

УДК 681.586.2

Фильтрация данных инерциальных датчиков в системе стабилизации камеры мобильного робота

Волков Андрей Алексеевич^{1,2}

andrey.volkov63@rsce.ru

SPIN-код: 4404-5835

¹ ПАО «РКК «Энергия», Королёв, Московская обл., Россия² ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

Аннотация. В работе описан практический способ фильтрации данных инерциальных измерительных модулей (IMU) при управлении стабилизацией видеокамеры мобильного робота. Разработан и реализован алгоритм объединения сигналов акселерометра и гироскопа с использованием фильтра Маджвика на микроконтроллере Arduino Uno. Рассмотрены особенности цифровой обработки сигналов, представление ориентации в виде кватерниона и влияние параметров фильтра на точность стабилизации.

Ключевые слова: инерциальные датчики, фильтр Маджвика, стабилизация, кватернионы, Arduino Uno, мехатроника, фильтрация сигналов

Введение. Стабилизация видеопотока в мобильных роботах остается важной задачей мехатроники. Движение шасси, неровности поверхности и вибрации вызывают колебания ориентации камеры, что ухудшает качество изображения [1, 2]. Для компенсации этих возмущений используется платформа для стабилизации, работающая на основе данных инерциальных датчиков. Акселерометр чувствителен к линейным ускорениям, а гироскоп склонен к накоплению ошибки [3]. Поэтому необходимо объединять их сигналы, чтобы получить точную оценку ориентации.

Среди распространенных методов — комплементарный фильтр, фильтр Калмана и фильтр Маджвика. Последний отличается высокой скоростью и подходит для простых микроконтроллеров, например Arduino Uno. Данная работа направлена на создание аппаратно-программной системы фильтрации данных IMU, работающей в составе системы стабилизации видеокамеры.

Методы и материалы. В математической модели инерциальных измерений есть датчики ориентации. Модуль IMU включает акселерометр (измеряет проекции ускорения a_m) и гироскоп (измеряет угловые скорости ω_m). Каждое измерение описывается моделью:

$$s_m = s_{true} + b_s + n_s,$$

где b_s — смещение, n_s — шум.

В динамической модели ориентации положение системы описывается кватернионом:

$$q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T.$$

Его изменение со временем:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} q \otimes \omega,$$

где $\otimes$ — кватернионное произведение.

При численном интегрировании используется формула:

$$q_{k+1} = q_k + \frac{1}{2} * q_k \otimes \omega_k * \Delta t.$$

Чтобы устранить накопленную ошибку, выполняется нормализация:

$$q_{k+1} = \frac{q_{k+1}}{\|q_{k+1}\|}.$$

Выбор алгоритма.

Сравнение методов

Метод	Преимущества	Недостатки
Комплементарный фильтр	Прост в реализации, требует минимум ресурсов	Не убирает дрейф, ограниченная точность
Фильтр Калмана (ЕКФ)	Высокая точность, учитывает шумы	Большие вычислительные затраты
Фильтр Маджвика	Быстрая работа, устойчивость к шумам	Параметр β требует настройки

Алгоритм Маджвика объединяет данные гироскопа и акселерометра методом градиентного спуска, снижая ошибку ориентации:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} q \otimes \omega - \beta \nabla f(q, a, m),$$

где ∇f — градиент функции, отражающей разницу между ожидаемыми и измеренными направлениями гравитации и магнитного поля; β — коэффициент, задающий скорость корректировки.

После интегрирования:

$$q_{t+\Delta t} = \frac{q_{t+\Delta t}}{\|q_{t+\Delta t}\|}.$$

Реализация фильтра на Arduino Uno. Программа написана в среде Arduino IDE и состоит из трех уровней:

- 1) драйвер IMU: считывает данные акселерометра и гироскопа по шине I²C;
- 2) фильтрация: выполняет алгоритм Маджвика;
- 3) контур управления: передает рассчитанные углы ориентации в ПИД-регуляторы стабилизации.

Листинг 1. Фрагмент кода программы

```
Madgwick filter;
void loop() {
  readIMU();
  filter.updateIMU(gx, gy, gz, ax, ay, az);
  roll = filter.getRoll();
  pitch = filter.getPitch();
  yaw = filter.getYaw();
```

```
    stabilizePlatform(roll, pitch, yaw);  
}
```

Перед запуском проводится настройка смещений гироскопа и масштабных коэффициентов акселерометра. Данные акселерометра нормализуются по формуле:

$$a_{norm} = \frac{a_m}{||a_m||}.$$

Это уменьшает влияние изменений амплитуды и ускоряет сходимость фильтра.

Платформа стабилизации построена на трех сервоприводах MG995 с параллельной кинематикой. Рассчитанные углы ориентации (roll, pitch, yaw) преобразуются в углы поворота сервоприводов через обратную кинематику.

Управляющий сигнал задается законом:

$$u_i = K_p(\theta_{refi} - \theta_i) + K_d * \frac{d(\theta_{refi} - \theta_i)}{dt},$$

где u_i — сигнал ШИМ, θ_{refi} — заданный угол, θ_i — измеренный угол для оси.

Испытания проведены на стенде с вибрацией до $\pm 10^\circ$ при частоте 2–3 Гц. Данные собирались с частотой 100 Гц. В результате фильтр стабильно удерживал ориентацию без дрейфа в течение 5 минут, ошибка ориентации не превышала нескольких градусов, нагрузка микроконтроллера не превышала 40 %. Сравнение показало, что фильтр Калмана дает самую высокую точность, но требует 5–10 раз больше вычислений; комплементарный фильтр работает быстро, но не устраняет дрейф; фильтр Маджвика обеспечивает устойчивую и точную работу в реальном времени при низких затратах ресурсов.

Заключение. В статье показан способ фильтрации и объединения данных инерциальных датчиков для стабилизации камеры мобильного робота. Выбранное решение — фильтр Маджвика на Arduino Uno — обеспечивает требуемую точность ориентации и стабильную работу при ограниченных ресурсах. Дальнейшее исследование включает автоматическую подстройку параметра β в зависимости от вибраций.

Список источников

- [1] Волков А.А. Кинематическая характеристика платформы для стабилизации камеры робота: сборка, рабочие режимы и анализ сингулярностей. *Строительные и дорожные машины*, 2025, т. 69, № 1, с. 40–48.
- [2] Волков А.А. Кинематическое моделирование и 3D-проектирование сферической платформы с параллельной структурой для стабилизации камеры робота. *XLIX Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сб. тез.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025, с. 379–380.
- [3] Попов Г.В. *Микромеханические инерциальные датчики*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, 269 с.