

Розробка системи відстеження рухів людини

Ярошенко М.О.

e-mail: gmaximum091@gmail.com

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» www.kpi.ua

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури keoa.kpi.ua

Київ, Україна

Анотація— В даній роботі розглянуто основні аспекти, необхідні для розробки системи відстеження рухів людини. Проведено аналіз літературних даних, серед яких є приклади аналогічних систем та описи технологій, що найчастіше використовуються для відстеження рухів. Наведені мінімальні теоретичні відомості по калібрації та обробці даних від інерційних давачів прискорення (акселерометр) та кутової швидкості (гіроскоп). Розроблена загальна структурна схема системи відстеження рухів людини. Розглянуто можливість інтеграції системи в популярні програмні пакети для роботи із 3D-графікою.

Ключові слова — відстеження руху; інерційні давачі; фільтр Калмана.

I. ВСТУП

В наш час відстеження рухів (також відоме як «захоплення руху») людини широко застосовується в робототехніці, кіноіндустрії та медицині. Для відстеження та запису положення та орієнтації частин людського тіла застосовуються два класи систем: оптичні, що використовують камери для запису рухів, та неоптичні, що обробляють дані з сенсорів, розташованих на людському тілі. Неоптичні системи мають декілька переваг порівняно із оптичними: відсутність обмеження за простором (при застосуванні оптичних систем людина має завжди знаходитись в полі зору камер) та низька ціна.

II. МЕТА

Розробити структурну схему, визначити мінімальні теоретичні відомості, необхідні для розробки системи відстеження рухів людини; виконати пошук популярних програмних пакетів, в які можлива інтеграція подібної системи.

III. АКТУАЛЬНІСТЬ

Актуальність даної статті обумовлена необхідністю створення, вдосконалення та поширення дешевих систем відстеження рухів. Незважаючи на те, що дослідження в даному напрямку ведуться не перше десятиріччя, подібні системи доволі рідко застосовуються за межами медіаіндустрії та поодиноких дослідницьких проєктів.

IV. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для визначення положення в просторі зазвичай застосовується акселерометр, а для визначення орієнтації – гіроскоп. Точність отриманих даних може бути підвищена замірами магнітометра. Такий підхід є найбільш розповсюдженим [1-3]. Задля збільшення

мобільності тієї частини системи, що її надягає людина, пріоритетним має бути використання бездротових технологій на кшталт Wi-Fi або Bluetooth. Важливим аспектом також є створення програмного забезпечення для збереження записаних рухів та інтерфейсу із популярними програмними пакетами, такими як Blender, Maya, Unreal Engine 4, Unity та ін.

Оскільки основними елементами системи обрано дешеві інерційні МЕМС-давачі, то постає проблема їх калібрації та фільтрації шумів. Найбільшими недоліками цього класу сенсорів є істотна потужність шуму, перехресний зв'язок між даними по кожній з осей та зміна певних параметрів від пуску до пуску [4]. Розповсюдженими методами визначення характеристик акселерометрів та гіроскопів є метод тестових поворотів [4,5]. Також в [5] запропоновано скалярні методи калібрації акселерометрів та гіроскопів. Такі алгоритми зазвичай не замінюють собою стандартні методи калібрації, але мають високі вимоги до тестувальної апаратури.

Для вирішення проблем фільтрації параметрів динамічної системи найчастіше використовують фільтр Калмана [6]. Існує декілька його варіацій: розширений фільтр Калмана [7] (використовується для нелінійних процесів), комплементарний фільтр Калмана [1,8]. Зазначені фільтри використовують математичну модель досліджуваної системи у вигляді системи рівнянь. Для спрощення розрахунків найчастіше використовують лінійну математичну модель давачів [4].

Необхідним компонентом системи є програмне забезпечення, основною метою розробки якого є забезпечення зв'язку між апаратною частиною системи та програмним пакетом, що використовуватиме дані про рухи людини. Деякі програми, наприклад, Unreal Engine 4, мають інструменти для створення користувацьких модулів для розширення та перенесення



функціоналу між проектами та версіями ПЗ [9]. Ця властивість може бути застосована для спрощення створення необхідного ПЗ. Але цей підхід обмежить використання системи одним програмним пакетом.

V. СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ ВІДСТЕЖЕННЯ РУХІВ ЛЮДИНИ

Розроблювана апаратна частина системи повинна складатися із блоків МЕМС-гіроскопів та акселерометрів, блоків обробки замірів, передавачів та приймачів даних для передачі їх до ПК (Рис.1).

Для забезпечення швидкої фільтрації даних, ремонтпридатності та оптимальності за розміром, систему розбито на однакові незалежні модулі відстеження рухів (Рис.1). Кожен модуль складається із блоку давачів, блоку обробки замірів та безпроводного приймача/передавача, змонтованих на одній друкованій платі. В якості блоку давачів може бути або декілька окремих мікросхем сенсорів, або збірка декількох сенсорів в одному корпусі (наприклад, MPU9250 [10]). Обробку виміряних даних можна здійснювати на мікроконтролері або ПЛІС. Передача і прийняття даних покладаються на Wi-Fi або Bluetooth модуль. В такому випадку в системі може бути відсутній окремий передавач для ПК, оскільки більшість сучасних комп'ютерів мають вбудовані модулі бездротового зв'язку.

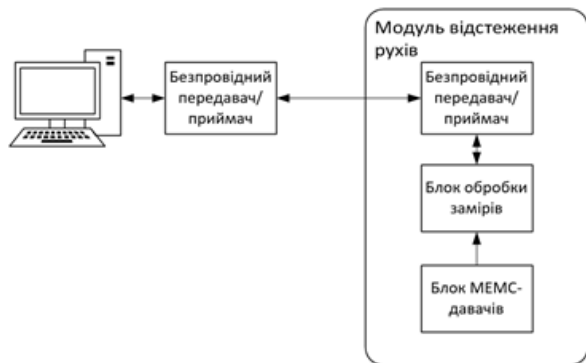


Рис.1 Приклад структурної схеми для одного модуля відстеження рухів.

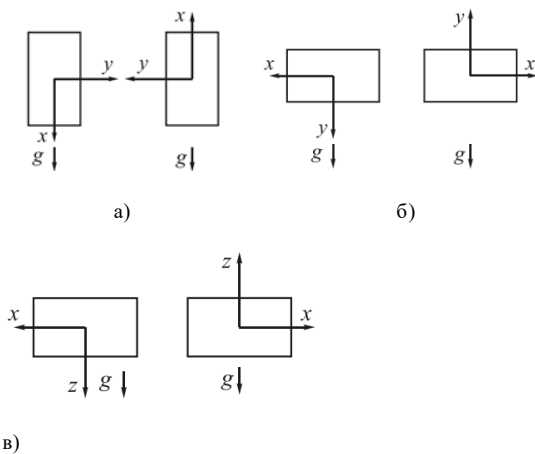


Рис.2. Положення акселерометра для визначення: а) масштабного коефіцієнту для осі Ox [5]; б) коефіцієнту перехресного зв'язку із проекцією прискорення на вісь Oy [5]; в) коефіцієнту перехресного зв'язку із проекцією прискорення на вісь Oz [5].

VI. ЗАМІРИ ТА ЇХ ОБРОБКА

До початку роботи із сенсорами, вони мають бути відкалібровані. Цей етап має велике значення для точності роботи всієї системи, оскільки МЕМС-давачі є відносно грубими (приклад порівняння МЕМС-гіроскопу із волоконно-оптичним гіроскопом наведено в [11]) сенсорами.

Для побудови залежності вихідного сигналу акселерометру від прискорення (1) потрібні статичні випробування давача за методом тестових поворотів [5].

$$\begin{cases} u_x = k_{xx}a_x + k_{xy}a_y + k_{xz}a_z + u_{x0} \\ u_y = k_{yx}a_x + k_{yy}a_y + k_{yz}a_z + u_{y0} \\ u_z = k_{zx}a_x + k_{zy}a_y + k_{zz}a_z + u_{z0} \end{cases} \quad (1)$$

де $u_{x,y,z}$ – вихідні сигнали по осях Ox , Oy та Oz відповідно; $a_{x,y,z}$ – проекції прискорення a ; k_{ii} ($i = x,y,z$) – масштабні коефіцієнти; k_{ij} ($i,j = x,y,z, i \neq j$) – коефіцієнти перехресного зв'язку, u_{i0} ($i = x,y,z$) – нульовий сигнал. Статичну калібрацію виконують в гравітаційному полі Землі за допомогою оптичної ділильної головки. Суть методу полягає у вимірюваннях вихідних сигналів в двох положеннях, що відрізняються на 180° та розрахунку на їх основі масштабних коефіцієнтів, коефіцієнтів перехресного зв'язку та нульових сигналів. Приклади положень акселерометра для розрахунку по осі Ox наведені на Рис.2.

Розрахунок істинних вихідних значень гіроскопу є більш складним, оскільки гіроскоп є чутливим до прискорень по осях вимірювань (так званий від «дрейф g ») [12]. В якості прикладу наведено формулу розрахунку для визначення істинної кутової швидкості по осі Oz :

$$U_{\omega z} = k_z \omega_z + k_{zx} \omega_x + k_{zy} \omega_y + U_{\omega z 0} + b_{zx} a_x + b_{zy} a_y + b_{zz} a_z + n_{\omega z}$$

де $U_{\omega z}$ – істинна кутова швидкість; k_z – масштабний коефіцієнт; k_{zx} , k_{zy} – коефіцієнти перехресного зв'язку; $U_{\omega z 0}$ – зміщення нуля гіроскопу; b_{zx} , b_{zy} , b_{zz} – коефіцієнти чутливості нульового сигналу гіроскопу до прискорень («дрейф від g »); a_x , a_y , a_z – проекції уявного прискорення на осі чутливості гіроскопів.

Калібрування гіроскопу виконується в два етапи: визначення масштабного коефіцієнту та коефіцієнтів перехресного зв'язку на обертальному стенді, другий етап – визначення коефіцієнтів чутливості нульового сигналу до прискорень на оптичній ділильній голівці.

На основі отриманих рівнянь сенсорів будується модель системи для подальшого визначення положення та орієнтації в навігаційному просторі. Оскільки інформація про кутові швидкості зазвичай надходить від гіроскопу у вигляді кутів Ейлера-Крилова, то при їх обробці виникають нелінійні перетворення, що тягне за собою більш жорсткі вимоги до швидкості розрахунків. Також, при деяких значеннях куги Ейлера-Крилова мають властивість вироджуватись. Виходячи з цих проблем більш оптимальним буде використання кватерніонів або напрямних косинусів.

Також при розрахунках положення та орієнтації тіла [13] накопичується помилка інтегрування. Для компенсації цих негативних ефектів зазвичай використовують фільтр Калмана. Перевагами застосування цього фільтру є можливість використання різних представлень орієнтації: кути Ейлера-Крилова, матриця напрямних косинусів або кватерніонів. Різні фільтри, що можуть використовуватись для системи відстеження рухів людини наведені в [1,8,14]. Докладний приклад розрахунку фільтру Калмана наведено в [15].

VII. ПЕРЕДАЧА ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ДАНИХ

Для безпроводної передачі даних найбільш оптимальним вибором буде технологія Wi-Fi або Bluetooth. Ціна на Bluetooth-передавачі є нижчою за Wi-Fi модулі, що є важливим при створенні великої кількості автономних модулів відстеження руху. Також зараз доступні Bluetooth-модулі із внутрішньою антеною (наприклад, [16]) для значної економії місця на друкованій платі. Потужність сигналу подібних модулів дозволяє передавати інформацію на відстань більше 10 метрів, що для відстеження рухів має бути достатньо. Модулі бездротового зв'язку не обов'язково включати в кожний автономний модуль відстеження рухів: можна розробити окремий модуль, що буде зчитувати інформацію із автономних модулів відстеження рухів за допомогою інтерфейсів I²C, SPI, UART або ін., та передавати отримані дані на ПК.

Багато спеціалізованих програм для роботи з 3D-графікою мають вбудовані компоненти для потокового запису анімації з камер або зі спеціального обладнання. Деякі програми надають користувачеві можливість самому розробити додаток до основного пакету програм. Наприклад, Unreal Engine 4 дозволяє створити додаток, що забезпечує інтерфейс між СОМ-портом та розроблюваним на його основі програмним забезпеченням (відеоурою, симуляцією) [17].

ВИСНОВКИ

Наступним етапом роботи є розробка на базі отриманої структурної схеми та теоретичних основ роботи із давачами прототипів модулів захоплення руху людини та програмного забезпечення, що дозволить їх налагоджувати. Описані рекомендації мають загальний характер і мають на меті ознайомлення читача із необхідними аспектами розробки систем на основі інерційних сенсорів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Z. B. Wang, L. Yang, Z. P. Huang, J. K. Wu, Z. Q. Zhang, and L. X. Sun, "Human motion tracking based on complementary Kalman filter," *2017 IEEE 14th Int. Conf. Wearable Implant. Body Sens. Networks, BSN 2017*, pp. 55–58, 2017, DOI: [10.1109/BSN.2017.7936006](https://doi.org/10.1109/BSN.2017.7936006)
- [2] M. Kok, J. D. Hol, and T. B. Schön, "An optimization-based approach to human body motion capture using inertial sensors," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 19, pp. 79–85, 2014, DOI: [10.3182/20140824-6-ZA-1003.02252](https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02252)
- [3] S. Shen, M. Gowda, and R. Roy Choudhury, "Closing the Gaps in Inertial Motion Tracking," in *24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2018, pp. 429–444, DOI: [10.1145/3241539.3241582](https://doi.org/10.1145/3241539.3241582)
- [4] V. V. Avrutov, P. M. Bondar, and V. V. Meleshko, *Mikroakselometriya ta yikh vyprovuvannya: Navchal'nyy posibnyk [Microaccelerometers and their tests: A manual]*. Kyiv: Korniyuchuk, 2008, ISBN: 978-966-7599-51-5
- [5] V. V. Avrutov, *Ispytaniya inertsiyal'nykh priborov: Uchebnoye posobiye [Tests of inertial instruments: Tutorial]*. Kyiv: NTUU "KPI," 2016.
- [6] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *J. Basic Eng.*, vol. 82, no. 1, p. 35, 2011, DOI: [10.1115/1.3662552](https://doi.org/10.1115/1.3662552)
- [7] G. Welch, "An introduction to the Kalman filter," *Univ. North Carolina Chapel Hill, Chapel*, pp. 1–16, 1995
- [8] L. E. Ott, "Kalman filter with complementary constraint and integrated navigation systems applications," Iowa State University, 1971.
- [9] "Plugins," *Unreal Engine 4 documentation*. [Online]. Available: <https://docs.unrealengine.com/en-us/Programming/Plugins>.
- [10] *MPU-9250 Product Specification*, PS-MPU-9250A-01, 2016. URL: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>
- [11] D. V. Shelaev, "Comparison of MEMS and Optical-fiber Gyroscopes," *Geoprofi*, no. 6, pp. 49–54, 2012.
- [12] O. I. Nesterenko and V. Y. Balanchuk, "novitni prylady ori-yentatsiyi ta navihatsiyi: Laboratornyy praktykum [new instruments of orientation and navigation: Laboratory Workshop]." NTUU "KPI," Kyiv, p. 74, 2012.
- [13] V. V. Meleshko and O. I. Nesterenko, *Besplatformennyye inertsiyal'nyye navigatsionnyye sistemy. Uchebnoye posobiye [Free inertial navigation systems. Tutorial]*. Kirovograd: POLIMED - Service, 2011.
- [14] R. McGhree, E. Bachman, X. Yun, and M. Zyda, *Real-Time Tracking and Display of Human Limb Segment Motions Using Sourceless Sensors and a Quaternion-Based Filtering Algorithm - Part I: Theory*. Monterey: Naval Postgraduate School, 2000.
- [15] D. N. Lavrov and A. A. Kondyurina, "Opredeleniye trayektorii dvizheniya priyomnika sistemy obnaruzheniya nesanktsionirovanno ustanovlennoy tochki besprovodnogo dostupa [Determination of the motion path of the receiver of the detection system of an unauthorized wireless access point]," *Math. Struct. Model.*, vol. 41, no. 1, pp. 75–87, 2017.
- [16] "Blue Gecko BGM121 Bluetooth Module - SiP." [Online]. Available: <https://www.silabs.com/products/wireless/bluetooth/bluetooth-low-energy-modules/bgm121-bluetooth-sip-module#table>.
- [17] UE4Duino: Unreal Engine 4 plugin for Arduino (COM port) communication on Windows. GitHub. URL: <https://github.com/RVillani/UE4Duino>



УДК 004.358

Разработка системы отслеживания движений человека

Ярошенко М.А.

e-mail: gmaximum091@gmail.comКафедра конструирования электронно-вычислительной аппаратуры keoa.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» www.kpi.ua

Киев, Украина

Аннотация — В данной работе рассмотрены основные аспекты, необходимые для разработки системы отслеживания движений человека. Проведен анализ литературных данных, среди которых есть примеры аналогичных систем и описания технологий, которые наиболее часто применяются для отслеживания движений. Приведены минимальные теоретические сведения по калибровке и обработке данных от инерционных датчиков ускорения (акселерометр) и угловой скорости (гироскоп). Разработана общая структурная схема системы отслеживания движений человека. Рассмотрена возможность интеграции системы в популярные программные пакеты для работы с 3D-графикой.

Ключевые слова — отслеживание движения; инерционные датчики; фильтр Калмана.

UDC 004.358

Developing of the human motion tracking system

M. A. Yaroshenko^f,e-mail: gmaximum091@gmail.comDepartment of Design of Electronic Digital Equipment keoa.kpi.ua

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» www.kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract — This paper discusses the main aspects necessary for developing a human motion tracking system. Such kind of system is widely used in the media industry for animating 3D-models. This technology also finds application in robotic engineering and medicine, however, less than in media. From the two main types of movement tracking systems - optical and non-optical – the latter was chosen because of its relatively low price and less demand for free space. MEMS-based sensors were selected for non-optical system development because of their affordable price, small size and market demand. Relevant sources analysis was conducted to define the technologies typically used for movement tracking and to find examples of similar systems. The theoretical part of the paper briefly describes the process of calibration of the inertial acceleration sensors (accelerometers) and angular velocity sensors (gyroscopes). The Kalman filter works with data filtration and processing because of its flexibility and low demands for calculating memory, which is important for on-line data processing. The general diagram of the system shows the essential parts of the wireless motion tracking system. Also, the possibility of integrating the system into popular software packages for working with 3D graphics was taken into consideration.

Keywords — motion tracking; inertial sensors; Kalman filter.

