

# 引航员登离船人体姿态算法研究与实现

李先瑞<sup>2</sup>,倪文军<sup>1</sup>,栗克国<sup>1</sup>

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所,天津 300000;2. 天津水运工程勘察设计院,天津 300456)

**摘要:** 在引航员登离船过程中,单一采取加速度阈值判断方法不能完全表征引航员登离船过程上升下降的信息,导致对登离船信息造成误判.为此,提出一种基于人体姿态的双重信号滤波的引航员登离船监测算法.采集姿态传感器节点引航员姿态数据,进行卡尔曼滤波滤除部分测量噪声,估计出人体姿态状态;构造软件数字低通滤波器滤除重力加速度的影响;构建 FIR 滤波器滤除所需线性加速度中的噪声,并检测引航员登离船过程中的姿态信息;最终与攀爬防护装置进行联动配合实现.实验结果表明:该检测方法实现了引航员登离船姿态判断,降低了姿态判断的误操作率,能够较好地区分其他误动作.

**关键词:** 姿态判断;引航员;登离船;滤波

**中图分类号:** TP181

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2019)11-2292-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.11.008

## Research and Implementation on Human Posture Algorithm of Pilot Boarding

LI Xian-rui<sup>2</sup>, NI Wen-jun<sup>1</sup>, LI Ke-guo<sup>1</sup>

(1. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300000, China;

2. Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** During the pilot's departure from the ship, the information of the ascending and descending of the pilot's departure from the ship could not fully rely on the single acceleration threshold judgement method, resulting in a erroneous judgement of the information. For this reason, a dual signal filtering algorithm based on human posture had been proposed to monitor the departure ship. The attitude sensor equipments had been collected for the attitude data, and the Kalman filter has been used to filter out the noise, estimating the posture state of the human body. A software digital low pass filter had been constructed to filter the influence of gravity acceleration. Then the FIR filter had been constructed to filter the noise in the linear acceleration, and had detected the attitude information during the pilot's departure, and Realization of Linkage with Safety Climbing Protective Device. The experimental results show the detection method realizes the attitude judgment of pilot boarding ship and reduces the incorrect operation rate, being better divided into other incorrect behavior.

**Key words:** posture judgment; pilot; boarding; filtering

### 1 引言

人体姿态检测是指在人体运动过程中,通过检测和记录不同姿态的信息对姿态进行描述和解析,最终实现人体某些部位的监测功能<sup>[1]</sup>.人体的行为分析和运动姿态监测在具有广泛的价值,可应用于运动员训练管理、非正常行为检测与报警、非可视环境下人体行为理解以及交互式虚拟现实等领域有着广泛的应用.

传统的方法是对加速度计测量数据低通滤波,该

方法有效抑制了振动噪声,但是忽略了运动产生的加速度对姿态解算的影响.文献[2]提出了专家系统判断载体运动状态,降低了运动加速度对姿态解算精度的影响,但对于持续运动的载体会抑制加速度的修正作用,导致姿态解算误差的积累和发散.文献[3]采用自适应 FLP(Low Pass Filter)滤波,提高动态降噪效果,但是忽略了波动性强的机械噪声对姿态解算的影响.文献[4]利用加速度计、磁力计测量得到的场量变化,基于梯度下降算法,修正角速度测量姿态.该方法通用性

强,但计算复杂度较高,数据量大,难以满足在线检测的要求.引航员登离船过程中由于环境复杂性及海上风浪的不确定性,需要一种轻便性、智能化、实用性的防坠落保护装置和姿态监控装置.

为实现引航员登离船过程中人体姿态上升下降的识别和监控,本文介绍一种融合卡尔曼滤波、数字电路滤波和 FIR (Finite Impulse Response) 滤波的三重信号滤波处理算法,可实现引航员登离船过程中人体姿态判断,并配合本项目研制的攀爬防护装置,实现引航员攀爬软梯过程中姿态的识别及攀爬软梯阶数的判断,从而实现自动跟随功能及坠落防护功能.

## 2 传感器节点信息卡尔曼滤波处理

为实现引航员攀爬过程中人体姿态监测,需采集人体相应的加速度、角速度以及角度.加速度采集需要配置相应加速度传感器节点,该节点能够实时采集人体运动时的三轴加速度与运动时刻的姿态变化情况,本次研究通过 I2C (Inter-Integrated Circuit) 总线读取 MPU (Micro Processor Unit) 6050 芯片中三轴的加速度值,但由于 MPU6050 芯片提供的数据夹杂有较严重的噪音,在芯片处理静止状态时数据摆动都可能超过 2% 且数据还会有偏移的现象,因此要先对数据偏移进行校准,并通过滤波算法消除噪声<sup>[5,6]</sup>.

本次研究采用卡尔曼滤波进行噪声滤除<sup>[7]</sup>,通过  $k-1$  时刻的系统状态为  $\hat{x}_{k-1}$ ,乘以系统参数  $A$ , $k-1$  时刻对系统的控制量为  $\mu_{k-1}$ ,乘以系统参数  $B$ ,获得  $k$  时刻的系统状态为  $\hat{x}_k$ :

$$\hat{x}_k = A \hat{x}_{k-1} + B \mu_{k-1} \quad (1)$$

通过第  $k-1$  次的误差协方差  $P_{k-1}$ ,左乘系统参数  $A$ ,右乘系统参数  $A$  的转置  $A^T$ ,原始估计中的每个状态变量更新到新的状态后,仍然服从高斯分布.我们可以说  $\hat{x}_{k-1}$  的每个状态变量移动到了一个新的服从高斯分布的区域,协方差为  $Q$ ,则能够预测出第  $k$  次新的误差协方差  $P_k$ :

$$P_k = A P_{k-1} A^T + Q \quad (2)$$

通过式(1)和式(2)可知:新的系统状态的最优估计是根据上一最优估计预测得到的,并加上已知外部控制量的修正;而新的不确定性由上一不确定性预测得到,并加上外部环境的干扰<sup>[8,9]</sup>.

系统第  $k$  时刻的卡尔曼增益  $K_k$  通过算出预测部分 ( $H \hat{x}_k, H P_k H^T$ ) 和测量部分 ( $z_k, R$ ) 之间的重叠部分而获得,见公式(3),其中  $R$  表示系统不确定性(本文中传感器噪声)的协方差, $z_k$  表示系统不确定性的均值:

$$K_k = P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1} \quad (3)$$

通过上述公式的整理,可以获得当前系统的最优均值估计  $\hat{x}_k$  以及协方差估计  $P_k$ :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k (z_k - H \hat{x}_k) \quad (4)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k \quad (5)$$

## 3 传感器节点信息软件滤波处理

加速度传感器通过测量施于传感器上的作用力来检测设备的加速度  $A_d$ ,进而监测引航员登离船过程中的加速度值.然而重力总是会按以下关系影响人体姿态监测的精度,因此需要剔除重力作用的影响从而获得线性加速度,如式(6)所示.其中  $g$  为重力加速度, $F_s$  为加速度传感器所受力, $M$  为加速度传感器的质量<sup>[10]</sup>.

$$A_d = -g - \frac{\sum F_s}{M} \quad (6)$$

考虑到重力加速度是低频分量,设计通过采用低通滤波将其滤除,并获得高频的线性加速度信号,本算法采用软件编程实现硬件 RC (Resistor Capacitor) 低通滤波器的功能,如式(7)所示,其对应的频域  $z$  变换如式(8)所示.其中  $A$  为滤波系数,该值大小根据滤波灵敏度和稳定性来进行调节; $x(n)$  为本次采样值; $y(n-1)$  为上次滤波输出值; $y(n)$  为本次滤波输出值.

$$y(n) = A * y(n-1) + (1-A) * x(n) \quad (7)$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1-A}{1-A * z^{-1}} \quad (8)$$

通过将本次采样值和上一次滤波输出值进行加权,实现了本次输出值对上次输入值的反馈作用,最终得到有效的滤波值<sup>[11]</sup>,该滤波值能够很好将重力加速度进行分离,从而获取其姿态相应的线性加速度值.

## 4 传感器节点信息数字滤波器处理

数字滤波器一般由寄存器、延时器、加法器和乘法器等基本数字电路实现.随着集成电路技术的发展,其性能不断提高而成本却不断降低,数字滤波器的应用领域也因此越来越广.按照数字滤波器的特性,它可以被分为线性与非线性、因果与非因果、无限脉冲响应 IIR (Infinite Impulse Response) 与有限脉冲响应 FIR 等等.相对于 IIR 滤波器,FIR 滤波器最主要的特点是没有反馈回路,故不存在不稳定的问题;同时,可以在幅度特性上随意设置,保证精确的线性相位.因此,本算法采用 FIR 滤波来实现杂波处理<sup>[12,13]</sup>.

对于长度为  $N$ 、阶数为  $N-1$  的 FIR 进行  $z$  变换的转移函数  $H(z)$ 、单位冲击响应  $h(n)$  和差分方程  $y(n)$  分别见式(9)、式(10)和式(11),其中  $h(n)$  是有限长, $\delta(n)$  为冲击函数.

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n} \quad (9)$$

$$h(n) = h(0) * \delta(n) + h(1) * \delta(n-1)$$

$$+ \dots + h(N-1) * \delta(n-N+1) \quad (10)$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k) \quad (11)$$

通过上述卡尔曼滤波和软件低通滤波处理后,能够提取出人体姿态的线性加速度.然而由于引航员在登离船过程中,会受到海上风浪、软梯抖动等多因素的影响,造成线性加速度中会存在杂波,对引航员姿态的

判断造成影响.因此,本算法在引航员登离船攀爬软梯过程中,逐次对每节软梯进行相应姿态判断,考虑到船上软梯的每节的间隔是 30~36mm 之间,通过对 10 名引航员攀爬一阶软梯进行测试,获得该段时间上下限,并乘以影响因子,从而得到每攀爬一阶软梯的时间范围,见表 1.

表 1 引航员单阶软梯时间试验

测试人员	攀爬单阶软梯时间(s)							
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次
人员 1	1.21	1.25	1.30	1.19	1.15	1.22	1.26	1.17
人员 2	1.18	1.16	1.05	1.19	1.09	1.12	1.28	1.16
人员 3	1.06	1.12	1.11	1.11	1.15	1.10	1.17	1.19
人员 4	1.22	1.16	1.14	1.08	1.16	1.13	1.09	1.05
人员 5	1.11	1.14	1.22	1.16	1.13	1.20	1.22	1.18
人员 6	1.22	1.26	1.29	1.22	1.20	1.30	1.24	1.29
人员 7	1.08	1.09	1.04	1.02	1.06	1.08	1.07	1.09
人员 8	1.11	1.19	1.18	1.10	1.19	1.20	1.13	1.15
人员 9	1.10	1.13	1.16	1.14	1.19	1.12	1.10	1.11
人员 10	1.12	1.12	1.15	1.08	1.16	1.10	1.14	1.13

通过 STM32 中定时器对引航员攀爬一阶软梯所用时间的测试可知,攀爬一阶软梯时间范围约为 1.00s~1.40s 之间,且通过对测试数据进行 MATLAB 仿真,如图 1 所示,发现姿态传感器中混杂的杂波频率较高.因此,设计一种 FIR 低通滤波器,截止频率设置为 5Hz.考虑到 STM32 中每 20ms 对姿态传感器采样一组数据,根据奈奎斯特采样定理,数字滤波器采样频率应该高于姿态传感器传输数据的 2 倍,所以 FIR 低通滤波器的采样间隔设置需设置为 100Hz 以上,本次算法采样间隔设置为 200Hz<sup>[14,15]</sup>.

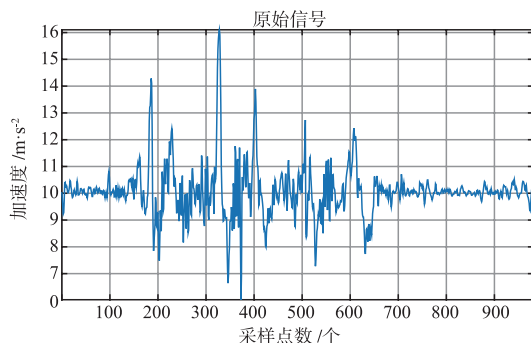


图 1 姿态数据 MATLAB 仿真

滤波器窗函数采用 Hamming 窗  $\omega(n)$ , 见式 (12), 该窗能量更加集中在主瓣中, 主瓣的能量约占 99.96%, 瓣峰值幅度为 40dB, 主瓣宽度可达到  $8\pi/N$ , 其比矩形窗、bartlett 窗、Hanning 窗有更大的优势, 如表

2 所示.

$$\omega(n) = 0.54 - 0.46 * \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), 0 \leq n \leq N-1 \quad (12)$$

表 2 几种窗函数比较

窗类型	最大旁瓣幅度(相对值)	主瓣近似宽度	最大逼近误差	等效 Kaise $\beta$
矩形	-13	$4\pi(M+1)$	-21	0
Bartlett	-25	$8\pi/M$	-25	1.33
Hanning	-31	$8\pi/M$	-44	3.86
Hamming	-41	$8\pi/M$	-53	4.86

## 5 试验结果分析

### 5.1 安全防护装置实际效果测试

试验环境需用引航员登离船专用软梯和 16mm 粗 8 芯牵引绳, 将攀爬防护装置从牵引绳中穿入, 并根据高挂低用的原则, 将攀爬防护装置至于高于引航员的位置, 随后将攀爬防护装置与引航员安全带相连, 并将姿态监控装置佩戴在腰间, 如图 2 所示.

姿态监控装置可全程监控引航员登离船过程中的姿态信息, 识别出引航员登离船运动状态, 并通过蓝牙将姿态信息传送给攀爬防护装置; 攀爬防护装置在接收到运动指令后, 驱动其跟随人体进行同步运动, 且攀爬防护装置可根据人体的攀爬速度进行自动调节, 实现引航员登离船过程中对人体同步跟踪和实时防护功



图2 引航员人体姿态算法测试

能,当人体发生坠落时进行及时锁紧保护。

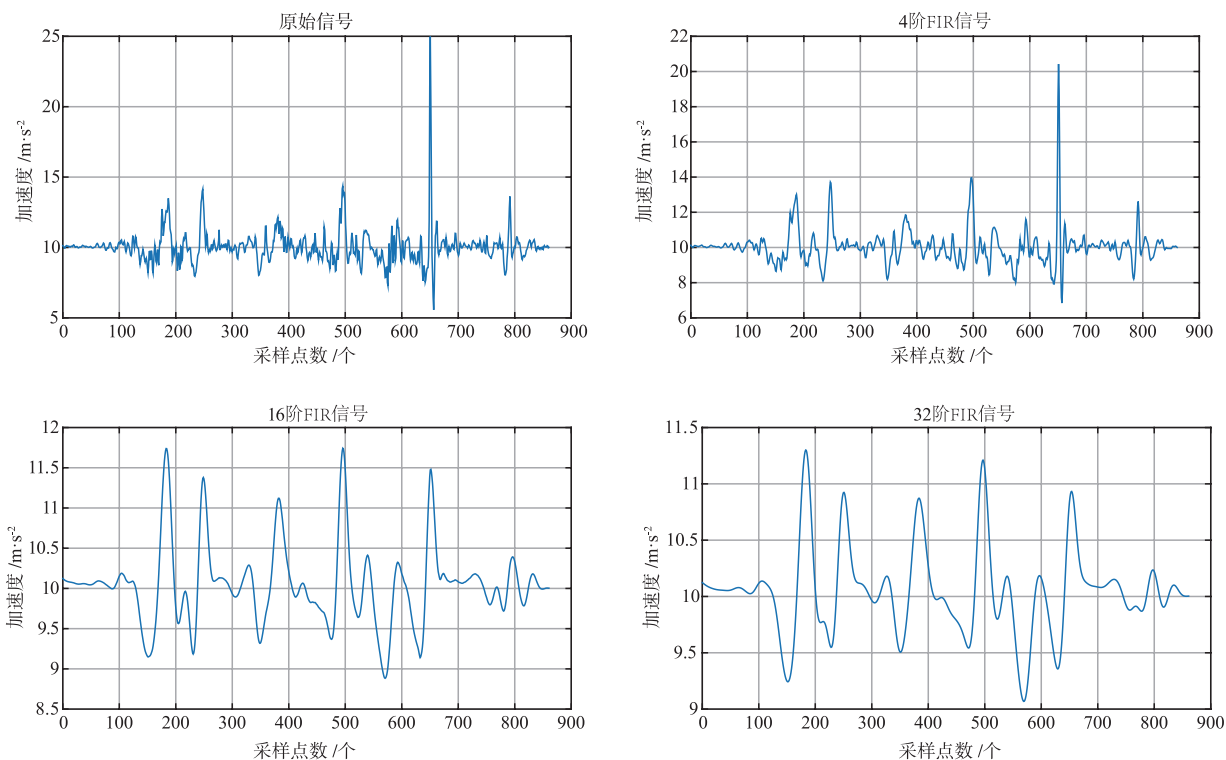


图3 引航员人体姿态算法处理结果

测试结果表明,STM32 中的 DSP 库能够较为精确实现 MATLAB 算法对人体姿态数据的处理,且处理结果能够很好的实现引航员登离船过程中人体姿态判断。

通过 STM32 的 DSP 库进行人体姿态数据处理,并进行模拟引航员登离船测试,分别攀爬不同阶数的软梯,判断该姿态算法能够识别出引航员登离船过程中的上升和下降,其测试结果见表 3。

## 5.2 人体姿态算法精度评估

在该环境下进行引航员登离船过程模拟试验,攀爬不同阶软梯进行引航员人体姿态特征判断,将攀爬过程中的姿态数据导入到 MATLAB 中进行 FIR 滤波处理,调节 FIR 滤波器阶数<sup>[16-19]</sup>,观察人体姿态特征变化,如图 3 所示。

分别对原始数据进行 4 阶、16 阶以及 32 阶 FIR 滤波,可观察到 32 阶的滤波效果明显能够将高频的噪声进行滤除;当滤波器阶数大于 32 阶以后,对于噪声的滤波效果并无太大的滤波变化,反而会衰减有效姿态的幅值,因此本研究采用 32 阶的 FIR 滤波进行滤波处理。

为测试 STM32 中 4 的 DSP (Digital Signal Processor) 能否实现 MATLAB 中算法的效果,分别使用 DSP 功能进行 FIR 滤波处理、更改滤波器阶数、滤波器系数三种方式,测试了多组引航员软梯攀爬测试,判断是否能够达到 MATLAB 仿真测试中的效果,其测试效果如图 4 所示。

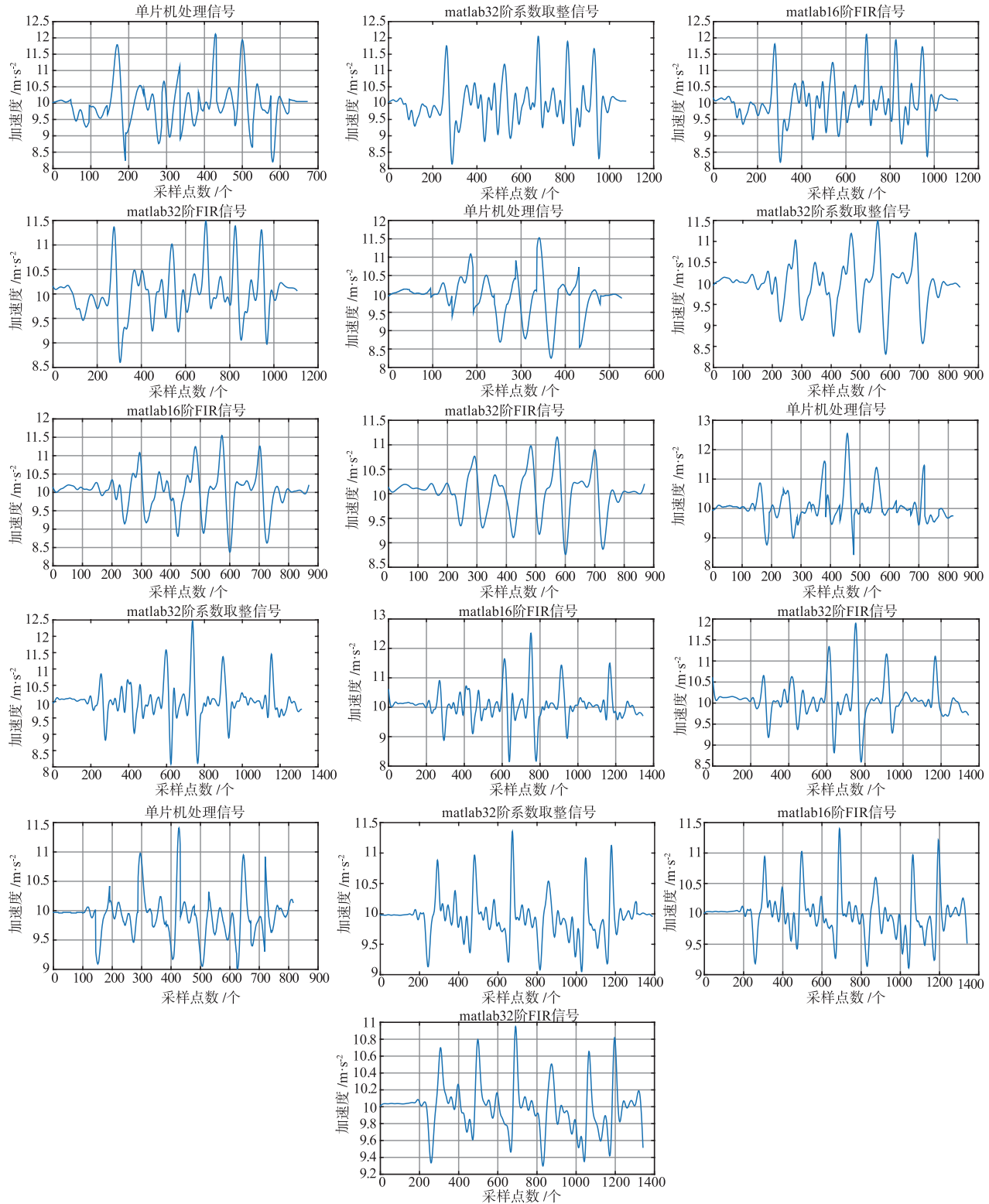


图4 单片机与MATLAB算法处理对比

表 3 引航员攀爬软梯阶数判断试验

软梯阶数(阶)	攀爬防护运动阶数(阶)																			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	第 8 次	第 9 次	第 10 次	第 11 次	第 12 次	第 13 次	第 14 次	第 15 次	第 16 次	第 17 次	第 18 次	第 19 次	第 20 次
3	3	3	4	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	4
5	5	5	5	5	6	5	6	5	5	5	6	5	5	5	5	5	6	5	6	5
7	6	7	7	7	7	7	6	7	6	7	7	6	7	6	7	7	7	7	7	7
9	9	8	9	9	8	8	9	9	8	9	10	8	9	9	9	9	9	9	9	8
11	12	10	11	12	11	11	10	11	11	11	11	10	11	12	11	11	11	10	11	11
13	13	13	13	13	14	13	12	13	12	13	13	13	13	14	13	13	12	12	13	13
15	15	15	14	15	15	14	15	16	15	16	14	15	15	15	15	14	15	16	15	16
17	17	17	16	17	16	17	18	17	17	18	17	17	16	17	16	17	18	17	17	18

## 6 结论

本文提出了引航员登离船人体姿态算法,该算法通过对姿态信号进行卡尔曼滤波、软件低通滤波和 FIR 滤波,得到符合人体姿态特征的加速度和速度,能够实现引航员登离船过程中上升或下降的判断.该算法研究目前应用于引航员登离船姿态传感器研究中,并配合引航员攀爬防护装置,实现引航员登离船过程中的人身安全防护和自动跟踪功能.

在本文的工作基础上,进一步优化判断引航员登离船过程中攀爬软梯一步的算法,提高算法的精确度以及减少其他误动作的影响是需要后期进一步确认的.

### 参考文献

- [1] 强家辉,张为公,王东.基于足底压力的人体姿态检测和行為分析方法[J].测控技术,2018,1(1):4-9.  
QIANG Jia-hui,ZHANG Wei-gong,WANG Dong. Human posture detection and behavior analysis based on plantar pressure[J]. Measurement & Control Technology. 2018, 1(1):4-9. (in Chinese)
- [2] 吴峰,王向军,汤其剑.基于数字调节方法的 MEMS 陀螺零位补偿技术研究[J].传感技术学报,2012,25(12):1717-1721.  
WU Feng,WANG Xiangjun,TANG Qijian. Research on zero compensation for MEMS gyroscope based on digital regulation[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators. 2012,25(12):1717-1721. (in Chinese)
- [3] 刘为任,张海龙,侯志宁.基于自适应 FLP 滤波的金属谐振陀螺信号处理方法[J].中国惯性技术学报,2019,27(1):83-88.  
LIU Weiren,ZHANG Hailong,HOU Zhining. Signal processing method of metal resonant gyro based on adaptive FLP filter[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2019,27(1):83-88. (in Chinese)
- [4] Madgwick S O H,Harrison A J L,Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm[A]. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics[C]. Zurich, Switzerland:IEEE,2011. 1-7.
- [5] 张庆宾,田国会,张衍儒.基于 AHRS 的人体姿态捕捉系统的设计与实现[J].高技术通讯,2013,23(12):1292-1298.  
ZHANG Qing-bin,TIAN Guo-hui,ZHANG Yan-ru. Design and implementation of a human posture capture system based on AHRS[J]. Chinese High Technology Letters, 2013,23(12):1292-1298. (in Chinese)
- [6] 张敏,李凯,韩焱,等.基于卡尔曼滤波的陀螺仪降噪处理[J].传感技术学报,2018,31(2):223-227.  
ZHANG Min,LI Kai,HAN Yan,et al. The noise reduction of gyroscope based on kalman filter[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018,31(2):223-227. (in Chinese)
- [7] 周艳青,薛河儒,姜新华,等.基于改进的卡尔曼滤波算法的气象数据融合[J].计算机系统应用,2018,27(4):184-189.  
ZHOU Yan-qing,XUE He-ru,JIANG Xin-hua,et al. Meteorological data fusion based on proposed kalman filter method[J]. Computer Systems & Applications, 2018, 27(4):184-189. (in Chinese)
- [8] 张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,2002.  
ZHANG Xian-da. Modern Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua Press,2002. (in Chinese)
- [9] 杨宇闾奕,何东健,刘畅,等.基于 ZigBee 的奶牛体征监

- 测系统设计与实现[J]. 农机化研究, 2018, 40(9): 74-80.
- Yang Yu-tianyi, He Dong-jian, Liu Chang, et al. Design of wireless sensor system for cow behavior monitoring based on ZigBee[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(9): 74-80. (in Chinese)
- [10] 杜润乐, 刘佳琪, 李志峰, 等. 低通滤波与卡尔曼滤波相结合的制导律识别[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(4): 66-72.
- DU Run-le, LIU Jia-qi, LI Zhi-feng, et al. A LPF enhanced adaptive Kalman filter for guidance law recognition[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(4): 66-72. (in Chinese)
- [11] 李玲玲, 范锦彪, 王燕. 侵入加速度信号的低通滤波方法[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(2): 53-56.
- LI Ling-ling, FAN Jing-biao, WANG yan. Low-pass filtering for penetration acceleration signal[J]. Journal of Detection & Control, 2016, 38(2): 53-56. (in Chinese)
- [12] 江楠, 李伟. 基于 MATLAB 的 FIR 数字滤波器设计[J]. 电子设计工程, 2017, 25(14): 187-189.
- JIANG Nan, LI Wei. Design of FIR digital filter based on MATLAB[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(14): 187-189. (in Chinese)
- [13] 冯美艳. STM32 处理器的参数可变 FIR 数字滤波器设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2017, 17(9): 70-72, 77.
- FENG Mei-yan. Variable parameters FIR digital filter design based on STM32[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2017, 17(9): 70-72, 77. (in Chinese)
- [14] HE Yanyu, GUO Jin. FIR systems identification under quantized output observations and a large class of persistently exciting quantized inputs[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2017, 30(5): 1061-1071.
- [15] 刘文波, 于盛林. 进化规划在频率采样型 FIR 滤波器设计中的应用[J]. 南京航空航天大学学报(英文版), 2000, 17(2): 218-223.
- LIU Wen-bo, Yu Sheng-lin. An application of evolutionary programming in FIR filter design with frequency sampling method[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 17(2): 218-223. (in Chinese)
- [16] WEN Jian-gang, HUA Jing-yu, LI Sun-an, et al. Interference-driven designs of nonlinear-phase FIR filter with application in FBMC system[J]. China Communications, 2016, 13(12): 15-24.
- [17] 张红, 刘迅成, 王龙. 自适应滤波器综合实验设计[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(2): 34-36.
- ZHANG Hong, LIU Xun-cheng, WANG Long. Design on comprehensive experiment of adaptive filter[J]. Experimental Technology and Management, 2018, 35(2): 34-36. (in Chinese)
- [18] 钱泽斌, 严伟. 一种低资源数字抽取滤波器设计[J]. 北京大学学报, 2018, 54(2): 315-319.
- QIAN Ze-bin, YAN Wei. Low resource consumption design of digital decimation filter[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, 54(2): 315-319. (in Chinese)
- [19] 程雨婷, 彭勃, 魏玺章. 基于震荡权重粒子群杂交的过 2 采样 DFT 滤波器组优化设计[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 982-988.
- CHENG Yu-ting, PENG Bo, WEI Xi-zhang. Optimum design of 2-oversampling DFT filter bank based on shocking weight PSO hybridization[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(5): 982-988. (in Chinese)

#### 作者简介



**李先瑞** 男, 1991 年 10 月出生, 天津滨海新区人. 2014 年毕业于电子科技大学获得双学士学位, 现就读华北电力大学研究生. 中级工程师, 主要从事电子技术与仪器研发方面的研究.  
E-mail: 18222701522@163.com



**倪文军** 男, 1971 年 5 月出生, 天津滨海新区人. 1991 年毕业于哈尔滨科学技术大学获得学士学位. 高级工程师, 现为交通运输部天津水运工程科学研究院设备开发中心主任, 主要研究方向为电子工程检测技术及仪器研究.  
E-mail: 308219904@qq.com



**栗克国 (通信作者)** 男, 1983 年 10 月出生, 河南南阳人. 2008 年毕业于昆明理工大学获得硕士学位, 高级工程师, 现为交通运输部天津水运工程科学研究院设备开发中心副主任, 主要从事水运工程自动化系统方面研究.  
E-mail: lkgaaa@163.com