

# 六轴 MEMS 传感器空间定位设计与实现

董 威

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:**文中主要讲述了基于3轴MEMS陀螺仪,3轴MEMS加速度计空间定位的研究。为了避免环境对定位的影响,文中根据物理原理建立运动模型,结合坐标变换方法,在低功耗无线单片机CC430平台上利用集成了3轴MEMS陀螺仪,3轴MEMS加速度计的芯片MPU60x0设计了一套新的空间定位系统,并采用SimpliciTI协议传输信息。该系统具有高度集成、电路简单、体积小、极低功耗、易扩展、易维护等优点,可以作为基于无线网络定位的辅助手段,改善定位精度,亦可在精度要求相对较低的定位领域应用。

**关键词:**加速度计;陀螺仪;空间定位;极低功耗;位移;轨迹

中图分类号:TP274

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)07-0250-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.07.062

## Design and Implementation of Spatial Localization Based on Six-axis MEMS Sensor

DONG Wei

(College of Telecommunication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Describe the research of spatial localization which is based on the 3-axis MEMS accelerometer and 3-axis MEMS gyro. In order to avoid the influence on positioning accuracy from environment, the motion model is built up based on physical principles. A new spatial localization system is designed combining coordinate transformation method. This system is using the chip MPU60x0 which integrates 3-axis MEMS accelerometer and 3-axis MEMS gyro on low-power wireless microcontroller CC430 platform, and using SimpliciTI protocol to transmit information. This system has the advantages of high integration, simple circuit, small volume, low power consumption, easy to expand and maintain. It can be an additional method for wireless positioning, increasing the accuracy. It also has applied in a environment requires relatively low positioning accuracy.

**Key words:** accelerometer; gyro; space positioning; low power consumption; displacement; orbit

## 0 引言

使用定位技术,可以知道对象在一个参照系的位置。现实生活中,最常使用的定位系统如使用卫星的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)<sup>[1]</sup>或者利用基站收发信台(BTS)为手机提供定位服务。然而,实现室内定位系统仍然存在许多限制,例如GPS定位对卫星信号完全依赖,使得这种技术不能用于建筑物内。另一方面,基站可以用于室内手机的无缝连接来定位,但精度非常小,一般在约100 m到35 km<sup>[2]</sup>。因此,这种局限性使它们无法实现在室内定

位。

当用户需要知道目标在一栋楼的位置,室内定位就变得很重要。如消防队员需要了解自己在建筑物中的位置从而更好的为抢救努力。室内定位的另一种方法是行人航位推算(PDR)<sup>[3-4]</sup>。PDR技术是利用已知位置作为起始位置,通过使用加速度传感器来感知行人的步长,每一步都有一个位移与之相对应,实时估计行人的最新位置。在以往的研究中已经做了一些相关的研究,他们使用一种特殊的传感器模块,使其可以安装在安全帽<sup>[5]</sup>,附着在脚下<sup>[6-7]</sup>,或使用的廉价的

收稿日期:2013-09-16

修回日期:2013-12-23

网络出版时间:2014-04-24

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划项目(2011CB302900);江苏省高校自然科学基金研究重点项目(10KJA510035);南京市科技发展计划重大项目(201103003)

作者简介:董威(1989-),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为无线通信与信号处理;导师:吴蒙,教授,研究方向为无线通信与信号处理技术、无线网络和通信系统的信息安全以及无线通信、移动通信、嵌入式系统。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140424.0818.062.html>

传感器集成在智能手机中,并将其放置到裤兜<sup>[8-10]</sup>。

鉴于此,文中提出了一种新的空间定位系统。该系统基于 MEMS 传感器,通过采集目标在运动过程中产生的加速度和角度信息,通过无线传回网关,在上位机进行信息处理和轨迹计算,摆脱了基于信号强度指示(Received Signal Strength Indicator, RSSI)定位,使外界环境对测量精度没有影响和限制,实现了三维的定位。

## 1 定位系统硬件设计

### 1.1 系统总体结构

该硬件系统设计分为网关节点和传感器节点,利用感知的加速度和角度信息,实现对目标定位,并计算运动轨迹。该硬件系统集成度高,功耗低,易扩展的特点既方便数据传送又可以为后续扩展实现更广的应用奠定基础。

系统总体构架图如图 1 所示。

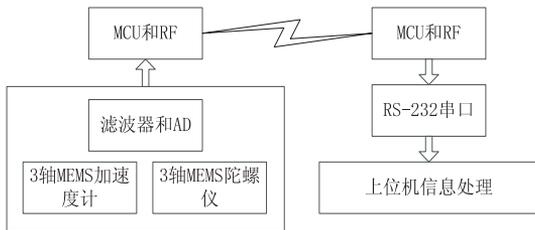


图 1 系统结构图

### 1.2 移动节点

移动节点附着在目标物上,主要实现加速度和角度的信息采集,同时将采集的信息 A/D 转换后发送给网关。为了使节点高度集成,体积小且满足易扩展易维护的特性,该设计选用集成了 3 轴 MEMS 陀螺仪和 3 轴 MEMS 加速度计的芯片 MPU60x0 作为传感器信息采集设备,并选用集成了业界领先的 1 GHz 以下频段的 CC1101RF 收发器的 CC430 处理器<sup>[11-12]</sup>作为 MCU,并集成了针对低射频网络的简单低功耗射频网络协议 SimpliCI TI<sup>[13]</sup>。

低功耗无线传感器节点如图 2 所示。

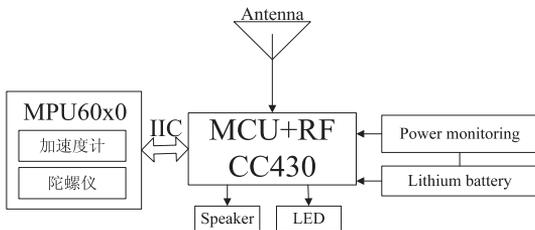


图 2 低功耗无线传感器节点

### 1.3 网关节点

网关节点主要负责接收节点发送过来的信息并上传给上位机做信息处理。该系统以 CC430 为核心,建立一个自组织低功耗无线传感器网络<sup>[14]</sup>上。网关

模块以简单低功耗射频网络协议 SimpliCI TI 作为无线通信协议与其他节点进行组网通信,使得系统更可靠稳定,并且保证网络的复杂度不高<sup>[13]</sup>。上位机通过 RS-232 串口通信电路接收网关上传的数据,然后进行积分、重建等数据计算与处理。

网关节点架构如图 3 所示。

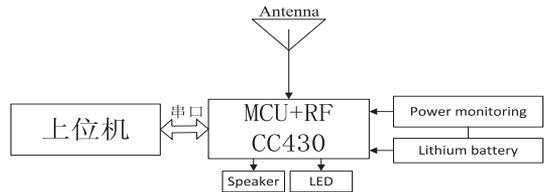


图 3 网关节点架构

## 2 系统软硬件平台

### 2.1 SimpliCI TI 协议

SimpliCI TI 专为多个 TI 射频平台上的简单实施和即开即用部署而设计,是针对低射频网络的简单低功耗射频网络协议<sup>[13]</sup>。这种网络通常包含要求电池寿命长、数据速率小和占空比低的电池供电设备,并具有少量可以直接相互通话或通过接入点或范围扩展器进行通话的节点<sup>[15]</sup>。

该通信协议是一种免费的通讯协议,只占用闪存中的 8 k 字节,适用于无线传感器网络和短距离无线数据通讯。SimpliCI TI 协议包括了网络加入,网络管理,低功耗,无线跳频通讯等功能<sup>[16]</sup>。在使用很少资源情况下,这个小型无线网络协议依然能够支持点对点多路由通信,这种选择方案不仅可使用数据中心和网关来存储并发送消息,还能通过范围扩展设备来扩大网络覆盖范围,以支持四次网络跳转。同时还支持串状网络和多种网络拓扑以及高级网络路由等多种自组织无线传感网络功能<sup>[13]</sup>。

### 2.2 CC430 平台

CC430 是 TI 在 2008 年末发布的 MSP430 家族的一个新的 RF Soc 系列,CC430 集成了 MSP430 的 5 系列的核以及低功耗无线收发器 CC1101<sup>[15]</sup>的核等。因此,基于 CC430 平台的传感器节点相对于其他的芯片具有以下特性与优势:

- (1) 集成了 RF,单芯片集成解决方案体积小;
- (2) 传输速率、调制方式、载频频段都可编程,灵活性高,满足该设计需求;
- (3) 低功耗 RF、简单的 SimpliCI TI 协议栈、易维护;
- (4) 超低功耗。

另外,由于 CC430 工作在 1 GHz 以下,并可以编程改变载频频段,因此相比于 WiFi 和 Zigbee,CC430 的显著优势是无线信号的穿透性强、能够传播得更远。

并且其数据传输速率可编程,适用于该系统对数据传输较少的应用要求。

### 2.3 MPU6050

MPU60x0 是一个集成了 3 轴 MEMS 陀螺仪,3 轴 MEMS 加速度计,可用 I2C 接口扩展一个第三方的数字传感器(如磁力计)的数字传感器。MPU60x0 可实现对陀螺仪和加速度计六轴的 16 位的 ADC 转换。同样,它也有很好的灵活性,传感器的测量范围都是用户可控的,陀螺仪可测范围为 ±250, ±500, ±1 000, ±2 000°/s(dps),加速度计可测范围为 ±2, ±4, ±8, ±16 g。此外它有一个片上 1 024 字节的 FIFO,有助于降低系统功耗。另外,片上还内嵌了一个温度传感器和在工作环境下仅有 ±1% 变动的振荡器。可承受最大 10 000 g 的冲击,并有可编程的低通滤波器。MPU60x0 可支持 VDD 范围 2.5 V±5%, 3.0 V±5%, 或 3.3 V±5%。

## 3 传感器定位实现

### 3.1 航位推算理论依据

航位推算的前提是知道目标的初始位置,并且可以感知目标的实时加速度。假设初始位置在原点,那么只需感知目标的实时加速度。

由于采样数据是离散的,令 MEMS 传感器采样时间间隔为 Δt,迭代后可得:

$$s[n] - s[n - 1] = \frac{v[n - 1] + v[n]}{2} \Delta t = v[n - 1] \Delta t + \frac{a[n - 1] + a[n]}{4} \Delta t^2 (n > 1)$$

其中速度可由下式迭代求得。

$$v[n] - v[n - 1] = \frac{a[n - 1] + a[n]}{2} \Delta t (n > 1)$$

$$\begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma \cos\varphi + \sin\gamma \sin\theta \sin\varphi & \cos\gamma \sin\varphi - \sin\gamma \sin\theta \cos\varphi & -\sin\gamma \cos\theta \\ -\cos\theta \sin\varphi & \cos\theta \cos\varphi & \sin\theta \\ \sin\gamma \cos\varphi + \cos\gamma \sin\theta \sin\varphi & \sin\gamma \cos\varphi - \cos\gamma \sin\theta \cos\varphi & \cos\gamma \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}$$

因此,当传感器节点转动时,系统只需用测得的加速度减去 g 在该轴上的分量,然后再通过迭代运算求得节点在空间中的运动轨迹。

### 3.3 结果

图 4 和图 5 分别为采集到的三轴加速度传感器数据和三轴角度变化数据,通过迭代运算,可以得到目标传感器沿坐标系各个轴的位移和当前的瞬时速度。图 6 为目标传感器沿 Y 轴的计算结果。根据矢量加法,可以由上位机把 3 轴的数据整合,即可得到目标的轨迹。

3 轴 MEMS 传感器可输出节点的三维加速度  $a_x[n]$ 、 $a_y[n]$ 、 $a_z[n]$ ,可以分别计算出节点在 X、Y、Z 轴的瞬时速度和位移,由矢量加法即可求得节点的轨迹。

### 3.2 去除重力方向加速度分量

目标的移动,使得传感器会转动,此时传感器的 X、Y、Z 轴不再与目标物体所在空间坐标 OXYZ 重合,传感器坐标系的 X、Y、Z 轴方向就会有重力加速度 g 的分量。

为解决此问题,系统通过陀螺仪来记录传感器的空间姿态,通过坐标变换计算 g 的分量<sup>[17]</sup>。

设传感器所在坐标系  $OX_1Y_1Z_1$  与空间坐标系 OXYZ 的角度向量  $\omega$  为:  $\omega = \varphi + \theta + \gamma$ ,则沿坐标系  $OX_1Y_1Z_1$  的投影  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$  有如下关系:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \varphi \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \gamma \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -\sin\gamma \cos\theta & \cos\gamma & 0 \\ \sin\theta & 0 & 1 \\ \cos\gamma \cos\theta & \sin\gamma & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \gamma \end{bmatrix}$$

由上式可得:

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \gamma \end{bmatrix} = \frac{1}{\cos\theta} \begin{bmatrix} -\sin\gamma & 0 & \cos\gamma \\ \cos\gamma \sin\theta & 0 & \sin\gamma \cos\theta \\ \sin\gamma \sin\theta & \cos\theta & -\sin\theta \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

式中,  $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$  可以由陀螺仪测得。通过解此欧拉微分方程可求得参数  $\varphi$ 、 $\theta$  和  $\gamma$  的数值。所以 g 在坐标系  $OX_1Y_1Z_1$  的分量  $(g_x, g_y, g_z)$  为:

$X_a/(m/s^2)$	$Y_a/(m/s^2)$	$Z_a/(m/s^2)$
-0.1	1.0	9.4
-0.0	1.7	9.1
-0.4	1.8	9.4
-0.6	1.3	10.5
-0.2	-0.0	9.6

图 4 三轴加速度传感器数据

## 4 结束语

使用该课题设计的平台模块化设计程度高,既可降低系统复杂性,使电路简单,体积小,又可提高扩展

性、同时保证了易维护性和低功耗的特点。

$X_g/(deg/s)$	$Y_g/(deg/s)$	$Z_g/(deg/s)$
-7.5	7.3	-5.8
-7.8	15.4	-10.9
-4.8	-4.2	-11.4
11.7	2.1	-10.9
0.7	-2.3	-8.2

图5 三轴角速度传感器数据

$Y_{a1}: 0.0 m/s^2$	$v: 0.0 m/s$	$S: 0.0 m$
$Y_{a2}: 0.0 m/s^2$	$v: 0.0 m/s$	$S: 0.0 m$
$Y_{a3}: -0.0 m/s^2$	$v: 0.0 m/s$	$S: 0.0 m$
$Y_{a4}: -0.1 m/s^2$	$v: 0.0 m/s$	$S: 0.0 m$
$Y_{a5}: -0.2 m/s^2$	$v: -0.0 m/s$	$S: 0.0 m$
$Y_{a6}: -0.2 m/s^2$	$v: -0.0 m/s$	$S: 0.0 m$
$Y_{a7}: -0.6 m/s^2$	$v: -0.0 m/s$	$S: 0.0 m$
$Y_{a8}: -0.8 m/s^2$	$v: -0.1 m/s$	$S: -0.0 m$
$Y_{a9}: -1.3 m/s^2$	$v: -0.1 m/s$	$S: -0.0 m$
$Y_{a10}: -1.7 m/s^2$	$v: -0.2 m/s$	$S: -0.0 m$
$Y_{a11}: -1.9 m/s^2$	$v: -0.3 m/s$	$S: -0.0 m$
$Y_{a12}: -2.1 m/s^2$	$v: -0.4 m/s$	$S: -0.1 m$
$Y_{a13}: -2.0 m/s^2$	$v: -0.5 m/s$	$S: -0.1 m$

图6 单轴运算结果

基于该设计的定位算法,传感器设备都安装在载体体内,感知的运动信息不依赖外界环境,不易受环境干扰而影响精度,是一种自主式定位系统。该设计基于 MEMS 传感器,可以与其他定位系统结合,辅助定位,如解决单独使用 WiFi 定位<sup>[18-19]</sup>或基站定位过程中存在位置跳跃的情况。此外,在精度要求相对较低的定位领域具有重要的应用价值。

#### 参考文献:

[1] 李天文. GPS 原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2003.

[2] Dulya B. GSM-positioning-outdoorpositioning; technologies, characteristics, and limitations [EB/OL]. [2013-09]. <http://www.ks.uni-freiburg.de/>.

[3] Lei Fang, Antsaklis P J, Montestruque L A, et al. Design of a wireless assisted pedestrian dead reckoning system-the NavMote experience [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(6): 2342-2358.

[4] 许睿,孙永荣,陈武,等.一种基于抗差滤波的行人导航算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(7): 1506-1508.

[5] Beauregard S, Haas H. Pedestrian dead reckoning: a basis for personal positioning [C]//Proceedings of the 3rd workshop on

positioning, navigation and communication. [s. l.]: [s. n.], 2006: 27-35.

[6] Jimenez A R, Seco F, Prieto C, et al. A comparison of Pedestrian Dead-Reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU [C]//Proc of 6th IEEE international symposium on intelligent signal processing. [s. l.]: IEEE, 2009.

[7] Kim J W, Jang H J, Hwang D H, et al. A step, stride and heading determination for the pedestrian navigation system [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2004, 3(1-2): 273-279.

[8] Jin Y, Toh H S, Soh W S, et al. A robust dead-reckoning pedestrian tracking system with low cost sensors [C]//Proc of ninth annual IEEE international conference on pervasive computing and communications. [s. l.]: [s. n.], 2011: 222-230.

[9] Bylemans I, Weyn M, Klepal M. Mobile phone-based displacement estimation for opportunistic localization systems [C]//Proc of third international conference on mobile ubiquitous computing, systems, services and technologies. [s. l.]: [s. n.], 2009.

[10] Ayub S, Zhou X, Honary S, et al. Indoor pedestrian displacement estimation using smart phone inertial sensors [J]. Innovative Computing and Applications, 2012, 4: 35-44.

[11] Texas Instruments. CC430F5137 MSP430 SoC With RF Core (Rev. F) [EB/OL]. (2011-12-14) [2012-12-06]. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc430f5137.html>.

[12] 无线龙. CC430 与无线传感网 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.

[13] TI. SimpliciTI protocol stack [EB/OL]. [2013-09]. <http://www.ti.com.cn/tool/cn/simpliciti>.

[14] 冯颖. 无线传感器网络的移动目标跟踪算法研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2007.

[15] Texas Instruments. CC1101 Low-Power Sub-1 GHz RF Transceiver (Rev. H) [EB/OL]. (2012-10-10) [2012-12-06]. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc1101.html>.

[16] Lu Weijie, Zhang Dequan, Chen Xi, et al. Design of wireless network communication node based on SimpliciTI [C]//Proc of international conference on Internet technology and applications. [s. l.]: [s. n.], 2010: 1-4.

[17] 胡三庆. 基于 MEMS 加速度传感器的空间运动轨迹追踪系统设计及实现 [D]. 武汉:华中科技大学, 2009.

[18] 李文仲, 段朝玉. Zigbee 2007/Pro 协议栈实验与实践 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2010.

[19] 金纯, 罗祖秋, 罗凤, 等. ZigBee 技术基础及案例分析 [M]. 北京:国防重工出版社, 2010.

# 六轴MEMS传感器空间定位设计与实现

作者: 董威, DONG Wei  
作者单位: 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京, 210003  
刊名: 计算机技术与发展   
英文刊名: Computer Technology and Development  
年, 卷(期): 2014(7)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjz201407062.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjz201407062.aspx)