

# 连通井磁场测距系统中信号处理与传输的研究

张强武, 唐露新

(广东工业大学 信息工程学院, 广州 510006)

**摘要:** 为了克服连通井中高温、高压、强震动等恶劣环境对磁场测距系统的干扰, 减小测量短节与钻头的耦合效应的影响、提高信号传输效率, 实现连通井磁场测距系统的精确定位功能; 文章在硬件上从传感器与 AD 转换芯片选型到信号调理电路等进行匹配设计; 在软件上对比分析 FIR 和 IIR 滤波效果并根据 IIR 精度低的缺点, 提出一种定点数与浮点替换运算、混合编程和优化程序结构的 IIR 优化设计方案; 在上下井信号传输中采用曼切斯特编码通信, 降低干扰、提高传输速率; 仿真表明改进的 IIR 相对原 IIR 数据精度提高了两个百分点, 相对 FIR 滤波时间提高了 19 倍; 在误差允许范围内, 系统采用该方法可以克服干扰得到精确的测量结果, 满足设计要求。

**关键词:** 连通井; 磁测距系统; IIR; 曼切斯特编码

## Research on Signal Processing and Transmission for Connected Well Magnetic Field Ranging System

Zhang Qiangwu, Tang Luxin

(School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In order to eliminate the interference to Magnetic Field Ranging System from harsh conditions such as high temperature, high pressure, and strong vibration and so on, reduce the coupling effect between gauging nipple and drill, increase efficiency of signal transmission, so as to achieve accurate positioning function of Magnetic Field Ranging System in connected wells, the article adopt matching design from the selection of sensor (s) and AD conversion chip to the signal conditioning circuit in the aspects of hardware, while in the aspects of software, compares and analyzes the filtering effect of FIR and IIR and aims at the disadvantage of low accuracy of IIR, then a design has been proposed which adopts substitution operation of fixed-point number and floating-point number, in hybrid programming and with Optimize the program structure. In addition, the Manchester coding has been applied in the under well signal transmission for reduce the interference and improve the transmission rate. The simulation shows that, the improved version of IIR filter increases by two percent in data accuracy when compared with the original one, its speed is 20 times of the FIR. In the range of allowable error, adopts the method, the system can overcome the interference to get accurate measurement result, meet the design requirements.

**Keywords:** connected well; magnetic ranging system; IIR; Manchester encoding

## 0 引言

多分支井作为 21 世纪石油钻井开发的重大技术之一, 可以有效地应用于一些复杂地层的油井开采, 但其发展局限于井眼的对接连通<sup>[1]</sup>。井眼对接技术其关键在于引导系统, 传统采用地磁导向的连续测斜系统和惯性导航的陀螺测斜系统, 难以满足时下连通井导向定位的高精度测量需求<sup>[2-3]</sup>; 国外哈里伯顿、斯伦贝谢研发的新型随钻测量仪器通过对电磁场(或磁场源)的三维测量实现空间距离的磁场引导系统<sup>[4]</sup>—旋转磁场导向定位系统, 可以解决传统测量方法中精度的问题。目前, 该方法在国外已广泛应用于隧道、连通井和多分支井、处理事故井<sup>[5-6]</sup>。国内的胡汉月、宗艳波等人进行了大量研究, 并研制出相关设备<sup>[7-9]</sup>, 但与国外仪器相比其精度还有待提高。测量

精度提高的关键在于磁场测量和信号处理的方法。

新型的旋转磁场导向定位采用毕奥-萨伐尔定律原理, 由磁通门传感器测量远场的磁通量进而求出角度和方位<sup>[10-11]</sup>。在条件恶劣, 磁通量信号小、噪声干扰大的环境下, 信号的有效处理将直接关系到系统测量精度。本课题为了提高测量精度在旋转磁场导向定位系统中, 对采集磁通门信号进行滤波和放大处理, 提高系统测量的准确性; 在上下井通信系统中引入曼切斯特编码提高通信效率, 降低干扰。

## 1 磁测距系统原理

### 1.1 测量原理

连通井旋转磁场导向测距系统由地面系统和井下系统组成, 如图 1 所示。其中, 地面系统包括地面软件与上位机、测井绞车; 井下系统分为磁工装和磁测量装置。磁工装用于产生一个交变磁场源; 磁测量装置用于获取在作业井钻头处的磁场, 测量信号借助测井绞车通过电缆传输到地面进行解码处理; 最后, 传输到上位机进行相关运算处理, 得到距离和角度。

根据毕奥-萨伐尔定律: 假设静态磁偶极子(钻头)位于坐标原点, 建立三维模型, 得到远场  $P(\gamma, \theta, \varphi)$ , 如式(1)。式(1)中  $B$  表示其远场磁感应强度,  $\mu_0$  为磁常数,  $m$  为磁偶极子的磁矩, 为原点  $O$  到点  $P$  的位移矢量, 其距离是  $r$ 。

收稿日期: 2014-05-21; 修回日期: 2014-06-23。

基金项目: 广东省教育部产学研合作专项资金资助(2012B091100056)

作者简介: 张强武(1989-), 男, 研究生, 主要从事计算机控制、嵌入式技术与数字信号处理方向的研究。

唐露新(1958-), 男, 教授, 主要从事测控技术与仪器、微机应用、光机电一体化、交变磁场应用与测量、图像处理及在检测控制中的应用方向的研究。

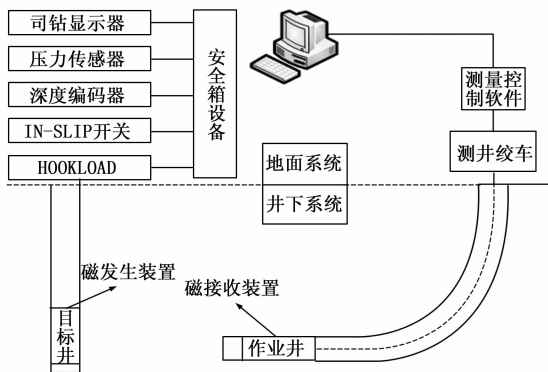


图 1 系统框图

$$B(\mu, r) = \frac{\mu_0}{4\pi R^3} \cdot (3(\vec{m} \cdot \vec{r}) \cdot \vec{m} - r^2) \quad (1)$$

### 1.2 系统建模

在实际钻井过程中，永磁体伴随钻头处于动态旋转状态，产生椭圆极化磁场，系统将构成动态旋转磁偶极子模型。根据探管在目标井中的状态，测量钻头旋转时在远场产生的磁场强度，建立基于钻头为坐标原点的动态测量模型如图 2。由系统模型可知，当  $\omega t = 90^\circ$  且  $\varphi = 90^\circ$  时，此时磁场的感应强度最大，设为  $BT_{\max}$ ，其绝对值为  $|BT_{\max}| = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3}$ 。

当  $\omega t = 0^\circ$  且  $\varphi = 0^\circ$  时，此时磁场的感应强度最小，设为  $BT_{\min}$ ，其绝对值为  $|BT_{\min}| = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} \cdot \sqrt{\frac{5}{2} - \frac{3}{2} \cdot \cos 2\theta}$ 。由  $BT_{\max}$ 、 $BT_{\min}$  和式 (1) 可推导出相对距离  $R$  (式 (2)) 和方位角  $\theta$  (式 (3))。

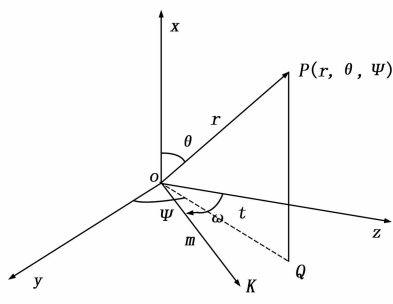


图 2 动态旋转磁偶极子模型

$$R = \sqrt{\frac{3}{4\pi} \frac{\mu_0 m}{|BT_{\min}|}} \quad (2)$$

$$\theta = \cos^{-1} \sqrt{\frac{BT_{\max}^2}{BT_{\min}^2} - 1/3} \quad (3)$$

## 2 数据采集与处理

### 2.1 数据采集

参照磁测距系统模型，建立试验系统装置。首先，模拟磁工装，产生交变磁场。在作业井钻头和螺杆钻具之间安装永磁体短节，南北极垂直于钻头的钻井方向。实验采用步进电机以 492 rad/s 的速度带动永磁体转动产生 1 Hz 中心频率的交变磁场模拟永磁体产生交变磁场。其次，采用磁工装与磁接收装置以 5 m 步长在 0~50 m 范围内进行测量，测量过程中，为了获

取稳定的磁场，在系统模型工作 30 min 之后才正式测量。最后，数据采集利用 3 个正交的 MS-03AR 型高精度磁通门传感器以  $F_s = 200$  Hz 的采样频率获取 X、Y、Z 三轴磁通量，并将采集到的模拟信号用 24 位 A/D (分辨率为 0.1 nT) 进行转换，经过截止频率分别为 4 Hz 和 6 Hz 的低通滤波器进行处理，接着结合硬件放大缓存到单片机中，在距离 30 m 采集 12 540 组数据根据  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$  三轴采集数据，信号频谱范围在 0~100 Hz，如图 3 所示。

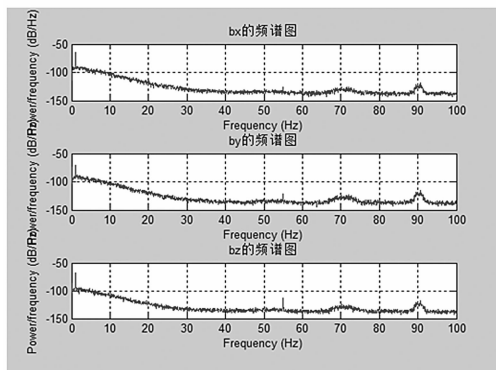


图 3 采集信号频谱分析

### 2.2 数字信号处理

数字滤波分为 FIR 和 IIR。其中，FIR 采用非递归结构，设计比较灵活，可得到严格的线性相位，从理论到实际都是稳定的；而 IIR 要求采用递归结构，设计有一定的局限、难以得到线性相位，递归结构在运算中也可能因为四舍五入产生震荡，实际使用可以通过提高计算中数据精度来避免震荡。

数学形式上，直接型 FIR 的单位冲激响应  $h(n)$  为一个长度为  $N$  的序列，对采集点进行滤波等价于卷积运算。利用 Matlab 的 FDAtool 工具，选取等纹波方式，根据磁工装产生旋转磁场的频率设置采样频率  $F_s$  为 200 Hz、带宽为 1.7 Hz、通带内允许的最大衰减  $A_{\text{pass}}$  为 0.1 db，阻带内允许最小衰减  $A_{\text{stop1}}$ 、 $A_{\text{stop2}}$  为 80 db，设计得到阶数为 1 110 的 FIR 滤波器。基于 FreescaleWarrior 平台，设置仿真频率为 92.16 MHz 进行仿真。结果显示，滤波结果可以精确到  $10^{-7}$  (double 为 16 位导致)，每采集一点进行一次滤波大约为 24.5 ms。实现过程中由于需要保持 1 110 个数据点用于计算，大大的增加了内存的消耗，每一个点滤波大约要计算 3 300 次浮点乘法和加法导致了运算时间加剧。

在相同技术指标下，利用 Matlab 的 FDAtool 工具进行设计，选取椭圆形 (Elliptic) 方式，设置采样频率  $F_s$  为 200 Hz，定义下阻带和上阻带截止频率  $F_{\text{stop1}}$  为 0.4 Hz、1.8 Hz，通带下限和上限截止频率  $F_{\text{pass1}}$  为 0.8 Hz、1.2 Hz，通带内允许的最大衰减  $A_{\text{pass}}$  为 0.1 db，阻带内允许的最小衰减  $A_{\text{stop1}}$ 、 $A_{\text{stop2}}$  为 80 db。得到 IIR 为 10 阶，分为 5 级级联。相对 FIR，IIR 由于阶数减小，大大减小了存储单元和运算次数，降低硬件要求。在相同测试条件下进行仿真，结果表明采集一点并进行滤波保存的时间大约为 3.1 ms (平均时间)，与 Matlab 滤波结果对比可知，精确到  $10^{-5}$ 。

### 2.3 滤波器优化

FIR 滤波器由于结构决定其阶数过长、无法减少，导致滤波耗时过长、难以优化；IIR 滤波器其精度降低是由于在浮点数运算中，涉及到 3 个浮点数相乘 (差分方程)，导致滤波后

只能精确到  $10^{-5}$ , 降低了测量的精度 (24 位 AD 精确到  $10^{-7}$ ), 连续采集也可能因为精度的丢失导致震荡。设计引用定点整数代替浮点数运算消除中间过程带来的精度丢失, 可以从根源上避免震荡的产生, 提高了系统的可靠性。

优化设计直接将采集的 AD 量代替浮点数进行定点运算, 其优点有: 1) 省去了 AD 转化的数字信号向浮点数转化的过程, 避免了由于转化带来的精度丢失; 2) 嵌入式硬件系统内部虽可直接完成浮点运算, 但结构相对定点运算较为复杂、计算耗时大。

优化过程中, 直接将采集到 24 位数字信号、增益  $G$ 、系数  $A_n$  和  $B_n$  进行定点处理。在乘法过程中, 将乘积保存为 64 位; 在 3 个数 64 的加法过程中由于会产生 2 位进位, 计算结果采用双符号位进行判断, 并将最终和保存为 64 位。得到 64 位数据与 32 位相乘后, 再进行右移, 以防止中间精度丢失。为了进一步降低运算时间方便定点运算, 滤波器中的乘积部分改用汇编指令实现。在相同环境仿真, 导出实验数据进行频谱分析, 结果如图 4 所示。仿真中, 一个点的滤波时间大约为 1.2 ms (12 540 组数据平均值), 结果可精确到  $10^{-7}$  (Matlab 运算对比)。由于采用 24 位 A/D 采样, 其分辨率为  $1/2^{24}$ 。因此, 改进后的 IIR 滤波器在精度和时间上都得到了改善。

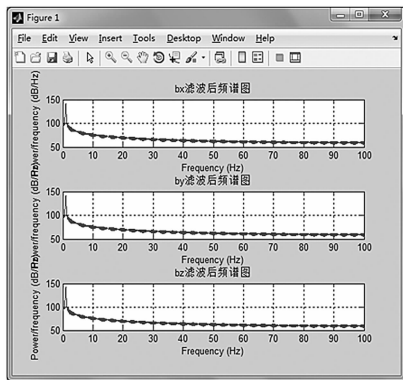


图 4 改进的 IIR 滤波器滤波的频谱图

### 3 井下信号的传输

测量中, 经编码处理后的数据从地层信道传输到地面时, 因为磁工装短节与钻头附近的耦合效应, 可能会致使中心频率以外其它信号的占空比发生变化, 从而导致信号产生畸变。设计通过单芯电缆采用曼切斯特编码方式进行传输, 其编码信号频率在一定范围内占空比受到的影响较小。根据曼切斯特编码上升沿和下降沿编码的特性, 系统自身即可获取信号的时钟信息、避免了添加其它冗余信息, 从而提高了系统的传输效率。传输协议采用 1553 协议, 其命令如表 1 所示, 主要包括交直流采集、状态设置、状态查询、通讯握手和停止采集等命令。下位机数据上传格式, 采用数据帧长度、数据包、帧校验的形式, 其中数据包包含交直流、状态查询、状态等。

数字滤波后的数据, 经以 HD6408 为核心的编码电路编码后加载至总线以及从总线上解调出曼彻斯特码的电路如图 5 所示。虚线左边的电路用于将 HD6408 编解码芯片产生的编码信号 BZO 加载至总线 LINE; 右边电路由两个带通滤波器组成, 用于从总线 LINE 上解调出曼切斯特码信号 UDI, 送入 HD6408 进行解码操作。

表 1 下传命令与上传数据格式

地址位	命令位	说明	下位机数据响应
0x03	0x04	直流量采集	直接回复直流数据
0x03	0x05	交流量采集	直接回复交流数据
0x03	0x06	状态设置	设置完成返回 F0 08
0x03	0x07	状态查询	回复状态数据包
0x03	0x08	通讯握手	成功: F0 08 否则: F0 FF
0x03	0xed	停止采集	成功: F0 08 否则: F0 FF

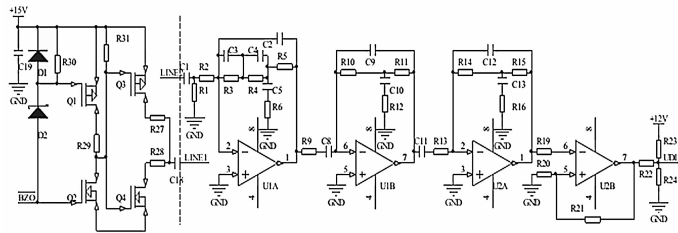


图 5 编码信号加载和解调电路

### 4 实验结果与分析

上述数据使用不同数字滤波器, 可以得到平均时间、滤波后数据精度、计算的角度和距离, 如表 2 所示。表中平均时间是在 92.16 MHz 仿真条件下, 计算 12 540 组数据得到的平均值; 滤波后的数据精度是以 Matlab 的处理数据为准进行对比。

表 2 实验结果分析

滤波器	实际值	无滤波器	FIR	IIR	改进型 IIR
平均时间/ms	—	—	24.5	3.1	1.2
滤波后数据精度	—	—	$10^{-7}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$
距离/m	30	27.0608	30.2548	30.4714	30.3058
角度/ $^{\circ}$	40	21.4560	45.0042	44.7603	43.7160
距离相对误差/(%)	—	9.80	0.85	1.57	1.02
角度相对误差/(%)	—	46.36	12.51	11.90	9.29

由表 2 可知, 在采用高精度传感器和高分辨率 AD 转换电路进行采集获得高精度数据的基础上, 结合硬件两级滤波放大电路, 在软件上设计 FIR 和 IIR 两种滤波器进行对比。结果显示没有滤波器计算的角度和距离相对误差大, 不满足设计角度和距离的精度要求; IIR 相对 FIR 减小了滤波器阶数和系统内存的消耗、降低了硬件要求, 处理时间提高了 21.4 ms, 角度相对误差提高了 0.61%, 但数据精度下降了两个百分点、距离相对误差降低了 0.72%。结合相同指标下两种滤波器的结构特点、数据处理时间和处理后的精度, 提出了一种 IIR 改进方案。经实验仿真, 改进的 IIR 在原基础上处理时间可缩短 61.29%、数据精度可提高到  $10^{-7}$ ; 与 FIR 对比, 虽然距离相对误差增加了 0.17%, 但是角度相对误差提高了 3.22%且滤波时间是 FIR 的 1/20, 在精度、时间和可靠性误差允许范围内, 完全满足旋转磁场导向定位系统高精度和高速的要求。最后, 探讨了井下信号采用基于曼切斯特编码传输方案, 地面实验验证在 24K 的通信下, 可以正常通信。

#### 参考文献:

[1] 沈忠厚, 王瑞和. 现代石油钻井技术 50 年进展和发展趋势 [J]. 石油钻采工艺, 2003, 25 (5): 1-6.  
 [2] Macmillan S, McKay A, Grindrod S. Confidence Limits Associated with Values of the Earth's Magnetic Field Used for Directional

Drilling [J]. SPE Drilling & Completion, 2009, 25 (2): 230-238.

[3] Pech E, Mintchev M P. Observability Analysis for INS Alignment in Horizontal Drilling [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56 (5): 1935-1945.

[4] 王德桂, 高德利. 管柱形磁源空间磁场矢量引导系统研究 [J]. 石油学报, 2008, 29 (4): 608-611.

[5] Kylingstad A, Halsey G W. Magnetic ranging tool accurately guides replacement well [J]. Oil and Gas Journal, 1992, 90 (51): 96-99.

[6] Tarr B A, Kuckes A F, Ac M V. Use of new ranging tool to position a vertical well adjacent to a horizontal well [J]. SPE Drilling Engineering, 1992, 7 (2): 93-99.

[7] 胡汉月, 陈庆寿. RMRS 在水平井钻进中靶作业中的应用 [J]. 地质与勘探, 2008, 44 (6): 90-93.

[8] 马军亮, 段哲民, 蒋书利. 随钻测井仪器的数据采集和控制系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (5): 890-892.

[9] 宗艳波. 旋转磁场定向测距随钻测量仪的研制与试验 [J]. 石油钻探技术, 2012, 40 (5): 110-114.

[10] Kuckes A F. Rotating magnet for distance and direction measurements from a first borehole to a second borehole [P]. US, 5589775. 1996-11-31.

[11] Eugene Paperno, Ichiro Sasada, Eduard Leonovich. A New Method for Magnetic Position and Orientation Tracking [J]. IEEE Transaction on magnetices, 2001, 37 (4): 1938-1940.

(上接第 178 页)

表 3 列出了单个手指触摸和两个手指触摸的指尖滑动过程 3 个摄像机的图像处理算法每帧图像的平均耗时, 并与未使用指尖跟踪算法的平均耗时进行比较。指尖滑动过程共有 100 帧图像。

表 3 指尖检测过程平均耗时统计 (单位:毫秒)

摄像机	未使用指尖跟踪平均耗时	单个手指触摸平均耗时	两个手指触摸平均耗时
水平摄像机 1	118.76	20.85	42.75
水平摄像机 2	117.94	20.58	41.63
垂直摄像机	457.37	22.68	45.75
总耗时	694.07	64.11	130.13

由表 3 可知, 由于垂直摄像机采集的图像分辨率较高, 因此在未使用指尖跟踪算法时, 垂直摄像机的图像处理算法耗时较长, 约为水平摄像机的 4 倍。在使用本文提出的卡尔曼滤波器指尖跟踪算法时, 系统在指尖跟踪过程中仅对固定边长的矩形 ROI 区域进行处理, 因此垂直摄像机的图像处理算法耗时与水平摄像机耗时相近, 且 3 台摄像机算法总耗时远小于未使用指尖跟踪算法的耗时。系统算法的总耗时与跟踪的指尖数量相关, 跟踪指尖数量越多, 划出的 ROI 区域也越多, 算法的耗时也随之成倍增加。系统在单个手指滑动过程中每秒能提取约 15 次指尖坐标, 在两个手指滑动过程中每秒能提取约 8 次指尖坐标, 基本能达到实时的要求。但系统提取指尖的平均耗时超出了摄像头的帧间间隔时间, 在摄像头的图像视频处理中偶尔会出现丢帧的情况。

### 5 总结

文中设计了一种基于多目视觉技术的光学触摸屏系统, 并提出基于卡尔曼滤波器的指尖跟踪算法, 通过卡尔曼滤波器预测指尖位置并在图像中划出 ROI 区域, 有效减少图像处理时间, 提高指尖坐标精度。实验证明, 该系统能实时运行在嵌入式平台, 并可实现较高的点击成功率, 这对于实现基于计算机视觉的触摸屏技术有着重要的研究意义。在以后的工作中将进一步的改进与完善指尖定位和跟踪算法, 以提高算法的实时性和鲁棒性。

### 参考文献:

[1] 王小林, 胡晓婷. 触摸屏在嵌入式系统中的应用 [J]. 计算机与数字工程, 2006, 34 (4): 139-142.

[2] 陈俊彦, 张红梅. 基于 LPC1114 的电阻式触摸屏与步进电机控制系统开发 [J]. 桂林电子科技大学学报, 2012, 32 (4): 281-284.

[3] 江秀红, 段海富, 曹 阳, 等. 电阻式触摸屏多点校准及触摸压力测试研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (8): 2278-2280.

[4] 金连文, 徐 睿, 杨端端, 等. 手指书写: 一种虚拟文字识别人机交互新方法 [J]. 电子学报, 2007, 35 (3): 396-401.

[5] Ahsanullah, Ahmad Kamil B. Mahmood, Suziah Sulaiman, etc. Research design for evaluation of finger input properties on multi-touch screen [A]. 2011 International Conf. Information and Communication Technologies (ICICT) [C]. 2011: 1-6.

[6] 向守兵, 苏光大, 任小龙, 等. 实时手指交互系统的嵌入式实现 [J]. 光学精密工程, 2011, 19 (8): 1911-1920.

[7] 徐一华, 李善青, 贾云得. 一种基于视觉的手指屏幕交互方法 [J]. 电子学报, 2007, 35 (11): 2236-2240.

[8] Jorg Edelmann, Peter Gerjets, Philipp Mock, etc. Face2Face-A system for multi-touch collaboration with telepresence [A]. 2012 IEEE International Conf. Emerging Signal Processing Applications (ESPA) [C]. 2012: 159-162.

[9] 吕俊宏, 任仡奕, 谢 翔, 等. 基于双目视觉的低复杂度高精度手势提取算法 [J]. 微电子学与计算机, 2014, 31 (1): 120-123.

[10] 尹文生, 罗瑜林, 李世其. 基于 OpenCV 的摄像机标定 [J]. 计算机工程与设计, 2007, 28 (1): 197-199.

[11] 覃文军, 杨石柱, 宋相满, 等. 融合 GVF Snake 与肤色模型的手势轮廓提取方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34 (6): 1405-1408.

[12] 李博男, 林 凡. 基于曲率的指尖检测方法 [J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44 (4): 587-591.

[13] 黄 菁. 基于单目视觉的触摸屏技术研究 [D]. 杭州: 浙江工商大学, 2009.

[14] 李文生, 解 梅, 邓春健. 基于机器视觉的动态多点手势识别方法 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33 (5): 1988-1992.

[15] 郭康德, 张明敏, 孙 超等. 基于视觉技术的三维指尖跟踪算法 [J]. 计算机研究与发展, 2010, 47 (6): 1013-1019.

[16] Qu X M. Robust Kalman track fusion in target tracking with uncertainties [A]. 2011 International Conf. Computational Problem-Solving (ICCP 2011) [C]. Chengdu, China, 2011: 1-4.