文章编号:1674-7070(2010)04-0302-05

基于 ARM 与 Linux 的姿态角测量系统的研制

郑日荣[1]　周光海[1]

摘要

选取旋转矢量算法作为姿态角测量系统的姿态矩阵更新算法. 针对三子样算法采样周期长的特点,提出了重复使用采样数据的方案以保证系统的实时性. 选取陶瓷静电陀螺仪 CG-L53 为角速率传感器,设计了以 AT89S51 为 MCU 的信号采集板,搭建了以 ARM 芯片为 CPU 的计算机平台,完成了系统各模块的软件设计. 仿真测试结果表明,系统能较稳定地输出姿态角信息.

关键词

姿态测量;旋转矢量算法;三子样算法

中图分类号 TP332

文献标志码 A

0　引言

Introduction

在导航系统中,姿态角包括航向角、俯仰角、横滚角,是用来描述飞行器飞行状态的信息的. 控制器根据姿态角信息,实时发出合适的控制命令,控制飞行器沿一定轨迹飞行. 因此,姿态角测量系统在导航系统中起着举足轻重的作用.

求解姿态矩阵是姿态角测量系统中的关键. 旋转矢量法是工程上常用的姿态矩阵更新方法,它不仅可以降低不可交换性误差,而且可以得到锥运动环境下的优化算法. 因此,系统选取旋转矢量算法为姿态更新算法.

1　姿态矩阵更新算法

Attitude matrix update algorithm

旋转矢量算法是先解算旋转矢量方程,得出姿态变化四元数 $\boldsymbol{q}$,再以 $\boldsymbol{q}$ 为初始值解算出四元数 $\boldsymbol{Q}$. 令 $\boldsymbol{Q} = \lambda + p_1\boldsymbol{i} + p_2\boldsymbol{j} + p_3\boldsymbol{k}$,其中 λ、p_1、p_2、p_3为四元数 $\boldsymbol{Q}$ 的系数,将 $\boldsymbol{Q}$ 的 4 个系数代入

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} \lambda^2 + {p_1}^2 - {p_2}^2 - {p_3}^2 & 2(p_1p_2 - \lambda p_3) & 2(p_1p_3 + \lambda p_2) \\ 2(p_1p_2 + \lambda p_3) & \lambda^2 - {p_1}^2 + {p_2}^2 - {p_3}^2 & 2(p_2p_3 - \lambda p_1) \\ 2(p_1p_3 - \lambda p_2) & 2(p_2p_3 + \lambda p_1) & \lambda^2 - {p_1}^2 - {p_2}^2 + {p_3}^2 \end{bmatrix}, \tag{1}$$

即可解算出姿态矩阵 $\boldsymbol{C}$[1],而 $\boldsymbol{C}$ 包含了所需要测量的姿态角信息.

1.1　旋转矢量算法

在工程实际中,通过安装于载体三轴上的陀螺仪测得的角速度 $\boldsymbol{\omega}$,解算出旋转矢量 $\boldsymbol{\Phi}$,即

$$\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\omega} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\Phi} \times \boldsymbol{\omega}. \tag{2}$$

姿态变化四元数 $\boldsymbol{q}$ 可表示为

$$\boldsymbol{q}(h) = \cos\frac{\Phi}{2} + \frac{\boldsymbol{\Phi}}{\Phi}\sin\frac{\Phi}{2}. \tag{3}$$

其中 $\boldsymbol{\Phi} = [\boldsymbol{\Phi}_X, \boldsymbol{\Phi}_Y, \boldsymbol{\Phi}_Z]^{\mathrm{T}}$,$\Phi = \sqrt{(\boldsymbol{\Phi}_X)^2 + (\boldsymbol{\Phi}_Y)^2 + (\boldsymbol{\Phi}_Z)^2}$. 姿态四元数的更新通过下式完成:

$$\boldsymbol{Q}(t_{k+1}) = \boldsymbol{Q}(t_k) \otimes \boldsymbol{q}(h). \tag{4}$$

其中:$\boldsymbol{Q}(t_k)$ 和 $\boldsymbol{Q}(t_{k+1})$ 分别为上一时刻(t_k) 和当前时刻(t_{k+1}) 的姿

收稿日期 2010-07-04

资助项目 广东省自然科学基金(07300401);广东工业大学博士基金(053042)

作者简介

郑日荣,男,工学博士,副教授,主要研究领域为智能控制与运动控制. lctzrr@163.com

1　广东工业大学　自动化学院,广州,510006

态四元数;$\boldsymbol{q}(h)$ 为$[t_k,t_{k+1}]$时间段内的姿态变化四元数. 令 $\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{Q}(t_{k+1})$ 即可由式(1)解算出姿态矩阵 $\boldsymbol{C}$.

在载体作锥运动时,旋转矢量算法的性能最差. 因此,在锥运动环境下对其进行优化,得到旋转矢量优化算法,则其在其他运动状态下也是最优的[2]. 在本研究中,采用以下的三子样旋转矢量优化算法解算旋转矢量 $\boldsymbol{\Phi}$:

$$\boldsymbol{\Phi}(h)=\Delta\boldsymbol{\theta}_1+\Delta\boldsymbol{\theta}_2+\Delta\boldsymbol{\theta}_3+\frac{33}{80}\Delta\boldsymbol{\theta}_1\times\Delta\boldsymbol{\theta}_3+\frac{57}{80}\Delta\boldsymbol{\theta}_2\times(\Delta\boldsymbol{\theta}_3-\Delta\boldsymbol{\theta}_1). \tag{5}$$

其中:$\Delta\boldsymbol{\theta}_1$、$\Delta\boldsymbol{\theta}_2$、$\Delta\boldsymbol{\theta}_3$分别为$\left[t_k,t_k+\frac{h}{3}\right]$、$\left[t_k+\frac{h}{3},t_k+\frac{2}{3}h\right]$、$\left[t_k+\frac{2}{3}h,t_{k+1}\right]$时间段内的角增量;$h$ 为采样周期.

1.2 算法改进

系统选取 NEC TOKIN 公司的陶瓷静电陀螺仪 CG-L53 为角速率传感器,选取精度为 12 位的 TLC2543 为 A/D 转换器. TLC2543 的转换时间为 10 μs,令其转换一个通道的最小转换时间为 τ,则转换 X、Y、Z 三通道所需时间为 3τ. 若采用三子样的旋转矢量算法,需要完成 3 次 X、Y、Z 循环转换,转换所需时间为 9τ. 因此,三子样旋转矢量算法采样周期 $T=9\tau$.

过长的采样周期影响算法的实时性. 为了保证算法的实时性,同时,又要充分利用优化三子样旋转矢量算法减小不可交换性误差,本文提出了重复使用采样数据的改进方案,即当采样周期 $T=3\tau$,$\Delta\boldsymbol{\theta}_1$、$\Delta\boldsymbol{\theta}_2$、$\Delta\boldsymbol{\theta}_3$分别为$[t_k-2T,t_k-T]$、$[t_k-T,t_k]$、$[t_k,t_k+T]$时间段内的角增量,$\Delta\boldsymbol{\theta}_1$、$\Delta\boldsymbol{\theta}_2$ 为前两周期的采样数据. 这样,既减小了采样周期时间,提高了系统的实时性,又充分利用了三子样算法来减小不可交换性误差,取得了较好的效果.

2 系统硬件设计

System hardware design

姿态测量系统的硬件结构主要由惯性测量(IMU)模块、信号采集(A/D 转换)模块、计算机模块、电源模块等组成(图 1).

IMU 模块是一个角速率传感器模块,由 3 个单

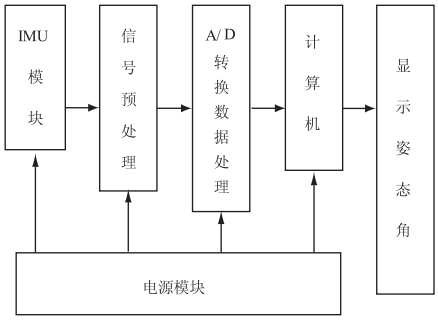


图 1 系统硬件结构框

Fig. 1 Block diagram of system hardware

轴陀螺仪 CG-L53 分别安装在 3 个坐标轴上组成的. CG-L53 具有体积小、质量轻的特点,且只有 4 个引脚,安装方便. 陀螺仪输出信号为电压信号,输出电压经过信号处理,再由信号采集板采集并实现 A/D 转换与数据处理. CG-L53 应用原理如图 2 所示[3].

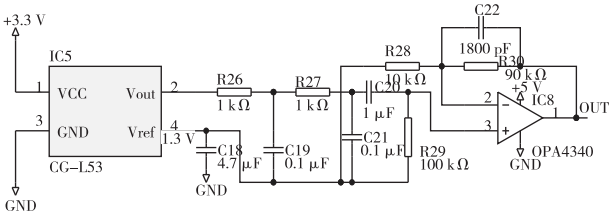


图 2 CG-L53 应用原理

Fig. 2 Circuit diagram of CG-L53 application

信号采集模块的主要作用是采集三轴陀螺仪输出的模拟信号,将模拟信号进行 A/D 转换,并将转换后的数字信号(角速率)通过串口传送给主计算机.

信号采集板的原理主要部分如图 3 所示. A/D 转换芯片 TLC2543C 的主要特点是:11 个转换通道;10 位、12 位、16 位可选的转换精度;10 μs 的 A/D 转换时间.

计算机模块是整个测量系统的核心部分,它在每个控制周期内实时处理采集的数据,完成姿态矩阵更新算法,解算出姿态角信息. 因此,计算机的性能直接影响到整个系统的性能. 选取以 ARM 为 CPU 的 mini2440 开发板作为系统的计算机板,ARM 芯片为三星公司的 S3C2440A,它不仅主频高,而且具有丰富的外围控制接口,为系统扩展和软件系统实时性提供了良好的硬件平台.

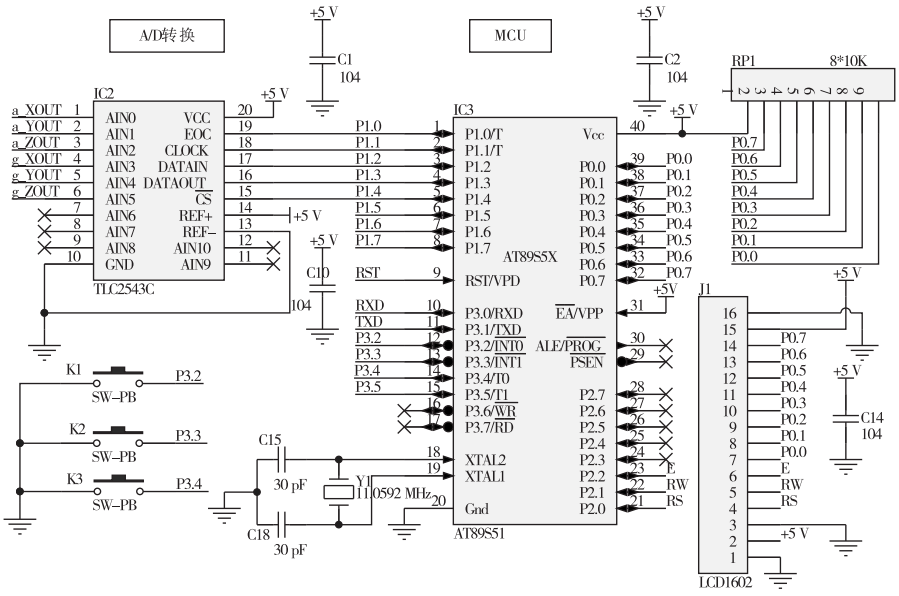


图 3　信号采集板原理

Fig. 3　Circuit schematic of information acquisition board

3　系统软件设计

System software design

软件系统主要由信号采集、串口通信、计算机软件平台和姿态矩阵更新算法实现 4 大模块组成. 信号采集由 AT89S51 控制 A/D 转换器 TLC2543 来完成;利用串口(UART)实现 AT89S51 与 mini2440 的数据通信;计算机上运行 Linux 2.6.29 内核操作系统;姿态矩阵更新算法在 Linux 操作系统上实现. 软件系统的整体结构如图 4 所示.

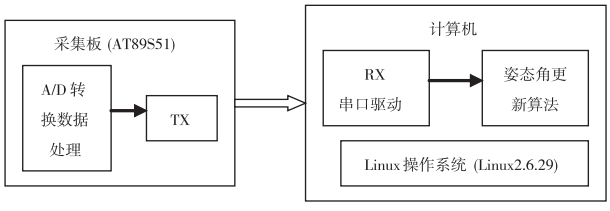


图 4　软件结构框

Fig. 4　Block diagram of software

3.1　姿态信息的获取

信号采集模块的主要作用是利用 AT89S51 控制 TLC2543 实现 A/D 转换及简单数据处理. AT89S51 的 P1.0、P1.1、P1.2、P1.3、P1.4 口分别控制 TLC2543 的 EOC、CLOCK、DATAIN、DATAOUT 和片选引脚 CS. 当选取 12 位转换精度时,根据 TLC2543 的 A/D 转换时序图,画出 TLC2543 转换一个通道的流程如图 5 所示. 发送的控制指令只有 8 位,剩下的 4 个时钟发送的数据无效.

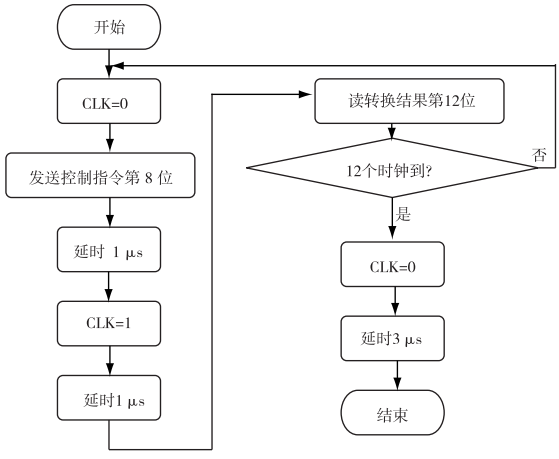


图 5　A/D 转换流程

Fig. 5　Flow chart of A/D conversion

3.2　计算机软件平台的搭建

为了提高系统的实时性,mini2440 上必须运行实时操作系统. 选取 Linux 实时操作系统,将 Linux 2.6.29 内核移植到 mini2440 计算机板上. 因此,正确地移植好 Linux 2.6.29 内核是搭建好计算机软件平台的重点. 移植 Linux 内核主要注意如下几点:

1)晶振频率匹配

修改内核的晶振频率,使内核的晶振频率与实际晶振的频率相等.

2) u-boot 与内核时钟不匹配问题

例如:u-boot 把 S3C2440 的时钟设置为 202 MHz,而内核启动时使用的是 200 MHz,所以修改 uboot 中的 MPLLCON 使时钟保持一致.

3) mach_type 参数的匹配

u-boot 中 mach_type 参数在传给内核的时候,如果与内核的 mach_type 参数不匹配,内核也将无法启动;只有当 u-boot 的 mach_type 与内核的 mach_type 一致,内核才能正常启动.

4) nand 分区表问题

实际的 nandflash 分区表要与内核中定义的分区情况相同,否则内核也无法启动.

3.3 串口通信

通过串口,AT89S51 将 A/D 转换处理后数据(角速率信息)传递给主计算机 mini2440.

以 AT89S51 作为主机 A,实现发送程序;mini2440 作为从机 B,实现接收程序. 为了更准确地实现通信,设计了一个简单的通信协议. 通信协议如下[5]:

1) 主机 A 先发送信号"AA",从机 B 接收到这个信号后,回发"BB";A 收到"BB"后,开始发送数据,每发送一次求一次"校验和";

2) B 接收数据,并将其存储到数据缓冲区 BUF,每接收一个数据,求一次"校验和",当收齐一个数据块之后,再接收 A 机发送过来的"校验和";

3) 将 A 机发送的"校验和"与 B 机求出的"校验和"相比较,若二者相等,说明发送成功,B 机向 A 机发送"00H";否则,B 机回答"0FFH",请求 A 机重发.

单片机串口设置:串口工作在模式 1,即 10 位数据,波特率可调,并且以 T1 作为波特率发生器,T1 工作在模式 2,即自动装载模式.

mini2440 串口设置:Linux 操作系统中已实现了串口的驱动,只要对各串口进行适当的配置,就可以实现串口通信.

串口参数的配置主要包括串口号的选择、波特率的设置、起始位数量、数据位数量、停止位数量和流控协议等. 选择串口 2 作为通信口、波特率配置为 9 600、起始位为 1 bit、数据位为 8 bit、停止位为1 bit,通过设置 struct termios 结构体的各成员值来完成串口的设置.

3.4 姿态算法实现

主程序要完成的任务是接收串口最新数据,求解姿态变化四元数和姿态四元数,解算出姿态矩阵,更新姿态角信息. 因串口接收数据相对时间长,为了能完成较复杂的姿态算法,主程序由两个线程来实现,线程 1 完成数据接收,线程 2 完成姿态算法. 两线程需要共享角速率数据,角速率数据由一个全局变量存储. 两线程对此全局变量的互斥访问,主要通过信号量来实现. 主程序流程如图 6 所示.

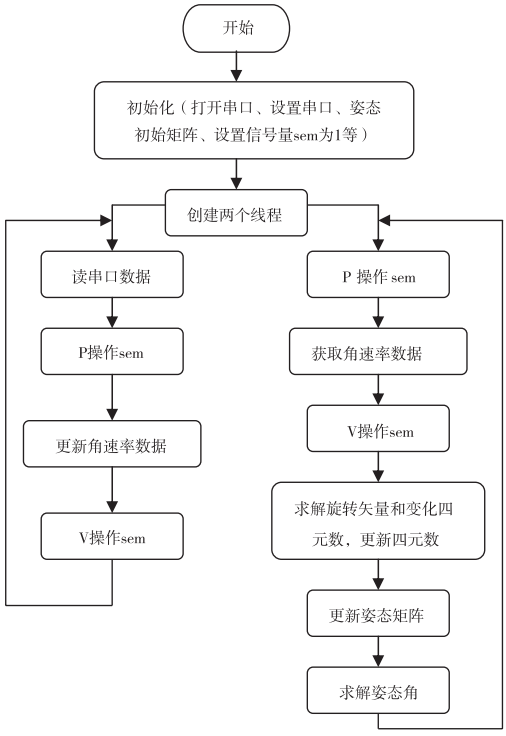


图 6 主程序流程

Fig. 6 Flow chart of main program

4 系统仿真测试

System emulation test

应用 Proteus 软件实现对系统的仿真测试. Proteus 是英国 Labcenter Electronics 公司开发的一款电路仿真软件,它支持许多通用的微控制器,如 AVR、8051 系列、ARM 及 PLD 等,具有单步运行、断点设置等功能,应用方便.

根据前述系统的软硬件设计,在 Proteus 上完成系统硬件原理图的绘制和软件程序的设计. 系统仿真测试如图 7 所示. 通过给定一姿态角初始值,如假设姿态角按正弦函数变化,利用数学反推算法解算出角速率数学模型,其输出作为陀螺仪的输入. 将计算机平台解算出的姿态角信息与给定的姿态角初始值之差,作为系统的误差. 以航向角和俯仰角为例,测试结果如图 8 所示.

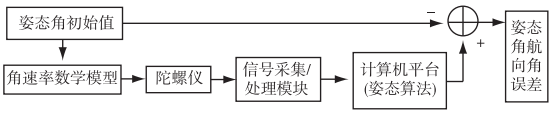
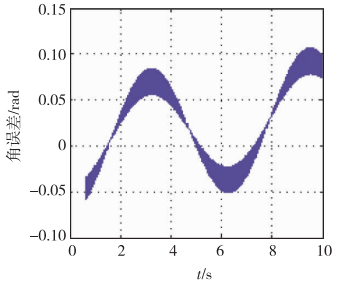
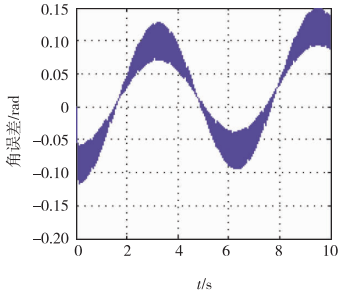


图 7　系统仿真测试框

Fig. 7　Block diagram of system emulation



a.　航向角误差曲线



b.俯仰角误差曲线

图 8　仿真测试误差曲线

Fig. 8　Error curve of system emulation

由图 8 可知,当采样周期为 0.08 s 时,航向角最大误差约为 0.12 rad,最小误差约为 -0.05 rad;俯仰角最大误差约为 0.15 rad,最小误差约为 -0.10 rad. 仿真结果表明,优化的三子样旋转矢量算法能有效地减小不可交换性误差,所设计的姿态角测量系统能输出所需的姿态角信息,达到设计要求.

5　总结

Conclusion

本文分析了旋转矢量算法的基本原理,选取旋转矢量算法为姿态角更新算法. 基于 mini2440 开发板和嵌入式 Linux 操作系统,设计了一姿态角测量系统. 仿真测试结果表明,系统能较稳定地输出误差较小的姿态角,且实时性得到改进.

参考文献

References

[1] 邓正隆. 惯性技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006
DENG Zhenglong. Inertial technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006

[2] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京:科学出版社,2006
QIN Yongyuan. Inertial navigation[M]. Beijing: Science Press, 2006

[3] NEC/TOKIN. NEC TOKIN sensors[Z]. NEC/TOKIN, 2006

[4] 孙琼. 嵌入式 Linux 应用程序开发详解[M]. 北京:人民邮电出版社,2006
SUN Qiong. Details of Embedded-Linux application development [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006

[5] 张俊谟. 单片机中级教程—原理与应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006
ZHANG Junmo. MCU middle course-principle and application [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006

Design of attitude measurement system based on ARM and Linux

ZHENG Rirong[1]　ZHOU Guanghai[1]

1　College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou　510006

Abstract　A rotation vector algorithm is applied as attitude matrix update algorithm in attitude measurement system. To ensure the system's real-time capability, a new method of repeated use of sampling data is proposed, which make up the deficiency of long sampling cycle in three-sample algorithm. The system hardware mainly includes angle rate sensor(ceramic static gyro CG-L53), signal sampling board(based on AT89S51 MCU), and computer platform(based on ARM CPU). Linux is introduced to design software in each model to realize attitude algorithm. Emulation result shows that the system can measure attitude angle stably.

Key words　attitude measurement; rotation vector algorithm; three-sample algorithm