

Design of Attitude Sensor Using ADIS16354 Chip*

LIU Poyuan, LIU Shilin*, LIU Zhaoyuan, CUI Zhijun

(College of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A complete triple axis gyroscope and triple axis accelerometer ADIS16354 chip were introduced and a hardware platform was constructed using TMS320F2812 CPU. The CPU controls the ADIS16354 chip and retrieves the acceleration, angles rate and status in real time through SPI interface. According to attitude algorithm and DSP excellent computing ability, the outputs of ADIS16354 chip is applicable for computing pitch angle and roll angle of carrier. The result of static and dynamic testing shows that this system has high stability and high accuracy and it is not affected by magnetic field. It can be widely used in many areas, such as industrial automation, navigation, aeronautics and astronautics.

Key words: gyroscope, accelerometer, ADIS16354, TMS320F2812, Kalman filter, quaternion
EEACC: 7230

基于 ADIS16354 的姿态角传感器设计*

禄坡远, 刘诗斌*, 刘昭元, 崔智军

(西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

摘要: 介绍了 ADIS16354 器件 (陀螺仪和加速度计集成传感器) 的基本功能; 利用 TMS320F2812 DSP 搭建了一个硬件平台并通过 SPI 接口完成对 ADIS16354 的控制、数据采集和状态查询; 结合捷联惯性导航系统姿态解算算法及 DSP 快速解算的特点实现了载体的俯仰角和倾斜角的测量; 编写上位机程序实现对 ADIS16354 的配置和解算结果的实时显示。在无磁转台上进行了静态和动态条件下的测试, 结果表明: 该姿态角传感器具有较高的角度稳定度 (陀螺漂移率小于 $0.02^\circ/s$) 和准确度, 抗磁干扰能力强, 可广泛用于在工业自动化、导航定位、航空航天等场合。

关键词: 陀螺仪; 加速度计; ADIS16354; TMS320F2812; 卡尔曼滤波; 四元素

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)02-0192-04

陀螺仪和加速度计是姿态测量系统的重要组成部分。近年来, 基于 MEMS (微电子机械系统) 技术的微机械惯性器件已日渐成熟, 并在一些领域内得到了大面积的应用^[1]。MEMS 惯性器件的应用大大降低惯性姿态测量系统的成本, 并显著提高系统可靠性。基于 MEMS 惯性器件构建低成本微型惯性系统正成为惯性技术领域的一个研究热点。

在捷联惯性系统中, 惯性器件 (陀螺仪和加速度计) 直接固连在运载体上感应载体在三个轴上的加速度和角速度分量。然后处理器根据导航坐标系和机体坐标系之间的姿态矩阵计算出载体的实时姿态信息。由于捷联惯性系统是建立在数学平台上的一种姿态测量系统, 需要大量的数学运算, 普通的单片机由于处理速度的限制和简单的指令往往不能满足大量的复杂运算要求, 因此传统的捷联惯性系统需要借助大型的机载计算机来完成解算工作, 这大

大的增加了系统的复杂程度。随着 DSP 的出现和发展, 性能不断提高, 高负荷的计算量也不再是制约捷联惯性系统发展的瓶颈, 同时也为捷联惯性系统的应用奠定了物质基础。这推动了惯性姿态系统朝着低成本、低功耗、小体积、高可靠性方向发展。

综合以上情况, 本文设计了基于 ADIS16354 的 DSP 硬件系统, 结合捷联惯导理论^[2], 对由传感器测量出的重力加速度和角速率数据进行处理, 实现载体的俯仰角和倾斜角的测量并对该系统方案的误差进行了分析。相对于以往的分立式惯性器件, ADIS16354 是一款 Analog Device 公司出品的基于 iSensor™ 的六自由度惯性器件^[3], 它包括三个互相正交的加速度传感器和三个互相正交的角速率传感器以及三个互相正交的温度传感器, 是一款低成本、低功耗、小体积、高可靠性和高集成度的惯性传感器。

项目来源: 国家自然科学基金资助 (60874101); 西北工业大学基础研究基金资助 (W018104)

收稿日期: 2009-09-17 修改日期: 2009-11-13

1 姿态角计算

导航和控制中往往需要姿态的确定, 而姿态的确定就是确定姿态角。姿态角唯一确定了载体在导航坐标系下的偏航角 (用 Ψ 表示), 俯仰角 (用 θ 表示), 倾斜角 (用 γ 表示)。偏航角指出了载体前后轴线在水平面的投影与地理北向的夹角, 俯仰角指出了载体的前后轴线与水平面的夹角, 倾斜角指出了载体的对称面 (包含前后轴线) 与包含前后轴线的铅垂面之间的夹角。偏航角的范围为 $-180^\circ \sim +180^\circ$, 俯仰角的范围为 $-90^\circ \sim +90^\circ$, 倾斜角的范围为 $-180^\circ \sim +180^\circ$ 。

捷联姿态解算是利用陀螺输出的角速率信息, 通过求解姿态微分方程, 构建惯性导航系统的数学平台。它是导航解算软件的核心, 其求解精度直接关系到惯性导航系统的可用性。常用的方法有: ① 欧拉角法; ② 四元数法; ③ 旋转矢量法; ④ 方向余弦法。其中四元数法^[2] 只需求解四个未知量的线性微分方程组, 计算量小, 且算法简单, 易于操作, 是较实用的工程方法, 也是本文采用的方法。用四元数表示的姿态微分方程如公式 (1):

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & -\omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 q_0, q_1, q_2, q_3 四元数的系数, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 分别是三轴陀螺的测量值减去由于地球自转而产生的额外角速度所对应的矫正角速度。

求解四元数微分方程通常使用四阶 Runge-Kutta 算法实现姿态四元数的更新。该算法利用两组最新的角速率输出计算最新的一组四元数。通过减小步长, 使有限转动接近无限转动, 可以抑制该算法漂移。

由更新的四元数计算出最新的姿态矩阵, 继而可以得到载体的俯仰倾斜角信息。

1.1 姿态的初始化

捷联惯性导航系统在没有加速度的情况下, 安装在载体上的三轴加速度计测量出来的值完全是重力加速度在三个正交轴上的投影。可通过公式 (2)、公式 (3) 计算出载体的俯仰倾斜角 (文献 [4-5]):

$$\theta = \arctan(-G_y / \sqrt{G_x^2 + G_z^2}) \quad (2)$$

$$\gamma_{\pm} = \arctan(-G_x / G_z) \quad (3)$$

其中 θ 是载体的俯仰角, γ 是载体的倾斜角, G_x, G_y, G_z 分别是三轴加速度计测量出来的重力加速度分量。

由于倾斜角的范围为 $-180^\circ \sim +180^\circ$, 而 $\arctan()$ 函数的输出范围为 $-90^\circ \sim +90^\circ$, 所以需要对倾斜角进

行矫正。

当 $G_x < 0$ 时:

$$\gamma = \gamma_{\pm} \quad (4)$$

当 $G_x > 0$ 时:

$$G_x > 0 \text{ 时, } \gamma = \gamma_{\pm} + 180^\circ \quad (5)$$

$$G_x < 0 \text{ 时, } \gamma = \gamma_{\pm} - 180^\circ \quad (6)$$

结合三轴的磁航向仪可以计算出载体的偏航角。磁航向仪通常是利用分布在互相正交的三个轴向的磁强计测量地磁场在三个轴向上的分量, 然后通过转移矩阵计算出载体的偏航角。由于航向仪对俯仰角和倾斜角比较敏感, 需要外部提供俯仰角和倾斜角, 因此可以由上面计算的俯仰角和倾斜角传送给磁航向仪, 再由磁航向仪将偏航角反馈给本系统。这样就可以得到无加速度情况下的偏航角, 俯仰角, 倾斜角, 即姿态的初始值。

1.2 基于陀螺测量值的姿态计算。

姿态矩阵与姿态角的关系:

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \varphi \psi + \gamma \psi \theta & \psi \theta & \gamma \psi - \varphi \psi \theta \\ -\varphi \psi + \gamma \psi \theta & \psi \theta & -\gamma \psi - \varphi \psi \theta \\ -\gamma \theta & \theta & \gamma \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 φ 表示 \sin , ψ 表示 \cos , 记为:

$$C_b^n = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由 1.1 节中计算的姿态初始值代入公式 (9) 得到姿态矩阵的初始值。由四元数与姿态矩阵的关系可计算出四元数的初值:

$$\begin{cases} q_0 = \frac{1}{2} \sqrt{1 + T_{11} + T_{22} + T_{33}} \\ q_1 = \frac{1}{2} \operatorname{sign}(q_0) [\operatorname{sign}(T_{32} - T_{23})] \sqrt{1 + T_{11} - T_{22} - T_{33}} \\ q_2 = \frac{1}{2} \operatorname{sign}(q_0) [\operatorname{sign}(T_{13} - T_{31})] \sqrt{1 - T_{11} + T_{22} - T_{33}} \\ q_3 = \frac{1}{2} \operatorname{sign}(q_0) [\operatorname{sign}(T_{21} - T_{12})] \sqrt{1 - T_{11} - T_{22} + T_{33}} \end{cases} \quad (9)$$

有了四元数的初值以后就可以通过 Runge-kutta 算法对四元数进行不断更新 (具体的计算过程可参考文献 [6] 第七章中的数值积分章节的内容), 同时通过四元数与姿态矩阵的关系更新姿态矩阵^[2], 则姿态角可由下式计算:

$$\begin{cases} \theta = \arcsin(T_{32}) \\ \gamma = \arctan(-\frac{T_{31}}{T_{33}}) \\ \psi = \arctan(\frac{T_{12}}{T_{22}}) \end{cases} \quad (10)$$

2 DSP系统设计

DSP系统包括数据的采集、数据滤波、姿态角计算和上位机输出等部分组成。系统框图如图 1 所示。

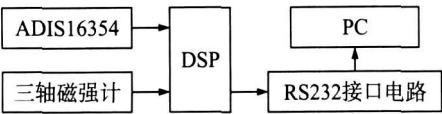


图 1 系统框图

数据采集部分采用 ADIS16354 芯片^[3], 该芯片通过 SPI 接口以数字的方式输出。芯片内置采样率设置和校准模块。为了保证传感器的输出精度, 传感器的初始化配置过程中采用高精度归零对传感器的输出偏移量进行补偿, 整个校准过程耗时 30 s。

本文采用 DSP(TMS320F2812)完成数据的滤波和姿态角解算^[7]。本文通过定时器中断对传感器数据进行定时采样和处理。主程序流程图如图 2 所示。



图 2 流程图

DSP通过 SC 通讯接口与上位机进行通讯, 由上位机程序完成数据的显示、ADIS16354传感器的配置和输出寄存器的读取等功能。

3 测试结果

在完成了系统的硬件调试和软件联调后, 我们对该传感器系统进行了实际测试。

首先进行静态测试。将传感器静止不动放置在调好的转台(第六三四研究所, 3 SK-150型无磁转台, 分辨率 0.02°)上, 测量传感器在静止条件下各输出量的稳定性。由采集到的数据可以得出数据中含有较大的噪声信号, 必须进行滤波处理。将采集到的输出数据在 MATLAB程序上进行数据的功率谱分析和互相关性分析^[8], 可以得出噪声信号是一种类高斯噪声^[9]。由文献[10—11]可知, 用卡尔曼滤波器能够较好的处理这类数据。对传感器系统建

立 AR1 模型, 进行卡尔曼滤波, 经过实际的测试, 能够显著的降低噪声信号。由加速度计在静态条件下测量结果计算的姿态角数据如表 1、表 2(其中角度误差已去除安装误差), 从中可以看出: 输出结果能够稳定在 ±0.1°以内。

表 1 俯仰角的加速度解算结果(倾斜角 20°)

转台角度/(°)	输出俯仰角/(°)	角度误差/(°)
0	-0.873 1	+0.034 1
10	9.070 5	-0.022 3
20	19.065 1	-0.027 7
30	29.182 2	+0.089 4
40	39.019 3	-0.073 5

表 2 倾斜角的加速度解算结果(俯仰角 20°)

转台角度/(°)	输出倾斜角/(°)	角度误差/(°)
0	-0.480 0	-0.009 9
10	9.537 4	-0.027 3
20	19.496 9	+0.013 2
30	29.549 1	-0.039 0
40	39.447 3	+0.062 8

将传感器放置在转台上进行转动实验, 测量传感器在转动条件下的姿态角输出结果(忽略传感器自身的速度)。在对转台上进行单轴 10°, 20°, 30°, 40°转动情况下(转动起始点 0°), 计算得到的输出数据(忽略安装误差, 测量数据如表 3、表 4)与实际的传感器姿态角之间的误差在 ±1°以内, 相对于加速度计在静态点的计算结果(±0.1°误差)有较大的偏差。同时, 计算结果存在静态增量(由测量值的偏移量引起)这使得该传感器难以单独完成精度较高的长时间导航任务。

表 3 俯仰角的陀螺解算结果(倾斜角 20°)

转台角度/(°)	输出俯仰角/(°)	误差/(°)
40	39.208 9	0.791 1
30	29.392 3	0.607 7
20	19.559 4	0.440 6
10	9.818 2	0.181 8

表 4 倾斜角的陀螺解算结果(俯仰角 20°)

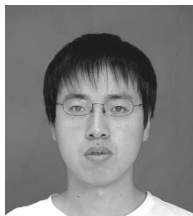
转台角度/(°)	输出俯仰角/(°)	误差/(°)
40	39.210 9	0.789 1
30	29.401 2	0.598 8
20	19.568 7	0.431 3
10	9.821 7	0.178 3

注: 陀螺漂移量校正到 0.02°/s以内

从系统的各个环节分析, 引起误差的因素有以下几个方面①对于卡尔曼滤波, 如果系统初态选择不合适, 或者动态噪声、观测噪声的统计特性与实际情况相差很远, 就有可能导致较大的估计误差, 甚至导致滤波发散^[8]; ②四元数与直余弦矩阵的相互转换精度直接影响惯性导航输出导航参数的精度, 而该过程中存在不对称误差及刻度误差, 漂移误差^[12]; ③四阶 Runge-kutta 算法不是精度最高的一种算法, 相对于四阶泰勒展开法稍差^[13]; ④本文中方案采用的是定时器中断对传感器数据进行采样 (可能会产生传感器内部采样周期和定时器周期不一致的情况, 传感器输出数据时间间隔以内部采样周期为准), 这中间可能存在时间误差, 从而引起四元数计算误差。所以根据以上几点, 可以对系统的改进做进一步研究, 以达到提高系统精度的目的。

4 结论

本文设计的基于 AD Σ 6354 和 DSP 的捷联式姿态角传感器具有结构简单、体积小, 性能可靠。它可以在静态和动态情况下获得优良的性能, 可满足导航与控制、平台控制、机器人等方面的需求, 一定会有广阔的应用前景。



禄坡远 (1984—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生。目前主要从事智能传感器、惯导系统等方面研究;



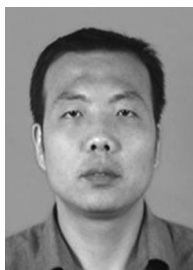
刘昭元 (1980—), 男, 山西繁峙人, 硕士研究生, 研究领域为智能传感器、航向系统;

参考文献:

- [1] 杨友文, 王建华. MEMS 技术现状及应用 [J]. 微纳电子技术, 2003 (3): 29—32
- [2] 谢璘. 小型惯性姿态测量系统研究 [D]. 中国优秀博硕士学位论文全文数据库 (硕士), 2005.
- [3] Analog Devices Corporation. High Precision TriAxis Inertial Sensor AD Σ 6354 [DB], 2008.
- [4] 庞勤. 基于 FPGA 的倾角传感器信号处理 [D]. 西北工业大学研究生学位论文, 2006
- [5] 苏君, 王占平. 基于 MEMS 加速度传感器的倾角仪设计方法 [J]. 实验科学与技术, 2006 112—114.
- [6] 邓正隆. 惯性技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [7] Texas Instruments Corporation. Digital Signal Processors Data Manual [DB], 2009.
- [8] 高强业. 硅微加速度计的特性及应用研究 [D]. 国防科学技术大学研究生学位论文, 2003
- [9] 刘庆云, 李志舜. 高斯白噪声序列谱的统计特性及应用研究 [J]. 声学与电子工程, 2003 (1): 9—11
- [10] 周红进, 许江宁, 刘强. 扩展卡尔曼滤波应用于加速度计特性估计方法研究 (英文) [J]. 传感技术学报, 2008 21 (7): 1286—1289
- [11] 薛亮, 李天志, 等. 基于 MEMS 传感器的微型姿态确定系统研究 [J]. 传感技术学报, 2008 21 (3): 457—456.
- [12] 毛克诚, 孙付平. 捷联惯导系统四元数转换误差分析 [J]. 测绘科学技术学报, 2006 23 (4): 284—286
- [13] 孙冬梅, 田增山, 韩令军. 捷联惯导系统中四元数法求解姿态角仿真 [J]. 模拟弹箭与制导学报, 2009 29 (1): 51—54.



刘诗斌 (1960—), 男, 河南巩义市人, 西北工业大学电子信息学院教授, 博士生导师。长期从事无人机传感器系统的研究, 研究兴趣: 磁场和压力测量, 智能传感器系统, 微电子和计算机应用;



崔智军 (1978—), 男, 汉族, 陕西渭南市人, 硕士研究生, 目前主要从事微电子、数模混合集成电路的研究。