

基于 MEMS 陀螺仪的惯性跟踪装置的设计及算法实现

Design and Algorithmic Implementation for the Inertial Tracking Device Based on MEMS Gyroscope

刘亚,康波 (电子科技大学自动化学院,四川 成都 611731)

Liu Ya,Kang Bo(College of Automation,University Electronic Science Technology of China,Sichuan Chengdou 611731)

摘要 文章针对增强现实环境下对真实物体的三维空间姿态跟踪需要,以新型 MEMS(微机电系统)陀螺仪元件和加速度传感器为基础,构建了一种低功耗、结构紧凑、成本低廉的跟踪装置。本装置以 atmega128 单片机为平台,通过对模拟信号采集、转换,进行卡尔曼滤波和欧拉角算法处理,最终计算出物体的姿态并将其叠加到虚拟空间中,从而达到姿态和位置跟踪的目的。

关键词 微机电系统;加速度传感器;卡尔曼滤波;欧拉角算法

中图分类号:V241.5

文献标识码:B

文章编号:1003-0107(2010)09-0015-03

Abstract: Aiming at the need to the three-dimensional attitude tracking of real objects in the augmented reality environment, this paper builds a low power, compact structure, low-cost tracking device, based on the novel Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) gyroscope and acceleration transducer. Platform-Based on atmega128 microcontroller platform, this device completes the process of the acquisition of the analog signal, conversion, Kalman filtering and Eulerian angle algorithm processing, the final computation of object's attitude and superimposition into the virtual space, which achieves the goal of tracking the pose and position.

Key words: MEMS acceleration transducer; Kalman filtering; Euler angle algorithm

CLC number:V241.5

Document code:B

Article ID:1003-0107(2010)09-0015-03

1 引言

陀螺仪是一种测量绕敏感轴角速度的装置。由于其能够精确地确定物体绕其敏感轴的角速度,并且能够不受重力或者物体移动时所产生的加速度影响,所以常被安装在高速运动的物体,如飞机或者导弹上,用来做导航或者精确定位。而加速度传感器则是一种三轴传感器,它能够感应其三轴方向的加速度的大小,但由于重力加速度的存在,加速度传感器在反应其所跟踪的物体的移动速度和方向的变化时需要给出一个精确的姿态数据以便消除重力的干扰,因此需要和陀螺仪配合使用,两者都以输出电压的形式表现所测量的量的变化。文章主要面对增强现实中对物体实时的姿态跟踪的需要,设计一种易携带的具有无线通信能力和实时性的跟踪装置,能够对被跟踪的物体的姿态和位置进行实时准确的跟踪并使数据得以有效地传输^[1]。

2 系统的硬件设计

考虑到被跟踪物体的运动特性和该装置的安装特点并且能够保证长时间工作,文章设计的该姿态跟踪装置应该满足低功耗、质量小、体积小、具有无线通信的能力,并且能够对外围的一些控制信号进行响应。为了满足以上要求,文章将硬件设计为以下三个模块:(1)信号采集模块;(2)信号传输模块;

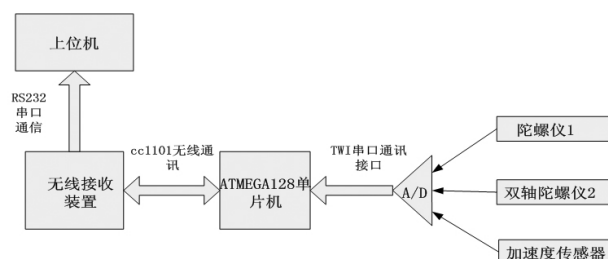


图1 惯性跟踪装置结构框图

(3)信号接收及处理模块。其系统框图如图1所示。

2.1 信号采集模块

为了准确计算出被跟踪物体的姿态和位置,文章需要采集被跟踪物体在固定间隔时间(非常小可以近似为零)的三轴坐标方向的加速度和角速度,并将其传送给单片机并且由单片机进行卡尔曼滤波算法去除存在的误差和噪声,所以文章采用一片三轴加速度传感器 adxl330 来完成对被跟踪物体三轴坐标方向的加速度的采集,使用一片二轴陀螺仪传感器 idg300 和一片单轴陀螺仪 adxrs300 来完成对被跟踪物体三轴坐标方向的角速度的采集。由于 atmega128 的内部 ad 转换器只有 10 位,满足不了高精度 ad 转换的要求,因此文章采用了一片 12 位的 ad7998 模数转换芯片来完成信号的模数转换。

2.2 信号传输模块

在该装置中 atmega128 单片机 [2] 使用其自带的能够兼容 I²C 通讯协议的 twi 端口和 ad7998 进行通讯,然后通过软件滤波后再把处理后的数据通过 cc1100 无线传送芯片传送给上位机。但是由于单片机的 twi 端口最高只能支持 3.3V 的电压,而在 I²C 通讯时上拉电压为 5V,为了能够使其兼容 3.3V 的电气装置,文章使用两个 MOS-FET 管配合一个 3.3V 的上拉电压来对接口的电压进行匹配。图 2 所示为 I²C 传输接口电路图。

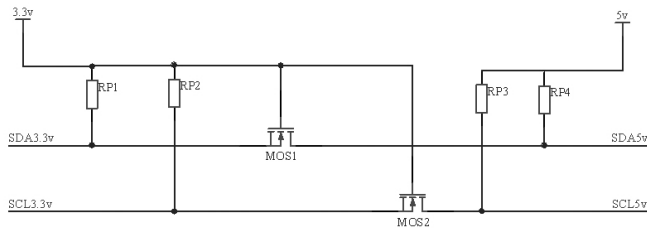


图 2 I²C 传输电平匹配电路图

2.3 信号接收与处理模块

由于最后对被跟踪物体的数据处理的量比较大,要求完成的时间很短,这些超出了单片机的能力,所以该装置最后的数据处理在上位机中完成,上位机由一台 pc 机和一个 cc1100 无线收发平台组成,pc 机和无线收发平台之间通过 rs232 串行接口进行通讯。

3 惯性跟踪装置的软件滤波和惯性跟踪的算法

为了能够更加精确地确定被跟踪物体的姿态和位置,文章采用卡尔曼滤波算法对陀螺仪采集的数据进行滤波和修正,然后使用欧拉角算法根据得出的三个坐标方向的角速度计算出物体实际的姿态,并进行实时更新以达到对物体姿态进行跟踪的目的,最后通过得到的物体姿态矩阵结合三轴加速度传感器测得数据,从而计算出物体的空间位置。

3.1 卡尔曼(Kalman)滤波算法

Kalman 滤波算法是由 R.E.Kalman 首次提出的[3],其本质上是一种加权线性最小方差估计。和以往的滤波器不同,Kalman 是一种直接在时域内设计的滤波器,由于不牵扯频域内的问题,所以 Kalman 滤波适用于对多维随机向量做估计。Kalman 滤波具有连续和离散两种算法。当使用连续算法时,需要先将状态方程和更新方程进行离散化,然后才能在计算机上实现。由于在模数转换过程中 ad 芯片已经对连续的陀螺仪数据进行了离散采样,所以本文直接采用 Kalman 离散滤波算法对陀螺仪单轴所采集的数据进行处理。

首先对物体的单轴方向的角速度进行建模,假设物体 k 时刻的角速度、角加速度、角加加速度、单位采样间隔分别为 ω_k, a_k, j_k, t_0 。

只对物体的角速度进行测量,测量值为 $z_k = \omega_k + v_k$ 。其中,假设 j_k, N_k 为白噪声, $E[j_k] = 0, E[N_k] = q, E[v_k] = 0, E[v_k v_k^T] = R$ 。其中,陀螺仪观测误差 v_k 为高斯白噪声,其方差 $R=1$,系统驱动噪声

j_k 为一个方差可变的噪声,其方差 q 随着被跟踪物体姿态变化的加快变大,反之则变小。

陀螺仪采集的角速度的变化由以下两个方程描述:

$$\omega_k = \omega_{k-1} + a_{k-1} * t, a_k = a_{k-1} + j_{k-1} * t,$$

取 $x_k = \begin{bmatrix} \omega_k \\ a_k \end{bmatrix}$, 则系统的状态方程为 $x_k = \Phi x_{k-1} + \Gamma j_{k-1}$, 式中,

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ t \end{bmatrix}。量测方程为 z_k = H * x_k + v_k, H = [1 \quad 0]。$$

将以上系统的建模代入 Kalman 滤波的滤波计算回路和增益计算回路方程,进行递推就能够对测量值进行滤波,从而得到更加准确的数据。

3.2 欧拉角姿态算法

一个物体在三维空间中的姿态可以用一个基准三维坐标空间和一个相对于该基准坐标空间的 3*3 的转移矩阵来表示。假如基准空间为 c_n , 然后物体实时的姿态变化可以表示为一个实时更新的转移矩阵 c_n^b , 该矩阵的列对应于基准空间的三轴坐标 x, y, z , 该矩阵的行对应于转移后的坐标空间 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$, 其矩阵内部的参数的含义表示为转移后的矩阵的对应的坐标和基准空间坐标的夹角的余弦。可以看出欧拉角算法的核心问题是如何能够有效准确地进行转移矩阵的实时更新。由于任意物体的姿态的变化可以分解为分别绕其三个坐标轴的三次转动,用矩阵 c^x, c^y, c^z 表示,则转移矩阵[4]为:

$$c_n^b = c^x c^y c^z =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi + \sin\phi \sin\theta \cos\psi & \sin\phi \sin\psi + \cos\phi \sin\theta \cos\psi & \cos\theta \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi & \cos\phi \cos\psi + \sin\phi \sin\theta \sin\psi & -\sin\phi \cos\psi + \cos\phi \sin\theta \sin\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix}$$

其中 μ, θ, ϕ 分别表示绕 z, y, x 的旋转角度。

当采样时间间隔很短时,可以认为绕 x, y, z 的三次旋转可以不分次序,并且其数值等于其相对应陀螺仪所测的敏感轴的旋转角度。为了满足实际计算的需要,我们用 c_k 和 c_{k+1} 表示物体经过 k 次和 k+1 次的间隔时间后的旋转后的转移矩阵,可利用以下公式:

$$c_{k+1} = c_k A_k$$

$$A_k = I + \frac{\sin\sigma}{\sigma} [\sigma \ x] + \frac{1 - \cos\sigma}{\sigma^2} [\sigma \ x]^2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$$

$$[\sigma \ x] = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma_z & \sigma_y \\ \sigma_z & 0 & -\sigma_x \\ -\sigma_y & \sigma_x & 0 \end{bmatrix}$$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别表示在间隔时间内 x, y, z 三个方向的陀螺仪所测的转动的角度。

这样,我们把计算 k+1 次转移矩阵变化的任务变成了只需要计算从 k 到 k+1 之间转移矩阵的一次变化的任务,然后通过递推可以实时地更新转移矩阵。

3.3 物体的位置算法

物体的位置是由 adxl330 三轴加速计结合在章节 3.2 中求得的转移矩阵计算出来的。假如物体在三维空间中的位置

坐标为 (x, y, z) 采样间隔为 t 。三轴所测加速度为 a_x, a_y, a_z 物体受到的重力加速度干扰为 g_x, g_y, g_z 。其中 $g_x = g * (c_b^n[2][0])$ 、 $g_y = g * (c_b^n[2][1])$ 、 $g_z = g * (c_b^n[2][2])$ 。

假设物体在基准坐标方向的运动加速度为 $\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$ 速度为 v_x, v_y, v_z ，设 $x1 = (\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z)$ $x2 = (a_x - g_x, a_y - g_y, a_z - g_z)$ ，则 $x1^T = c_b^n * x2^T$ ，利用以下更新公式 $v_{k+1} = v_k + \hat{a}_k * t$ $s_{k+1} = s_k + v_k * t + (1/2) * \hat{a}_k * t^2$ 。其中 s 为基于基准坐标空间 c_n 的某方向轴上的坐标。

4 实验数据结果及分析

文章将该跟踪装置安装在物体上，然后将物体进行一段时间的无规则转动，对该惯性跟踪装置的采样数据进行 Kalman 滤波和分析，采样间隔为 0.1 秒^[5]。图 3 所示为我们对 x 轴进行的 200 个采样图。为了能够明确地比较 Kalman 滤波的结果，我们只对滤波后的 200 个采样中的前 15 个进行绘图。图 4 所示为 Kalman 滤波比较图，其中，虚线代表 Kalman 滤波

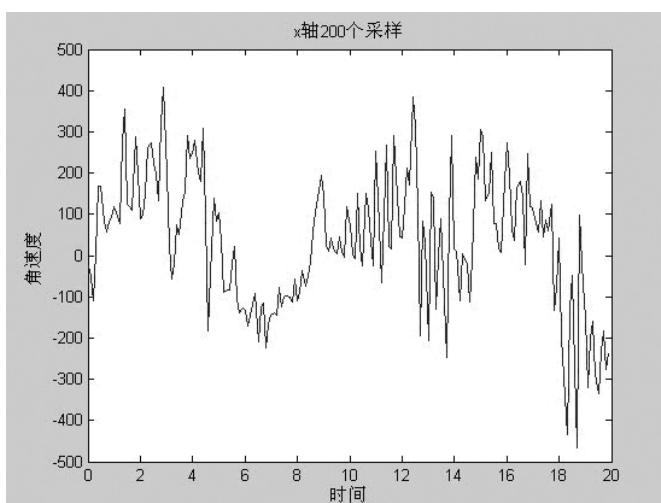


图 3 x 轴的 200 个采样数据图

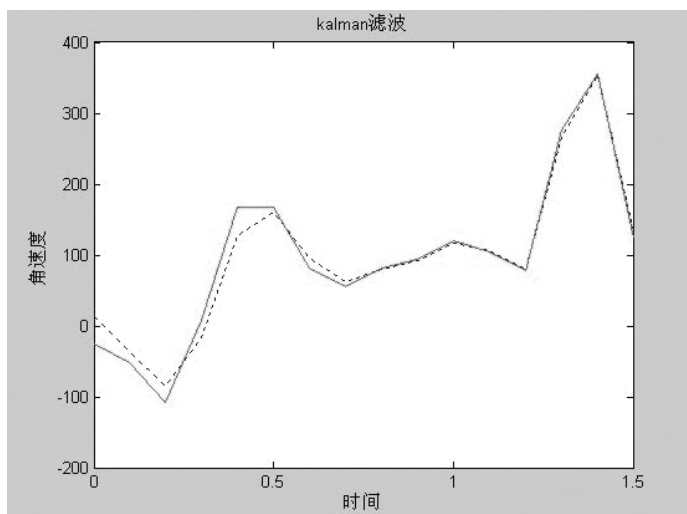


图 4 Kalman 滤波比较图

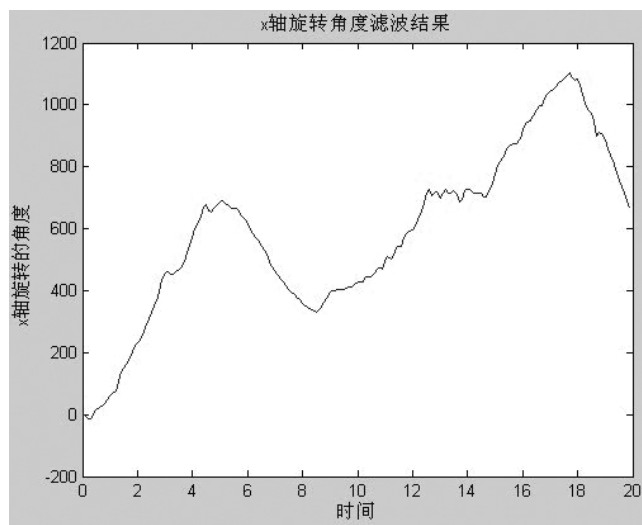


图 5 Kalman 滤波后积分结果图

后的数据，实线代表滤波前的数据。图 5 所示为对滤波后的数据进行积分算法后的结果图。

实验结果表明，该惯性跟踪装置的工作效果符合设计要求，能够有效地跟踪物体姿态的变化。此外，滤波器工作效果理想，有效地去除测量中硬件层面的噪声，提高了跟踪物体的精度。

5 结束语

通过上述的实验和实际测量的比较，文章设计的此套系统可以在短时间内对不规则运动的物体进行精确的跟踪，并且由于对硬件采用模块化设计，可以通过改变该装置中的一些模块，譬如更换一个精度更高的 ad 转换芯片。因此，可以很方便地提高采样精度和采样时间，从而达到提高装置性能的目的。

参考文献：

- [1] David H Titterton. Strapdown Inertial Navigation Technology [J]. Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [2] 金钟夫, 杜刚, 王群. ATmega128 单片机 C 程序设计与实践 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [3] 秦永元. 卡尔曼滤波与组合导航原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [4] 史银雪, 陈洪, 王荣静. 3D 数学基础: 图形与游戏开发 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [5] 刘卫国, 陈昭平, 张颖. MATLAB 程序设计与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.