

适用于空间定位的粒子滤波算法研究及实现

雷鑑铭, 黄 迪, 王 真, 邹志革

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 针对传统的移动节点定位方法主要应用在二维平面内的局限性, 提出一种适用于三维空间定位的粒子滤波算法. 考虑到移动节点定位的实时性, 将算法用硬件实现. 针对粒子滤波算法运算量大、并行度低的问题, 对其进行改进, 降低算法的计算复杂度, 采用流水线架构, 使整体运算速度变高, 而且资源消耗较少. 通过 SystemC 进行架构设计, 进一步提高硬件设计的效率. 最后在 FPGA 上完成算法的硬件实现, 实验结果表明改进算法与硬件实现方案有良好的定位精度, 硬件消耗为 6 826 个逻辑单元, 平均执行时间降低了约 1/3.

关键词: 粒子滤波; 移动节点; 三维位置; 流水线; SystemC

中图分类号: TN492

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)06-0008-04

Research and Hardware Implementation of Particle Filter for Spatial Localization

LEI Jian-ming, HUANG Di, WANG Zhen, ZOU Zhi-ge

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: As the traditional node localization method was mainly used for two-dimensional plane node, presented a hardware implementation of particle filter for spatial node localization. For the problem of large amount of computation and low degree of parallelism, optimized particle filter algorithm. Proposed a hardware architecture that made the computing speed higher, and decreased resource consumption. Pipelining architecture was carried out through SystemC language, bringing to further improvement of the design efficiency. The experimental study on FPGA indicated that the proposed particle filters algorithm has good positioning accuracy. Hardware consuming was 6 826 logic cells, and the average execution time was reduced by about 1/3.

Key words: particle filter; mobile nodes; dimensional position; pipelining; SystemC

1 引言

移动节点定位是 WSN 中非常重要的问题. 文献[1]最先提出将粒子滤波算法用于无线传感器网络的定位; 文献[2]进一步提出利用 RSSI(Received Signal Strength Indicator)作为观测信息, 以提高定位精度; 文献[3]对算法各个步骤的并行度进行改进, 使算法实时性更高. 但上述粒子滤波算法只适用于平面二维节点的定位, 实际无线传感器网络节点一般不可能位于绝对的二维平面, 而是空间、水下、坡地等三维场景, 因此, 本文对传统的粒子滤波算法

进行了改进, 使其适用于三维空间移动节点定位^[4].

基于移动节点定位的实时性要求, 我们将粒子滤波算法用硬件实现. 由于硬件设计比软件设计缺少灵活性, 而且贝叶斯滤波的状态转移和观测模型都是针对特定应用的^[5], 因为它们高度依赖于当前的运动状态和部署的节点, 因此使用高层次的硬件描述语言去实现硬件设计是非常必要的. 我们采用硬件描述语言 SystemC 进行硬件设计, SystemC 是系统级建模语言, 它是 C++ 类库, 而且可以做到并行, 用来有效地创建软件算法、硬件结构、SoC 接口和系统级设计的周期精确的模型.

收稿日期: 2013-08-21; 修回日期: 2013-10-17

基金项目: 湖北自然科学基金项目(2010CDB02706)

2 粒子滤波算法原理及改进

粒子滤波是递归的贝叶斯滤波,使用序贯蒙特卡洛方法,这个方法的核心思想是用加权的离散随机采样点表示所需随机变量的后验概率密度.当采样点数目很大时,这些样本点可以非常接近地表征后验概率密度.系统运动模式如下:

$$X_t = f_t(X_{t-1}, U_t) \quad (1)$$

式中, t 表示离散时间, X_t 代表三维的状态向量, f_t 是运动状态函数, U_t 表示三维的噪声向量.

一次完整的粒子滤波更新过程包括粒子采样预测、权值计算、重采样和状态输出几个步骤^[6],如图1所示.

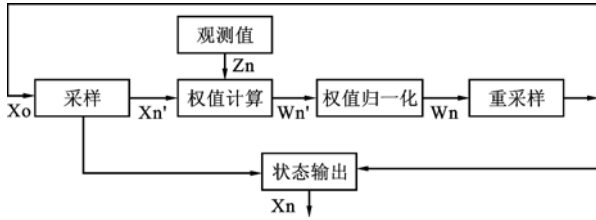


图1 粒子滤波流程图

2.1 采样预测

粒子滤波根据上一时刻的节点位置,使用系统运动模型预测下一时刻的粒子分布,本文主要针对三维空间中的移动网络节点,假设粒子随机移动,没有固定的方向,三个方位的模型都是对称的独立的一维高斯分布模型 x 、 y 和 z . 其中 x 方向模型如下:

$$x_t^{[k]} = f_{t-1}(x_{t-1}^{[k]}, u_{x_t}) \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

式中, $x_t^{[k]}$ 表示 t 时刻 x 方向粒子坐标, u_{x_t} 表示 x 方向的高斯噪声, N 为采样粒子总数. 对于 y 和 z 方向的模型与 x 方向相同.

2.2 权值计算

权值计算的目的是将观测信息融入到每一个粒子的权重中,每个粒子的权值 $w_t^{[k]}$ 是观测信息与预测信息差值的函数,和观测值差值越小的预测值的权值越大.如果采用传统的权值计算方法,对于三维定位,需要增加一个仰角的测量,而且传统的权值计算公式需要指数运算,非常复杂,文献[5]中采用了一种计算量较少的方法.所有 N 个采样粒子的权值表示为

$$W_t = w_t^{[1]}, w_t^{[2]}, w_t^{[3]}, \dots, w_t^{[N]} \quad (3)$$

权值计算公式为

$$w_t^{[k]} = \frac{m}{m + (d_t - d_t^{[k]})^2} \quad (4)$$

权重 $w_t^{[k]}$ 是观测值与预测值差值 $d_t - d_t^{[k]}$ 的函数,其中 $d_t^{[k]}$ 是预测粒子与锚节点的距离, d_t 是观测到的当前节点与锚节点的距离.这种方法省略了传统计算公式中的指数运算, m 取决于距离差值是正还是负, m 的值为

$$m = \begin{cases} m_1, & d_t < d_t^{[k]} \\ m_1 + m_2 d_t^{[k]}, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中,常数 m_1 是考虑到距离测量的噪声, m_2 是考虑到 RF 信号传输过程中多路反射效应的影响.在文献[5]中,取 m_1 为 $2\ 100\ \text{cm}^2$, m_2 为 $160\ \text{cm}$.所有权值计算完成后,需要进行权值归一化.

2.3 重采样

当粒子滤波进行一段时间后,权重会越来越集中到小部分粒子上,而绝大多数粒子的权值非常小,这一现象叫做采样退化,这对于基于统计方法的粒子滤波算法是不能接受的.而最直观的解决办法就是进行重采样,重采样的基本原理就是复制权值大的粒子,抛弃权值小的粒子.本文中,对 SR(Systematic Resampling)算法进行改进,使其具有固定的运算时间,这样粒子滤波算法可以更好的实现流水线.首先计算采样粒子的权值累积和(CSW),重采样函数 v_m 随时间增大,步进参数为 $1/N$.这个函数与权值累积和进行比较,如果累积和大于重采样函数,则复制当前的粒子,如果小于,则累积和继续往后加,当重采样粒子数达到 N 后停止重采样,这样重采样共消耗 N 个时钟周期.以下为改进后的重采样算法流程:

```

cum_pf 权值累加和
初始化 k=1
For i=1:N
    vm(i)=vm(1)+(i-1)/N    vm(1)为随机噪声函数
    If (cum_pf(k)<vm(i))
        k=k+1
    end If
    num(i)=k    按照 k 值来复制粒子,达到 N 个粒子后结束
end For
保留权值较大的粒子 pos_pf=p(num)

```

2.4 状态输出

传统的粒子滤波算法是在权值计算模块就进行输出模块计算,利用所有预测粒子的加权和作为输出,但是计算量较大,本文采用的方法是利用重采样之后的所有粒子位置的平均值作为输出,既降低计算量,同时由于重采样得到的粒子的权值都较大,所

参考文献:

- [1] 刘敏钰,吴咏,武卫国. 无线传感网络(WSN)研究[J]. 微电子学与计算机,2005,22(7):58-61.
- [2] Hu L, Evans D. Localization for mobile sensor networks [C] //Proceedings of 10th International Conference on Mobile Computing and Networking. Philadelphia: Association for Computing Machinery, 2004: 45-57.
- [3] Wang W, Zhu Q. RSS-based monte carlo localisation for mobile sensor networks [J]. IET Communications, 2008, 2(5):673-681.
- [4] Bao Ying, Chen Junfeng, Shi Zhiguo, et al. New real-time resampling algorithm for particle filters [C] // Wireless Communications & Signal Processing. Nanjing,2009:1-5.
- [5] Fross D, Langer J, Fross A, et al. Hardware implementation of a particle filter for location estimation[C] //2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Korea; Busan, 2010: 1-6.
- [6] Adiprawita W, Ahmad A S, Sembiring J, et al. New resampling algorithm for particle filter localization for mobile robot with 3 ultrasonic sonar sensor[C]//Electrical Engineering and Informatics (ICEEI). Bandung, Indonesia,2011:1-6.
- [7] Bolic M, Athalya A, Djuric P M, et al. Generic hardware architecture for sampling and resampling in particle filters [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2005(17):2888-2902.
- [8] Winkler G. Image analysis random fields and dynamic monte carlo methods[M]. Berlin, Heidelberg; Springer-Verlag, 1995.
- [9] 束礼宝,宋克柱,王砚方. 伪随机数发生器的FPGA实现与研究[J]. 电路与系统学报,2003,8(3):121-124.
- [10] He T, Huang C D, Blum B M, et al. Range-free localization schemes for large scale sensor networks[C] //Proceedings of the Ninth Annual International Conference on Mobile Computing and networking. San Diego: Association for Computing Machinery, 2003: 81- 95.
- [11] 洪少华,史治国,陈抗生. 用于纯方位跟踪的简化粒子滤波算法及其硬件实现[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 96-100.

作者简介:

雷鑑铭 男,(1974-),博士,副教授.研究方向为 WBAN 关键技术研究及硬件系统、神经接口及脑机接口关键技术及电路设计、数模混合超大规模集成电路设计及工艺.

(上接第7页)

Cache 中取回的数据来减少 Load 指令对数据 Cache 的访问次数,从而有效降低数据 Cache 的功耗.在 SuperV_EF01 DSP 上的实验结果显示本文方法在处理器性能没有损失的情况下可以平均节省 29.48% 的数据 Cache 功耗.此外,本文方法的硬件实现简单,非常适合于低功耗嵌入式处理器设计.

参考文献:

- [1] Aragon J L, Veidenbaum A V. Optimizing CAM-based instruction cache designs for low-power embedded systems[J]. Journal of Systems Architecture, 2008, 54(12):1155-1163.
- [2] Hasegawa A, Kawasaki I, Yamada K, et al. SH3: high code density, low power[J]. IEEE Micro, 1995, 15(6): 11-19.
- [3] Powell M D, Agarwal A, Vijaykumar T N, et al. Reducing set-associative cache energy via way-prediction and selective direct-mapping[C] // Proceedings of the 34th International Symposium on Microarchitecture, Austin, TX, United States: IEEE Computer Society Press, 2001: 54-65.
- [4] Kin J, Gupta M, Mangione-Smith W H. Filtering memory references to increase energy efficiency[J]. IEEE Transactions on Computers, 2000, 49(1): 1-15.
- [5] 马志强,季振洲,胡铭曾. 基于超窄数据的低功耗数据 Cache 方案[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(5): 775-781.
- [6] Malik A, Moyer B, Cermak D. A low power unified cache architecture providing power and performance flexibility[C] // Proceedings of the 2000 International Symposium on Low Power Electronics and Design. Rapallo, Italy: ACM Press, 2000: 241-243.
- [7] 王琪,高瑛珂,华斯亮,等. 可复用微处理器片上调试功能的设计与实现[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(10): 1369-1374.

作者简介:

李泉泉 男,(1987-),博士研究生.研究方向为嵌入式处理器体系结构、数字集成电路设计与验证.