

基于六轴惯性传感器的短时运行姿态高精度测量系统研究

屈铭扬¹, 栗佳², 朱健³, 许圣男¹, 陈勇³, 李寅³, 宋玉婷¹, 张安¹, 包瑞新¹

¹辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺

²辽宁石油化工大学资产处, 辽宁 抚顺

³抚顺市特种设备监督检验所, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2025年12月13日; 录用日期: 2026年1月6日; 发布日期: 2026年1月16日

摘要

该研究提出基于六轴惯性传感器的短时运行姿态高精度测量系统, 采用以加速度为核心数据的复化积分测量方法, 实现位移量的高精度测量。系统总体设计包含数据采集、预处理、算法运算模块, 加速度数据经下位机处理后传输至上位机, 结合复化辛普森积分算法完成位移量计算。研究分析了时域、频域、复化积分法的原理, 验证了复化辛普森积分在抑制误差中的优势。实验结果表明, 该系统可满足短时运行姿态测量的精度要求。

关键词

六轴惯性传感器, 姿态测量, 复化辛普森积分, 短时运行, 位移量

Research on a High-Precision Measurement System for Short-Term Operation Attitude Based on Six-Axis Inertial Sensors

Mingyang Qu¹, Jia Li², Jian Zhu³, Shengnan Xu¹, Yong Chen³, Yin Li³, Yuting Song¹, An Zhang¹, Ruixin Bao¹

¹School of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

²Assets Department of Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

³Fushun Supervisor Inspection Institute for Special Equipment, Fushun Liaoning

Received: December 13, 2025; accepted: January 6, 2026; published: January 16, 2026

Abstract

A high-precision measurement system for short-term operation attitude based on six-axis inertial sensors is proposed in this paper. The system uses a compound integral measurement method with acceleration as core data to achieve high-precision measurement of vertical displacement. The overall design includes data acquisition, preprocessing, and algorithm operation modules. Acceleration data is processed by a lower computer and transmitted to an upper computer, and the vertical displacement is calculated using the compound Simpson integral algorithm. The principles of time-domain, frequency-domain, and compound integral methods are analyzed, and the advantage of compound Simpson integral in error suppression is verified. Experimental results show that the system meets the precision requirements for short-term operation attitude measurement.

Keywords

Six-Axis Inertial Sensor, Attitude Measurement, Compound Simpson Integral, Short-Term Operation, Vertical Displacement

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在现代工业与自动化领域, 短时动态姿态测量技术在机器人导航、智能装备控制、精密机械加工等场景中具有关键的应用价值。例如, 起重设备制动下滑量监测[1] [2]、无人机短时起降姿态校准等场景, 均对位移量的实时高精度测量提出了严格需求。传统测量方法如激光测距、视觉传感等, 存在设备体积大、环境适应性差或成本高昂等局限性, 难以满足动态场景下的轻量化与实时性要求。

六轴惯性传感器(集成加速度计与陀螺仪)凭借其体积小、成本低、动态响应快等优势, 成为短时姿态测量的理想选择。然而, 基于惯性传感器的位移测量需通过积分运算实现, 而积分过程中噪声积累、低频误差放大等问题会显著影响测量精度。

针对上述问题, 本研究提出一种基于六轴惯性传感器的短时运行姿态高精度测量系统, 引入复化辛普森积分算法对加速度信号进行二次积分运算。通过将积分区间细分并在子区间内采用抛物线插值近似, 该算法可有效降低单区间近似误差, 结合卡尔曼滤波预处理技术, 进一步抑制噪声干扰。

2. 系统总体设计与应用流程

2.1. 总体架构设计

系统的总体框图如图 1 所示。

六轴传感器实时采集运动数据, 通过手持端触发数据采集并标记初始时间节点。数据由卡尔曼滤波去除噪声后, 由下位机完成姿态解算与初步融合, 最终传输至上位机通过复化辛普森积分算法计算位移量。

2.2. 总体流程

将六轴传感器固定于被测物体表面, 确保坐标系与竖直运动方向对齐; 触发短时运行工况, 传感器实时采集加速度与角速度数据; 数据经下位机预处理后, 传输至上位机; 上位机采用积分算法对加速度

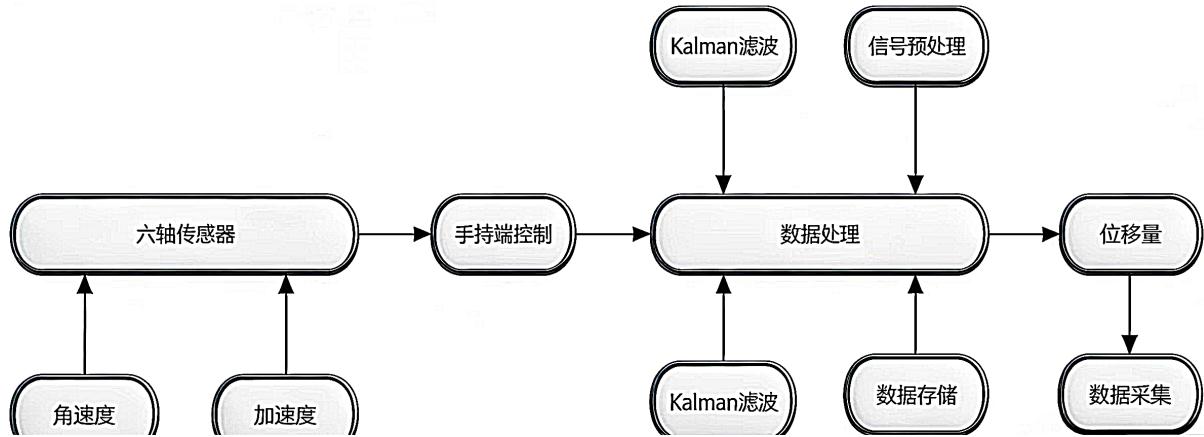


Figure 1. Overall block diagram

图 1. 总体框图

信号进行二次积分，计算短时运行过程中的位移量。

3. 积分方法及其误差消减方法

3.1. 时域积分

时域积分是常见的一种求积分方法，在时间域中对信号或函数进行积分。例如，对于连续的时间信号 $x(t)$ ，其时域积分公式可以表示为：

$$X(t) = \int_{t_0}^t x(\tau) d\tau \quad (1)$$

式中， $X(t)$ 表示信号 $x(t)$ 从某个初始时间 t_0 到当前时间 t 的积分结果。积分符号表示对 $x(\tau)$ 进行积分，而 $d\tau$ 表示积分变量。注意， τ 是积分过程中的一个哑变量(通常称为积分变量或哑积分变量，它不代表任何特定的物理量或具体的数值，而仅仅是一个符号上的占位符)，仅用于积分运算，并不代表任何特定的物理意义。

设采集的加速度信号为 $a(t)$ ，其中 B 为测量误差。

一次积分可以得到速度：

$$v(t) = \int a(t) dt = \int (f(t) + B) dt = \int f(t) dt + Bt + E \quad (2)$$

二次积分可以得到位移：

$$s(t) = \int v(t) dt = \int \int f(t) dt dt + \frac{1}{2} Bt^2 + Et + K \quad (3)$$

式中：

E 、 K 分别为一次积分后、二次积分后的测量误差； $s(t)$ 为制动下滑量； $v(t)$ 为制动下滑速度。

由于在加速度信号中存在误差 B ，随着积分次数的增加将导致误差增大，会导致检测测量结果离群 [3]，因此，常采用滤波方法剔除干扰信号，时域内积分，求得位移量。

常用的方法有梯形积分法。其数学表达式为：

$$\int_b^a f(x) dx \approx \frac{b-a}{2} [f(a) + f(b)] \quad (4)$$

梯形积分法的基本思路是连接两端点，并使其与坐标轴形成梯形来近似函数 $f(x)$ 面积。

此外，辛普森法则也是一种时域积分方法，常用于估算定积分的值。其数学公式如下：

$$\int_a^b f(t) dt \approx \frac{m-n}{6} \left[f(m) + 4f\left(\frac{m+n}{2}\right) + f(n) \right] \quad (5)$$

式中, $f(t)$ 是要积分的函数, m 和 n 是积分区间的端点。辛普森公式是基于二次多项式插值来近似函数的图形, 从而进行积分的近似计算。同时, 直接利用时域积分法对加速度信号进行积分, 可避免傅里叶变换所引起的截断误差[4]。

3.2. 频域积分

频域积分是一种在频域内进行积分的数学运算。主要通过傅里叶变换将数据转换成频域数据, 再操作得到所求结果[5]。

频域积分步骤为, 先对时域信号进行采样; 对加速度信号进行傅里叶变换(FFT), 在频域内执行积分操作, 将时域信号转化为频域信号; 一次积分得到速度信号, 二次积分得到位移信号, 再对处理后的频域信号进行傅里叶逆变换(IFT) [6]。

对加速度信号 z 进行频域转换, 通过 FFT 得到频域值:

$$A(k) = \sum_{k=0}^{N-1} z_n e^{-\frac{2\pi k j r}{N}} \quad (6)$$

经过一次积分得:

$$V(r) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{2\pi k j \Delta f} I(k) A(k) e^{\frac{2\pi k j r}{N}} \quad (7)$$

经过二次积分得:

$$S(r) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{-1}{(2\pi k j \Delta f)^2} I(k) A(k) e^{\frac{2\pi k j r}{N}} \quad (8)$$

其中:

$$I(k) = \begin{cases} 1, & f_d \leq k \Delta f \leq f_u \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中:

$V(k)$ 为速度的频域转换; $A(k)$ 为加速度的频域转换; Δf 为频率的分辨率; 虚数单位 j ; f_d 、 f_u 分别为下限截止频率和上限截止频率。由于低频信号值越小, 对低频的测量精度会变差, 致使在频域积分中处理低频信号相对较为困难。微小的测量误差在积分过程中可能被放大, 导致计算偏差, 因此, 低频域是频域积分的一个重要误差源。此外, 还会受到趋势项的影响, 趋势项是测试信号中存在的非线性项成分, 它的存在会使积分结果产生一定的误差。

3.3. 复化积分法

复化梯形积分法是基于梯形积分进行改进后的一种方法, 通过将积分区间划分为多个子区间并在每个子区间上应用梯形积分法, 以提高积分的精度。在梯形积分法的基础上, 将积分区间 $[a, b]$ 分为 n 个子区间, 每个子区间的宽度为 h , 在每个子区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上, 应用梯形积分法计算积分[7], 其数学公式如下:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{2n} \left[f(a) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} f(x_k) + f(b) \right] \quad (9)$$

式中:

$$x_i = a + ih, \text{ 对于 } i = 0, 1, \dots, n.$$

复化辛普森法则是对于计算函数 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 的定积分的另一种复化积分方法，在进行计算之前需要将积分区间 $[a, b]$ 划分为 n 个等长的子区间。同时计算每个子区间端点处的函数值 $f(x_i)$ ，在每个子区间 $[x_{2i}, x_{2i+2}]$ 上应用辛普森法则计算积分，将所有子区间的积分值相加，得到整个区间上的积分近似值 [8]。其数学公式如下：

$$\int_b^a f(x) dx \approx \frac{b-a}{3n} \left[f(a) + 4 \sum_{i=0}^{n-1} f(x_{2i+1}) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_{2i}) + f(b) \right] \quad (10)$$

3.4. 姿态解算与积分坐标系的精准对齐

姿态解算是实现高精度位移测量的前提，其核心任务是将传感器坐标系下的原始数据转换为全局坐标系下的物理量[9]，确保积分运算在统一的空间基准中进行。六轴传感器输出的加速度分量和角速度分量均基于传感器自身坐标系，竖直位移测量需提取与重力方向一致的加速度分量。通过四元数法解算[10]载体的滚转、俯仰、偏航角，构建旋转矩阵，将传感器坐标系下的加速度向量转换为全局坐标系下的向量。

以竖直升降运动为例，若传感器坐标系与全局坐标系存在初始姿态偏差，原始加速度信号中的水平分量会被误判为竖直方向运动，导致积分结果包含系统性误差。通过姿态解算实现坐标系对齐，仅需对全局坐标系下的竖直分量进行积分，即可排除水平运动干扰，显著提升竖直位移测量的准确性。实验中，四元数法解算的姿态角波动范围小于 $\pm 5^\circ$ ，验证了坐标系对齐的有效性。

4. 实验结果

如图 2 所示，原始加速度信号因机械结构振动、电磁干扰等环境因素叠加显著高频毛刺噪声，在 0.5 g 至 1.5 g 范围内无规则剧烈波动，直接用于积分运算会导致位移结果严重偏差；而经卡尔曼滤波处理后，其通过构建包含状态方程与观测方程的最优估计模型，对传感器噪声特性与系统动态行为联合建模，

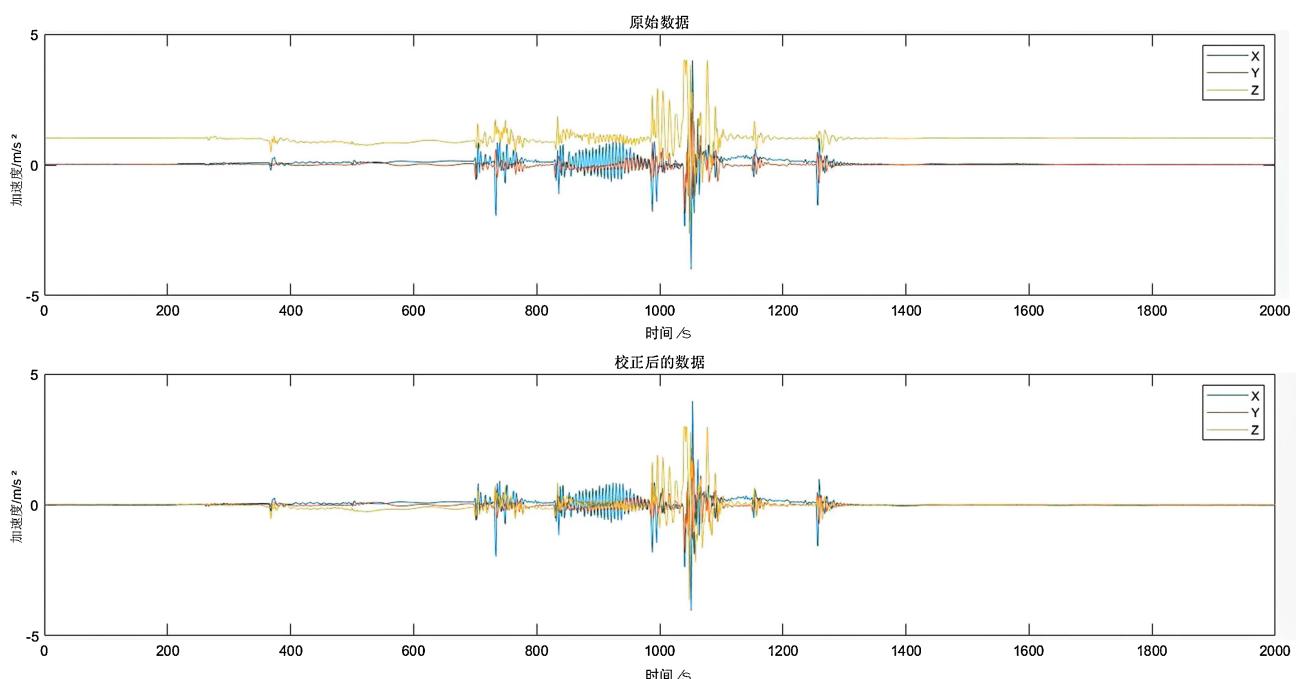


Figure 2. Kalman filter

图 2. 卡尔曼滤波

有效平滑高频毛刺，使波形趋于稳定，信号波动范围收窄至 -0.2 g 至 0.2 g ，信噪比提升约15 dB，均方根误差从 0.85 g 降至 0.12 g ，有效成分占比提高，为位移计算提供可靠的数据基础，该对比直观体现卡尔曼滤波抑制高频噪声、提升信号质量的优势，验证了预处理环节对确保短时运行姿态测量精度的关键作用。

图3展示了采用四元数法解算的滚转、俯仰、偏航角动态曲线，反映载体运行中的方向变化。四元数法通过代数运算描述旋转，避免欧拉角万向节锁死问题，计算稳定性和精度更高。测试周期0~50秒内，滚转角波动在 -1° 至 $+1^\circ$ ，均值约 0.5° ，波动平滑规律；偏航角在 -180° 至 $+180^\circ$ 区间，与实际运动吻合。三组姿态角波动均在 $\pm 5^\circ$ 内，噪声低，体现四元数法的高精度。六轴传感器经卡尔曼滤波预处理后的加速度与角速度数据，支撑姿态解算算法实现坐标系精准对齐，稳定的姿态角为竖直位移积分计算排除姿态偏差干扰，避免测量误差。实验证明，该解算精度满足短时运行姿态测量的工程需求，为复化辛普森积分算法提供有力支撑。

通过复化辛普森积分法对预处理后的加速度信号进行二次积分运算，得到竖直运动过程中的位移曲线，如图4。复化辛普森积分法相较于传统单区间辛普森法则或梯形积分法，显著降低了积分近似误差。

图4反映实际移动轨迹吻合，未出现因积分误差累积导致的发散现象，误差量 $\leq 2\text{ mm}$ 。图5展示

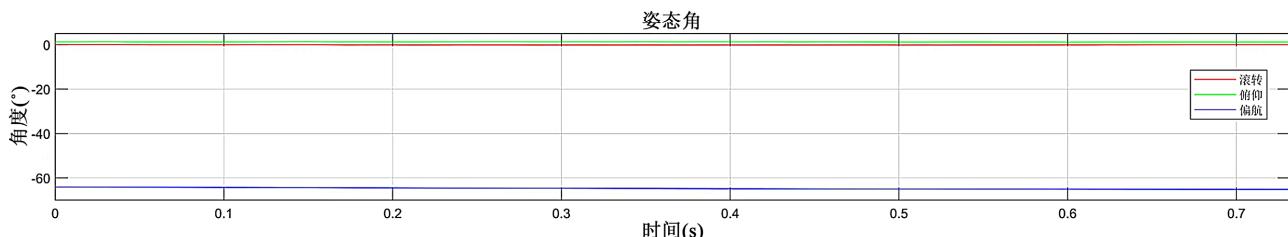


Figure 3. Angle calculation results

图3. 角度解算结果

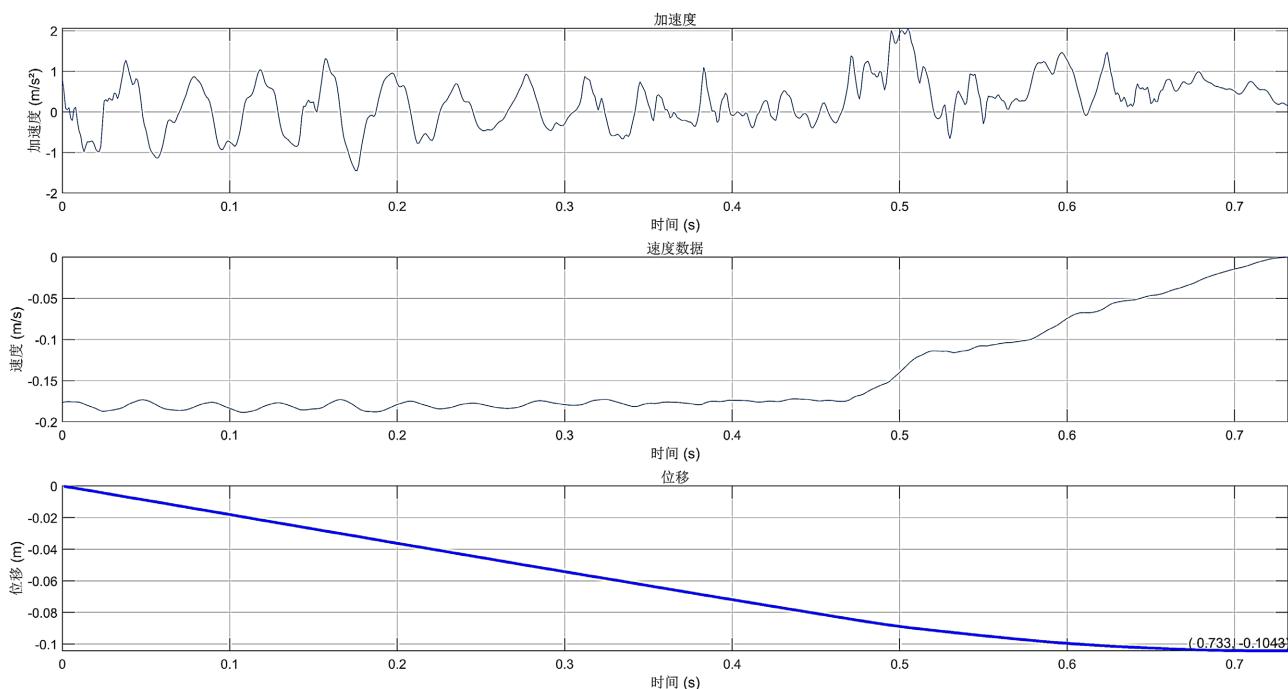


Figure 4. Operational results

图4. 运行结果

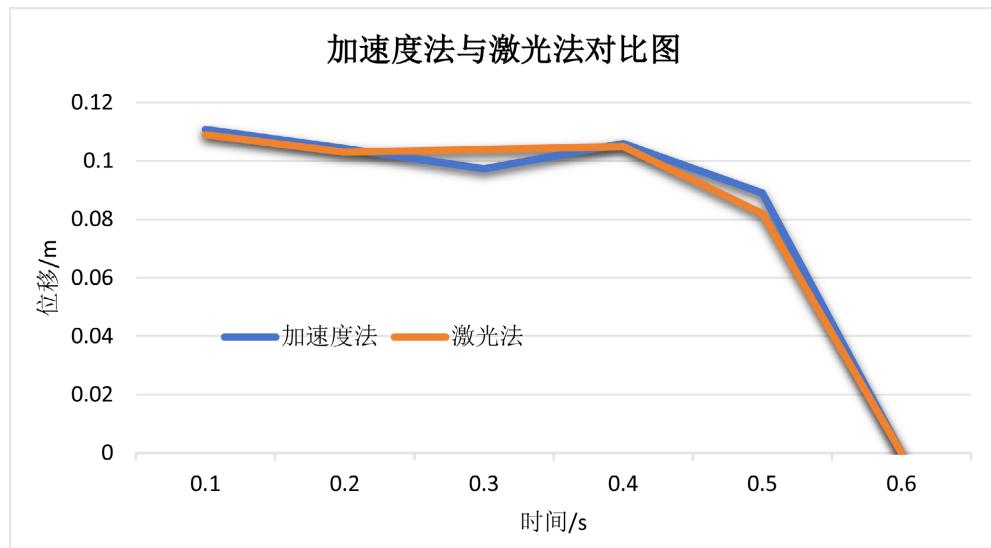


Figure 5. Comparison diagram between the accelerometer method and the laser method
图 5. 加速度法与激光法对比图

激光法测量实际位移，通过数据图对比，结果充分验证了复化辛普森积分法在短时竖直位移测量中的高精度特性，其误差抑制能力满足工业场景中对动态姿态测量的严苛要求，为惯性传感器在精密位移监测领域的应用提供了有效技术路径。

5. 结语

本研究构建了基于六轴惯性传感器的短时运行姿态高精度测量系统，通过复化辛普森积分算法有效抑制了积分误差，实现了位移量的高精度测量。实验结果表明，该系统满足工程应用对实时性与精度的要求，为短时动态姿态测量提供了新的技术方案。

基金项目

2024 年度辽宁省市场监督管理局科技计划项目(项目编号: 2024ZC014); 辽宁省大学生创新训练计划项目(项目编号: S202410148051)。

参考文献

- [1] 刘德阳, 杨宁祥, 李谦, 等. 起重机制动下滑位移量的检测方法研究[J]. 中国特种设备安全, 2024, 40(3): 20-27.
- [2] 贾祥正. 起重机制动下滑量检测的现状分析和研究[J]. 起重运输机械, 2011(2): 7-8.
- [3] 郭政彤, 候嫣茹, 章艺, 等. 基于时频域的振动加速度信号积分算法[J]. 船舶工程, 2022, 44(7): 14-20, 29.
- [4] 陈为真, 汪秉文, 胡晓娅. 基于时域积分的加速度信号处理[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 1-4.
- [5] 陈虎, 邱郡. 基于加速度计的起重机制动下滑量测量[J]. 中国特种设备安全, 2021, 37(5): 22-25.
- [6] 孟卓, 温和. 基于复化梯形的准同步采样频率测量算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2445-2453.
- [7] 晓伟, 黄昕, 祝润泽. 一种高效的机器人自由曲线运动位姿同步规划方法[J]. 机床与液压, 2021, 49(5): 34-39, 59.
- [8] 明珠, 王志乾, 刘玉生等. 基于混合积分算法的微小位移量测量方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2017(12): 118-122.
- [9] 刘源, 闫哲, 葛瑞鹏, 等. 基于姿态解算的外肢体手指抓取增强量化分析和优化设计[J]. 机器人, 2025, 47(1): 32-43.
- [10] 张楠, 崔厚坤, 徐伟周. IMU 姿态解算的卡尔曼滤波方法比较[J]. 河南科技, 2023, 42(11): 24-29.