

УДК 004.1

Сергій НАДТОЧІЙ
serega96916@gmail.com

Антон ГУДА
atu@nmetau.edu.ua
м. Дніпро

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОТРИМАННЯ ДАНИХ З MEMS СЕНСОРІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЇХ ОБРОБКИ

Проаналізовані існуючі методи обробки даних з MEMS сенсорів, їх недоліки та переваги. В результаті було розроблено систему отримання даних з сенсору та дослідження засобів обробки та фільтрації отриманих даних.

Ключові слова: MEMS сенсори, дослідження, алгоритми фільтрації, побудова системи для досліджень, C++, Arduino, Qt.

Постановка проблеми

MEMS (Micro-Electro Mechanical System) – мікро-електро-механічна система – пристрій який поєднує в собі мікроелектронні та мікромеханічні компоненти. Механічним компонентом може бути мініатюрний інерційний датчик такий як акселерометр, гіроскоп, барометр, магнітометр, який застосовується для детектування позиції пристрою в просторі або мініатюрне дзеркальце яке використовується в проекторах з технологією DLP.

Мікро-електро-механічні пристрої застосовуються у багатьох сферах, навіть можна сказати що вони повсюду та завжди поряд з людиною. Оскільки більша частина населення має смартфони, розумні браслети, трекери стану здоров'я або розумні годинники. У всіх цих пристроях тим чи іншим образом задіюються MEMS пристрої такі як акселерометри, гіроскопи, магнітометри та барометри. Наприклад у телефонах задіюються акселерометр та гіроскоп для детектування куту нахилу смартфона та подальшої зміни куту нахилу інтерфейсу користувача – іконки програм на робочому просторі. Це дозволяє іноді вмістити більше інформації до екрану, або зробити її більш комфортною для читання.

Також у смартфонах, акселерометри та гіроскопи застосовуються сумісно з камерою смартфона, дозволяючи стабілізувати відео чи фото. Оскільки знімаючи відео, лю-

дині дуже складно не робити жодних рухів. Навіть у моменти коли людина просто стоїть вона зазвичай вносить багато мікрорухів до камери. Це може бути наприклад дихання. Коли людина дихає її легені розширюються, розширюється грудна клітина та деяким образом вносить коливання до рук. Також в процесі довгої з'їмки в людини можуть просто втомитися руки від постійної напруги. Та усі ці проблеми може дуже добре вирішувати комбінований MEMS акселерометр та гіроскоп, який в процесі з'їмки буде вимірювати відхили камери, та у протилежному напрямі рухати зображення отримане з камери, таким чином компенсуючи та згладжуючи не бажані мікро-пошатування зображення.

Навігація у смартфонах, зазвичай базується на технологіях GPS та ГЛОНАС. Вони дозволяють отримувати достатньо точні показання положення об'єкту з точністю до декількох метрів. Та для більшої точності отриманих показників можуть використовуватися все ті ж акселерометри, гіроскопи, барометри та магнітометри. Існують також спеціальні алгоритми які дозволяють детектувати події коли людина рухається пішки, та підсчитувати кількість пройдених кроків. Зазвичай коли людина крокує пішки то вона не помічаючи робить так звані відштовхуючі рухи руками. Вони чимось схожі на рухи бігових спортсменів, але з меншою амплітудою.

Тим не менш цих рухів крокуючої людини достатньо для підрахунку кроків. Як вже можна було здогадатися ці алгоритми застосовуються в носимій електроніці, такій як розумні смарт годинники та фітнес браслети, оскільки алгоритми базуються на рухах рук.

Носимі фітнес браслети та смарт годинники мають невелику, досить маленьку батарею та зазвичай дисплей який є основним споживачем енергії цієї батареї. Більшу частину часу, коли носимий пристрій знаходиться на руці, людина їм не користується. Людині може бути потрібним взаємодіяти з пристроєм на руці тільки короткий проміжок часу, наприклад подивитися котра година чи які є для неї повідомлення. Отже можна зробити висновок що більшу частину часу дисплей можна тримати у виключеному, заблокованому стані, та тільки після спеціального жесту вмикати його. Так і вирішили технологічні гіганти Apple та Samsung які виробляють носиму електроніку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Цю проблему розуміють так само й виробники цих пристроїв і вони намагаються вирішити її за допомогою вбудованих систем калібрування та ініціалізації пристрою безпосередньо перед роботою, але вони потребують від системи знаходитися деякий час у покої, що є не допустимим для деяких сфер застосування MEMS сенсорів. Також іноді виробники встановлюють спеціальні со-процесори цифрової обробки сигналів – DSP, вони мають спеціальну архітектуру яка дозволяє досягати найращих результатів у вузько направлених задачах. В MEMS сенсорах застосовуються DSP процесори спроектовані для вирішення задач фільтрації неперервних сигналів, також вони мають спеціальні фільтруючі алгоритми. Та зазвичай вбудована фільтрація – це частина найдорожчого сегменту пристроїв.

Якщо вище перераховані рішення не підходять по причинах високого ціни, поганих результатів фільтрації, потребу-

ють моментального результату роботи без затримки на калібрацію, чи інших. То в такому разі приходять до програмних рішень, а точніше розробці програмного алгоритму фільтрації. Слід зазначити що у програмних фільтрів також є свої плюси та мінуси. Наприклад, при розробці програмного фільтра можна урахувати особливості обраного MEMS сенсора, те як він себе поводить у визначених умовах, та оптимізувати фільтр враховуючи ці параметри. Із недоліків, якщо фільтр реалізується на мікроконтролері, це може потребувати додаткових обчислювальних ресурсів, та оперативної пам'яті, які зазвичай є дуже обмеженими у мікроконтролерів. Слід сказати що це є також дуже важливим аргументом у прийнятті рішення фільтрації, оскільки мікроконтролер може не мати достатніх ресурсів, що спричинить появу додаткового процесора і викличе удорожчення кінцевого пристрою. Та кінцеве удорожчення може викликати і вибір сенсори більш вищого класу.

Постановка завдання

Однією з основних проблем при використанні MEMS сенсорів є отримання точних результатів роботи сенсора. Оскільки система сенсору обов'язково включає в себе механічну систему, то неминуче вона буде вносити інерційні шуми до сигналу, особливо при дуже агресивному використанні, та на великих амплітудах відхилення системи від стану покою. Також, слід зазначити що більша частина MEMS сенсорів заміряє стан «аналогової» системи та оцифровує отримані данні за допомогою АЦП, який теж вносить шуми до отриманого сигналу.

Виклад основного матеріалу

Для пошуку оптимального алгоритму фільтрації, в процесі данної роботи була розроблена система для отримання даних з MEMS сенсора та подальшої фільтрації отриманих даних.

У якості досліджувального зразка було вибрано один з найпопулярніших модулів

MPU-6050. Він складається з 3-х осьового акселерометра та 3-х осьового гіроскопа. Доступні діапазони заміру гіроскопа складають $\pm 250^\circ/\text{s}$, $\pm 500^\circ/\text{s}$, $\pm 1000^\circ/\text{s}$, $\pm 2000^\circ/\text{s}$. Доступні діапазони гіроскопа складають $\pm 2\text{g}$, $\pm 4\text{g}$, $\pm 8\text{g}$, $\pm 16\text{g}$. Виміряні дані оцифровуються за рахунок вбудованого 16-ти бітного ЦАП (аналогово-цифровий перетворювач). Отримати дані безпосередньо з модуля MPU-6050 можна завдяки протоколу I2C (Inter-Integrated Circuit). Модуль самостійно виконує заміри по усім осям та складає оцифровані дані у зарезервовані регістри, до яких можна отримати RO (Read-Only) доступ завдяки шині I2C. Оскільки в процесі отримання даних приймає участь АЦП, то можна сказати що ми маємо ще одне джерело шумів. Майже всі АЦП мають велику зашумленість, при замірах сигналів з малою амплітудою. Це завжди проявляється у молодших бітах отриманих значень. Наприклад шістнадцяти-бітне значення 0b0000 0000 0000 0011 матиме практично даремні біти відзначені як «1». У якості рішення цієї проблеми, у цифрових схемах та мікроконтролерах досить часто застосовують побітовий зсув отриманого числа на декілька бітів у праву сторону, таким чином виключаючи зашумлені біти з отриманого числа. Як результат ми отримуємо два біти потенційного сигналу, та отримуємо сигнал меншої бітності, але більш рівномірний.

Для більш комфортної роботи з модулем MPU-6050 та отриманими даними, було вибрано мікропроцесор ESP8266. Він включає в себе 32-бітний процесор з частотами 80/160 МГц, порти вводу-виводу загального значення, та інтерфейси SPI, I2C, UART, а також, найвагоміше переваження у якості вбудованого Wi-Fi інтерфейсу. Даний мікроконтроллер був вибраний завдяки своїй можливості працювати у Wi-Fi мережі на рівні OSI-4 (Transport Layer). Це дозволяє зчитувати дані з MEMS сенсора, та одразу передавати їх по протоколу UDP на ширококомовний адрес. Таким чином будь який пристрій у локаль-

ній мережі може стати приймачем, та отримувати дані з сенсора і використовувати їх у своїх цілях, не впливаючи на роботу інших пристроїв.

Усі подальші розрахунки будуть на-вмисно проводитись на стаціонарному комп'ютері. ESP8266 мікроконтроллер має достатній потенціал для виконання операцій по фільтрації отриманого сигналу але, на багато зручніше отримувати пакети з даними, з сенсору та фільтрувати їх на стаціонарному комп'ютері, за допомогою високорівневих мов програмування таких як C++. Також, такий підхід значно зменшує час на відладку програми, це просто швидше зробити через відладчик ніж, безпосередньо на мікроконтроллері. Усі вихідні коди та напрацювання по цій темі доступні на веб сторінці: <https://github.com/altucor/diplomaProjects>

У якості досліджуваних алгоритмів фільтрації були вибрані фільтр Калмана та комплементарний фільтр. Та спочатку проаналізуємо чистий, не фільтрований сигнал отриманий з MEMS сенсора. Також слід зазначити що для більш комфортного сприйняття інформації, усі отримані дані будуть конвертуватися у кути нахилу системи. Отже, результат чистого сигналу, який відображає кути нахилу системи в момент покою на рис. 1 та 2.

Відразу ми можемо побачити недоліки акселерометру, який навіть у стані спокою генерує зашумлений сигнал. Та недоліки гіроскопу, який генерує більш гладкий сигнал, але з часом його значення неперервно відхиляються від нуля, «упливають». Отже спробуємо фільтр Калмана.

Фільтр Калмана – рекурсивний фільтр який дозволяє оцінювати стан динамічної системи використовуючи ряд неповних зашумлених значень. Він призначений для рекурсивного дооцінювання системи і на вхід потребує тільки два семпли даних, один семпл поточного стану, та ще один семпл описуючий стан системи на попередній ітерації заміру. Завдяки покроковій природі алгоритму, він дозволяє у реальному часі

досліджувати стан системи, без потреби у майбутніх даних і не призводячи до затримки сигналу. Таким чином фільтр Калмана працює у часовому поданні, а не в частотному як це зазвичай буває в фільтрах. Формула фільтрації неперервного масиву входних даних виглядає таким чином: $A_t = K \times x + (1 - K) \times A_{t-1}$, де A_t – результат фільтрації, K – коефіцієнт фільтрації, x – вхідний сепмпл даних, A_{t-1} – попередній результат роботи фільтру. Як можна побачити на рис. 3 та 4, фільтр Калмана дуже добре вирішив проблему зашумленості сигналів отриманих з акселерометра. А ось значення гіроскопу все також, з часом продовжують відхилятися від нульової координати.

Це відбувається за рахунок того що фільтр Калмана дуже добре реагує на різькі зміни сигналу, але з легкістю пропускає невеликі зміни. Можна сказати що фільтр Калмана працює як LPF – фільтр нижніх частот, який пропускає нижні частоти та відсікає високо-частотний шум. У данному випадку, постійне відхилення значень гіроскопа можна відзначити як коливання безкінечно малої частоти, яке фільтр буде пропускати без перешкод. Отже, можна сказати що даний фільтр, буде дозволяти, з часом накопичувати помилку у системі, що у майбутньому може призвести до поломки обладнання, наприклад безпілотного дрону який буде покладатися на отримані данні.

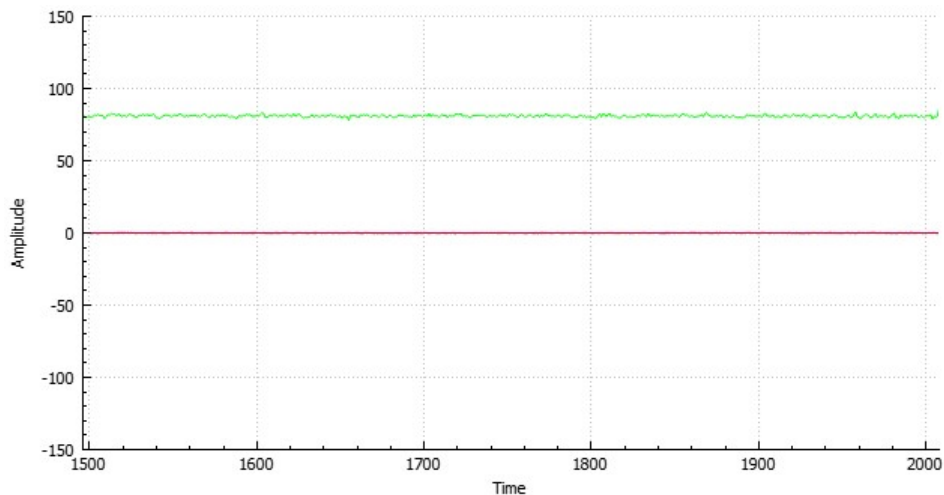


Рис. 1. Показання з акселерометру в момент покою

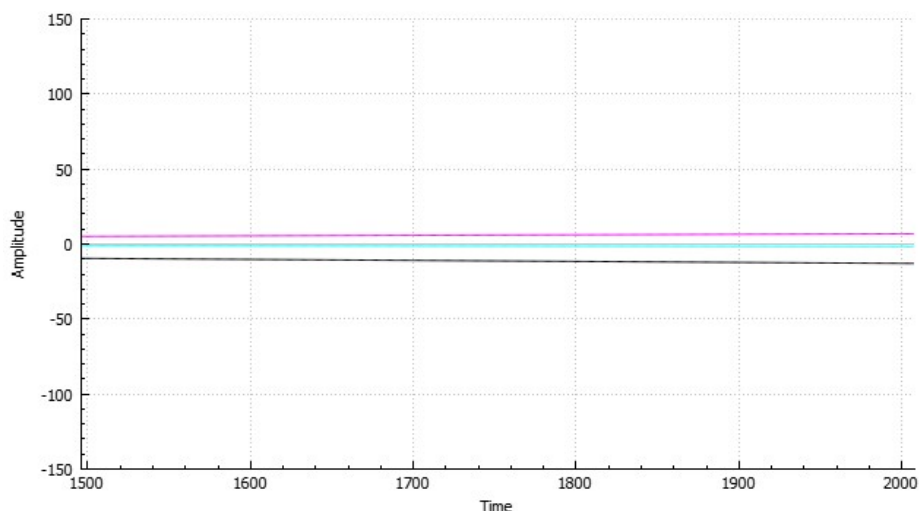


Рис. 2. Показання гіроскопу в момент спокою

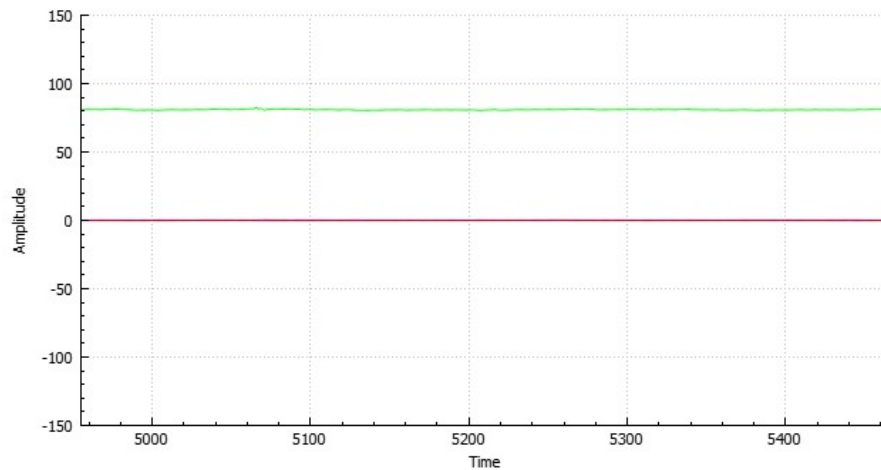


Рис. 3. Результат застосування фільтру Калмана до значень акселерометра

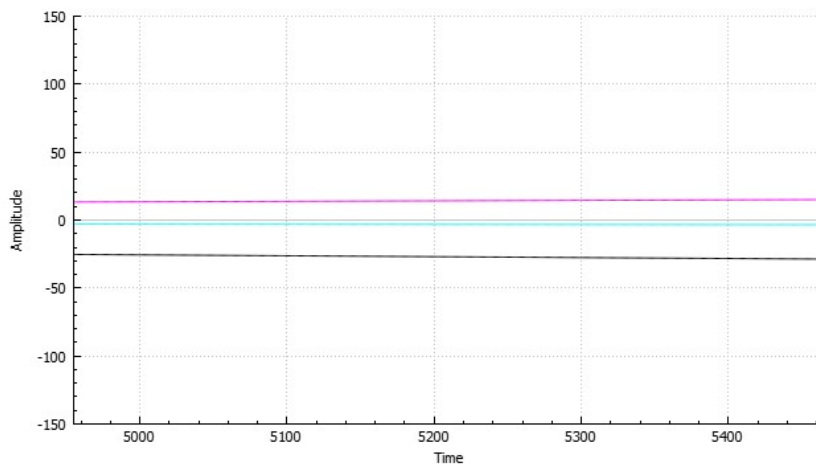


Рис. 4. Результат застосування фільтру Калмана до значень гіроскопа

Перейдемо до компліментарного фільтру (рис. 5). Основна задача компліментарного фільтру – взяти найкраще з акселерометру та гіроскопу. Як показано на рис. 1 та 2, сильною стороною акселерометра є – відсутність дрейфу сигналу (постійного зсуву), а сильна сторона гіроскопу – показання не зашумлених даних. Формула компліментарного фільтру:

$$A_t = (1 - K) \times (A_{k-1} + G_x \times dt) + K + Acc,$$

де A_t – шуканий кут нахилу враховуючий показання акселерометра, A_{k-1} – кут пристрою у попередній момент часу, G_x – швидкість обертання пристрою навколо своєї осі, dt – час який пройшов з моменту попереднього розрахунку, Acc – кут нахилу акселерометра, K – коефіцієнт компліментарного фільтру.

Порівнюємо роботу компліментарного фільтру з попередніми результатами. По перше, оскільки ми фактично змішуємо (мікшуємо) два вхідні сигнали в один, то і як результат роботи фільтру буде отримано 3 вихідні значення, а не 6 як у попередніх дослідженнях. По друге, результат роботи фільтру дійсно задіює всі сильні сторони кожного з сенсорів.

Також, порівнюємо результати роботи сенсору з фільтрами та без, у моменти руху пристрою. У якості тестових рухів пристрій буде відхилятися по одній осі у діапазоні від -90° до 90° . Першими проведемо заміри без фільтрації. Як можемо побачити амплітуда шумів у сигналі акселерометра на рис. 6 досягає 40° . На рис. 7 по сигналу гіроскопа можна побачити, що система

дійсно відхиляється досить лінійно, та без будь яких різких рухів.

Результат роботи фільтру Калмана тільки підтверджує попередні дослідження

(рис. 8-9). Показники акселерометру досить не погано фільтруються, але показники гіроскопу все також будуть безперервно відхилятися від нульової координати.

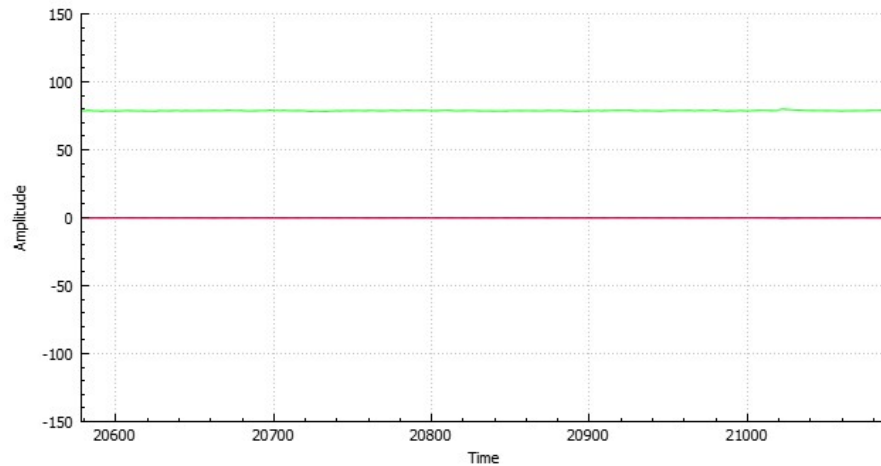


Рис. 5. Результат роботи комплементарного фільтру у стані спокою.

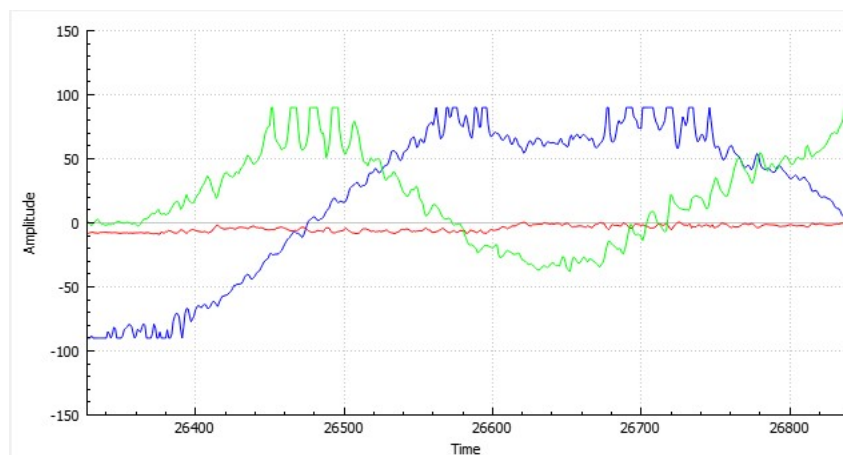


Рис. 6. Результат не фільтрованих даних з акселерометру

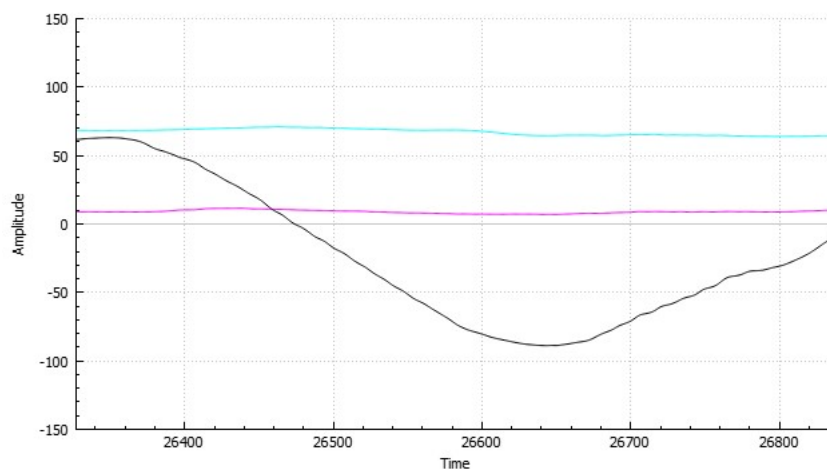


Рис. 7. Результат не фільтрованих даних з гіроскопу під час руху

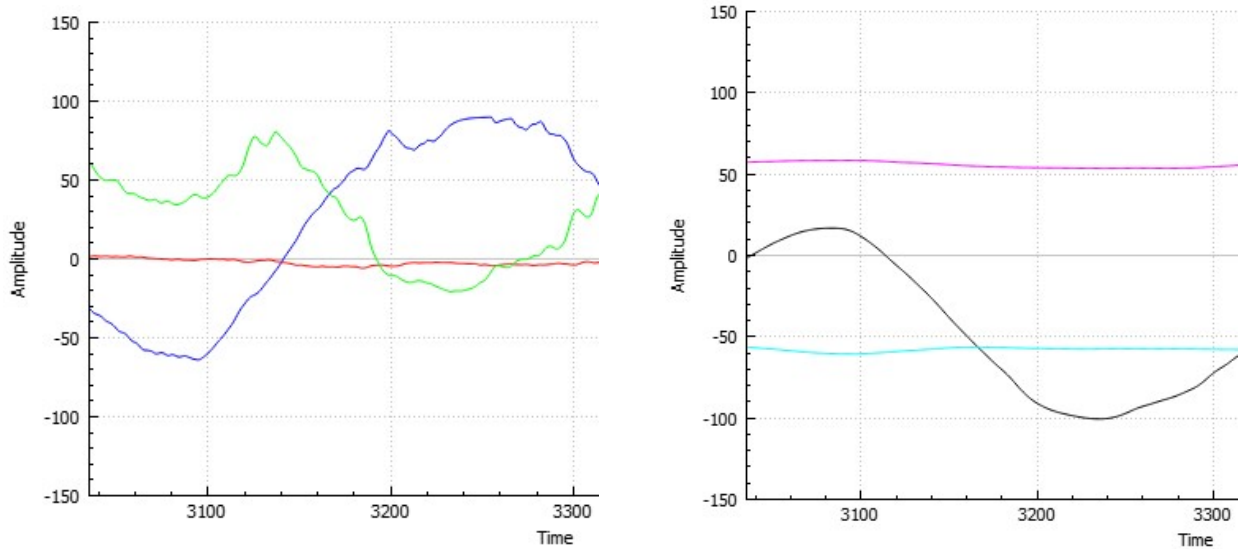


Рис. 8. Результат роботи фільтра Калмана під час руху пристрою, зліва акселерометер, зправа гіроскоп

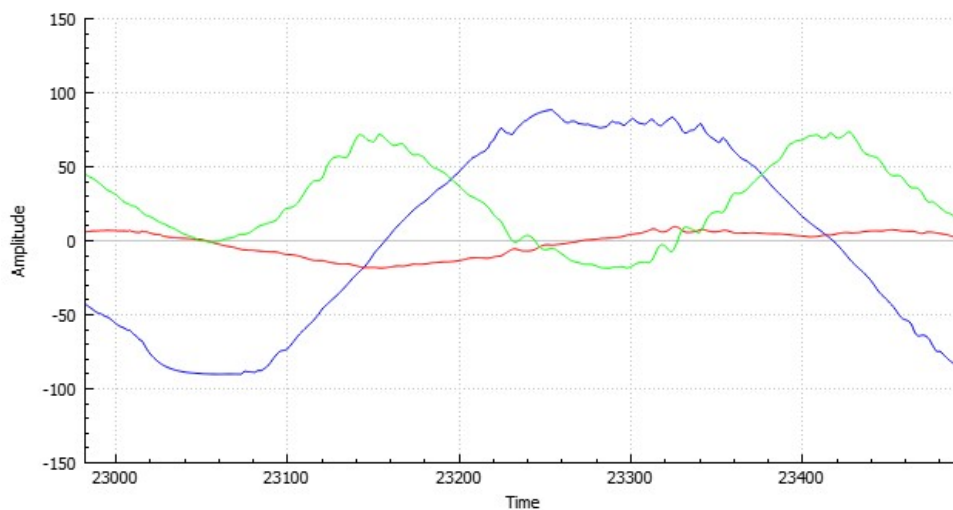


Рис. 9. Результат роботи комплементарного фільтра під час руху

Результат роботи комплементарного фільтра також показує результат суміщення найкращих показників двох сенсорів у єдиний сигнал.

Таким чином можна сказати що комплементарний фільтр є найкращим вибором для фільтрації показників інерційних сенсорів. Оскільки суміщує тільки переваги обох сенсорів, потребує не дуже складних обчислювань для мікроконтролера і займає не багато оперативної пам'яті.

Висновки і перспективи досліджень

1. У роботі були проаналізовані основні сфери застосування MEMS сенсорів, та недоліки під час отримання чистого сигналу.
2. Було розроблено систему отримання даних з сенсора. Імплементовано алгоритми фільтрації та візуалізації отриманих даних.
3. Було запропоновано методи вирішення даних недоліків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. MPU-6050 datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://arduino.ua/docs/RM-MPU-6000A.pdf>
2. ESP8266 [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://esp8266.ru/>
3. Протокол I2C [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>
4. Фільтр Калмана [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80_%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D0%B0
5. Комплементарний фільтр [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://robotclass.ru/articles/complementary-filter/>
6. Комплементарний фільтр [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.porobot.ru/home/komplementarnyjfiltr>
7. Мережева модель OSI [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D1%82%D0%B5%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C_OSI

Serhii NADTOCHII, Anton GUDA
Dnipro

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR OBTAINING DATA FROM MEMS SENSORS AND RESEARCHING METHODS FOR THEIR PROCESSING

One of the main problems during usage MEMS sensors it is getting clear, not noisy, measured values. Since all MEMS sensors has mechanical part, they're by default produce kind of noise, because mechanical part is an inertial system which cannot react immediately on external influences. Also a lot of MEMS sensors use ADC converters for measuring analog part of the system, which also adds its self-noise.

Keywords: MEMS sensors, research, filtration algorithms, electronic hardware development, C++, Arduino, Qt.

Стаття надійшла до редколегії 12.10.2018