数据计算的姿态角作为观测向量,这将导致观测噪声偏大,影响卡尔曼滤波的精度。

解决方案是将得到的姿态角先进行平滑处理,再将其转换成姿态四元数作为卡尔曼滤波器的观测向量。采用的平滑算法是滑动加权平均平滑法,即把  $N$  个采样数据看成一个队列,队列的长度固定为  $N$ ,每进行一次新的采样,把采样结果放入队尾,而扔掉原来队首的一个数据,这样在队列中始终有  $N$  个“最新”的数据。计算平滑值时,只要把队列中的  $N$  个数据进行加权平均,就可得到新的平滑后的姿态角,为了提高平滑后的姿态角对于原姿态的跟踪性能,离当前时刻越近的采样点权重系数应越高。

#### (3)全姿态角捷联式系统姿态角计算

如图 2 所示卡尔曼滤波的输出结果是修正的姿态四元数,需要将其转化为欧拉姿态角,但是全姿态角运动情况下姿态角计算中存在问题:①由方向余弦矩阵元素求姿态角时要进行反三角函数运算,当反三角函数的自变量的分母或分子趋于 0 时会引起较大的误差,甚至导致计算机溢出;②当俯仰角趋于  $\pm 0.5\pi$  附近的小锥形区域时,3 个姿

态角自由度退化到两个自由度,这时姿态角的定义与计算方法应做新的改变。

根据式(5,6),可以完成姿态四元数到姿态欧拉角的转换,但是在反三角函数的自变量的分母或分子趋于 0 及当俯仰角趋于 $\pm 0.5\pi$ 附近的小锥形区域时需要单独特殊处理,具体过程可参考文献[15]。

2.2.4 算法的优化

(1)编译优化,在 Qt 编译时使用如下选项对 Cortex-A8 处理器结构进行优化。

① QMAKE\_CFLAGS\_RELEASE =-O3-march=armv7-a-mtune=cortex-a8-mfpup=neon-mfloat-abi=softfp;

② QMAKE\_CXXFLAGS\_RELEASE=-O3-march=armv7-a-mtune=cortex-a8-mfpup=neon-mfloat-abi=softfp。

(2)在计算量方面,尽量对代码中的循环进行拆分简化,去除冗余代码。

(3)算法主要有两方面:①对卡尔曼滤波器的观测矢量进行平滑处理减小其观测噪声,提高算法的精确性;②由姿态四元数计算对应的姿态欧拉角在反三角函数的自变量的分母,或分子趋于 0 以及当俯仰角趋于 $\pm 0.5\pi$ 附近的小锥形区域时进行单独特殊处理,提高算法的稳定性。

3 性能与结果

3.1 系统实物与软件界面设计

如图 3 所示,为系统的启动界面,图中左半部分是传感器数据采集模块,右半部分的 OMAP3530 EVM 作为数据处理显示模块,左右两部分通过串口连接。传感器数据采集模块由磁强计、加速计、陀螺仪和 MSP430 组成,由 3 V 纽扣电池供电;数据处理显示部分由 OMAP3530 EVM 负责,EVM 板中的 SD 卡有两个分区:FAT32 分区包



图 3 系统启动界面

含引导程序 x-loader,u-boot 和 kernel;EXT3 分区中包含板子的文件系统。

图 4 是系统实时检测方位与姿态的实物图,可看到屏幕中的三维立方体模拟了传感器数据采集模块的姿态。程序运行时屏幕左上角分别显示航向角,俯仰角,横滚角的大小,屏幕中央的三维立方体用于模拟传感器数据采集模块的姿态,在立方体周围有一圈刻度和对应的指针,用于表示航向角角度,用于电子罗盘功能,这一圈刻度是可选的,既可以让其显示也可隐藏,通过菜单栏中“Show”标签控制。位于屏幕的底部的滑块用于控制正方体的大小。整个软件界面包括菜单栏,滑块均由触摸屏控制,用手指轻点开发板显示屏程序即开始运行,再次点击则暂停程序,若程序已处于暂停状态,点击屏幕将恢复程序运行。

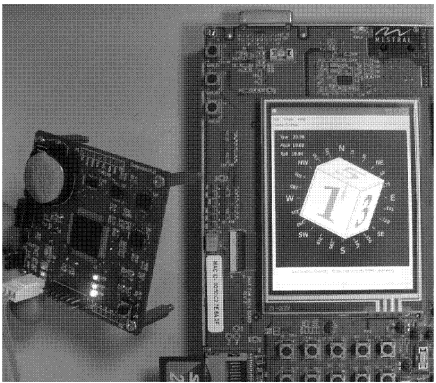


图 4 实时检测方位与姿态

3.2 系统性能测试

传感器数据采集模块对陀螺仪的采样频率为 100 Hz,对于磁强计和加速计的采样频率为 33.3 Hz,整个系统的数据更新频率为 33.3 Hz。

当数据采集模块处于水平静止情况下,采集由磁强计和加速度计数据通过旋转矩阵变换关系计算得到粗略姿态角和由卡尔曼滤波器融合不同传感器数据后最终输出的精细姿态角数据,见表1。其中传感器数据采集时间为 60 s,即两种姿态角每种 2 000 组数据,每组数据包括航向角,俯仰角,横滚角 3 个角度。

如表 1,2 所示,横滚角和俯仰角趋于 0°,这是由于采集数据时数据采集模块水平放在桌面上的缘故。表中航向角的方差和最大偏差(偏离均值的最大值)较俯仰角和横滚角大,数据抖动比较剧烈,这是因为航向角的计算中使用了磁强计的数据,而磁强计测量的磁场强度信息易受周围附加磁场干扰,噪声较大。对比表 1,2 的具体数据可以直观地

看出经过卡尔曼滤波后输出姿态角特别是航向角的方差和最大偏差明显降低,即数据抖动明显降低了,其稳定性和精确性明显提高。

表 1 由加速计和磁强计得到的粗略姿态角参数 (°)

粗略姿态角	航向角	俯仰角	横滚角
均值	191.553 3	-0.901 8	0.284 8
方差	1.705 0	0.054 7	0.071 0
最大偏差	4.763 6	0.901 8	0.847 4

表 2 最终卡尔曼滤波后输出的精细姿态角参数 (°)

精细姿态角	航向角	俯仰角	横滚角
均值	191.556 0	-0.903 6	0.286 4
方差	0.186 4	0.011 7	0.015 3
最大偏差	1.476 3	0.346 0	0.468 2

当系统实时检测姿态时采集其数据,由于航向角的数据抖动比俯仰角和横滚角剧烈,这里给出由加速计和磁强计得到的粗略航向角和最终卡尔曼滤波后的输出的精细航向角的对比图。如图 5 所示,实线表示卡尔曼滤波前的粗略航向角,虚线表示卡尔曼滤波后的精细航向角,从图 5 中可以看到精细航向角很好地拟合了粗略航向角,且更平滑了。系统实时检测姿态时对其施加短时磁干扰并采集其姿态角数据。如图 6 所示,实线表示由加速计

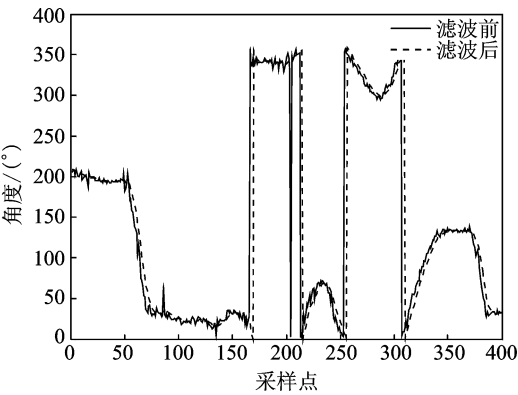


图 5 卡尔曼滤波前后航向角对比

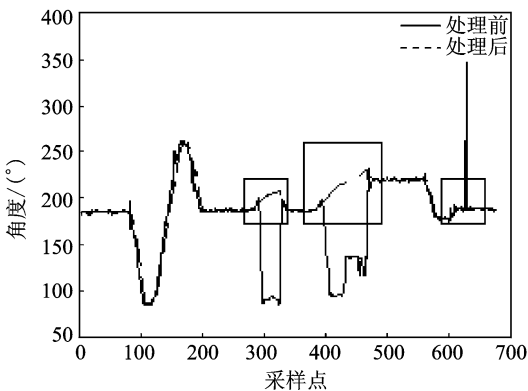


图 6 系统航向角抗短时磁干扰

和磁强计数据得到的粗略航向角,虚线表示运用带抗干扰策略的卡尔曼滤波算法处理后的精细航向角(具体算法流程见2.2.2 算法流程)。图6中前200采样点没有加磁干扰,此时卡尔曼滤波器很好地平滑了粗略航向角;在用黑框标出的地方施加了短时磁干扰,可以看到此时粗略航向角由于磁干扰的存在出现错误,这时算法不再使用磁强计数据而是直接使用陀螺仪数据更新姿态,黑框中的虚线表示直接使用陀螺仪数据更新的航向角,可以看到存在短时磁干扰的情况下,本文算法仍然有效。

## 4 结束语

本文以MSP430和OMAP3530为平台实现了一个方位与姿态检测系统。首先利用MSP430和相关传感器制作了传感器数据采集模块,并在单片机程序编写中充分利用了MSP430丰富的外围接口和其低功耗结构;接着在OMAP3530 EVM上完成了Tslib触屏库和Qt的移植,搭建好开发环境;然后对比各种算法的复杂度和考虑硬件平台的基础上,使用针对锥运动优化的等效旋转矢量法进行姿态更新,并据此设计卡尔曼滤波器融合不同传感器的数据得到稳定精确的姿态角;最后利用OMAP3530强大的3D硬件加速功能设计了友好直观的三维软件界面并引入触屏功能。系统实现性能与结果的测试表明,最终得到的姿态角效果理想,达到预期的要求,具有一定实用价值。

本文中使用加速计数据时没有考虑存在线加速的情况,而加速计测量的是加速度,对于线加速是敏感的,所以当传感器数据采集模块存在线加速的情况下,可以考虑进一步自适应地增大相应卡尔曼滤波器的观测噪声或者此时直接使用陀螺仪数据更新姿态角而不通过卡尔曼滤波器。传感器数据采集模块通过串口和OMAP3530 EVM进行通信,可以考虑换为无线连接方式,增强系统的便携性。

### 参考文献:

[1] 黄旭,王常虹,伊国兴,等. 利用磁强计及微机械加速度计和陀螺的姿态估计扩展卡尔曼滤波器[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(2):27-30.  
Hunag Xu, Wang Changhong, Yi Guoxing, et al. Extended Kalman filter for IMU attitude estimation using magnetometer, MEMS accelerometer and gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2005, 13(2): 27-30.

[2] Foxlin E. Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter [C]

- Proceedings of VRAIS'96. Santa Clara, CA: IEEE, 1996:185-194.
- [3] Gebre-Egziabher D, Hayward R C, Powell J D. A low cost GPS/inertial attitude heading reference system[C]//Proceedings of PLANS'98. Rancho Mirage, CA:[s.n.],1998: 518-525.
- [4] Marins J L, Yun X, Bachmann E R, et al. An extended Kalman filter for quaternion-based orientation estimation using MARG sensors[C]//Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Maui, Hawaii, USA: IEEE, 2001:2003-2011.
- [5] Luinger H J. Inertial sensing of human movement [M]. Enschede, NL: Twente University Press, 2002.
- [6] Rios J A, White E. Fusion filter algorithm enhancements for a MEMS GPS/IMU [C]//ION Meeting Proceedings. San Diego, California: IOV, 2002: 28-30.
- [7] Abdel-Hamid W, Noureldin A, El-Sheimy N. Adaptive fuzzy prediction of low-cost inertial-based positioning errors[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2007, 15(3): 519-529.
- [8] 薛亮, 苑伟政, 常洪龙, 等. 用于微小型飞行器姿态估计的四元数扩展卡尔曼滤波算法[J]. 纳米技术与精密工程, 2010, 7(2):163-167.
- Xue Liang, Yuan Weizheng, Chang Honglong, et al. Application of quaternion-based extended Kalman filter for MAV attitude estimation using MEMS sensors[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2010, 7(2): 163-167.
- [9] 王勇军, 李智, 李翔. 三轴电子罗盘的设计与误差校正[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(10):110-112.
- Wang Yongjun, Li Zhi, Li Xiang. Design and error calibration of three-axis electronic compass [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(10): 110-112.
- [10] Miller R B. A new strapdown attitude algorithm[J]. Journal of Guidance, 1983, 6(4): 289-291.
- [11] 王养柱, 崔中兴. 捷联惯导系统圆锥补偿算法优化设计[J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(1):7-10.
- Wang Yangzhu, Cui Zhongxin. Optimal design for coning algorithms of SINS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2000, 8(1): 7-10.
- [12] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, 1960, 82:35-45.
- [13] Azor R, Bar-Itzhack I Y, Deutschmann J K, et al. Angular-rate estimation using delayed quaternion measurements[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2001, 24(3): 436-443.
- [14] Texas Instrument Embedded Processors Wiki. Building Qt for OMAP35xx with OpenGL ES accelerated by SGX # Preparing the Kernel Source [EB/OL]. 2011-10-26. <http://processors.wiki.ti.com/index.php/>
- [15] 陈哲. 全姿态飞机捷联式系统姿态角的计算[J]. 航空学报, 1983, 4(3):76-85.
- Chen Zhe. Calculation for attitude angles of an all attitude aeroplane strapdown system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1983, 4(3): 76-85.

**作者简介:**顾超(1988-),男,硕士研究生,研究方向:信号处理,michael80hou@163.com;邹艳辉(1986-),男,硕士研究生,研究方向:信号处理;程超(1988-),男,硕士研究生,研究方向:信号处理。