



РАДІОЕЛЕКТРОНІКА

ПРИСТРОЇ ТА МОДЕЛІ МАГНІТНОГО ТРЕКІНГУ ДЛЯ СИСТЕМ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

Р. Голяка, Т. Марусенкова, М. Хільчук

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Відповідальний за рукопис: Роман Голяка (e-mail: roman.l.holiaka@lpnu.ua).

(Подано 8 грудня 2021)

Розглянуто проблематику побудови сигнальних перетворювачів магнітного трекінгу для систем доповненої реальності. Інформативні сигнали систем магнітного трекінгу описуються функціональними залежностями, основні аргументи яких – відстань між актюаторними та сенсорними котушками та кути їх взаємного нахилу. Для розрахунку просторового положення використовують математичні моделі, які описують розподіл сформованих актюаторними котушками магнітних полів та сигналів сенсорних котушок. Сигнальний перетворювач пристроїв магнітного трекінгу розроблено на основі програмованої системи на кристалі PSoC сім'ї 5LP Family Cypress Semiconductor. Наведено результати експериментальних досліджень сімей сигналів у разі зміни відстані між котушками та кутів їх взаємного положення.

Ключові слова: *магнітний трекінг; вбудована система; сенсор доповненої реальності.*
УДК 621.382

1. Вступ

Системи магнітного трекінгу (Magnetic Tracking, MT) – це новітній напрям розвитку сенсорів вимірювання просторового положення у концепціях віртуальної (Virtual Reality, VR) та доповненої (Augmented Reality, AR) реальності [1]. Вимірювання виконують за допомогою індуктивних котушок, які формують систему взаємопов'язаних пар – актюаторів та сенсорів. Актюаторні котушки формують АС (Alternative Current) магнітні поля низькочастотного спектра, а сенсорні – генерують зумовлену цими полями електрорушійну силу (напругу змінного струму). Відтак іншою назвою цього методу є електромагнітний трекінг (Electromagnetic Tracking, EMT) [2].

Істотні переваги систем магнітного трекінгу відносно систем оптичного трекінгу – можливість функціонування поза зоною прямого бачення. Щодо систем інерційного трекінгу перевагами систем магнітного трекінгу є високоточного вимірювання просторового положення сенсорів у сформованій матрицею актюаторів системі координат та відсутність похибок, спричинених часовим дрейфом сигналів акселерометрів [3] та гіроскопів [4].

Сучасними рішеннями систем магнітного трекінгу в концепціях VR та AR є: універсальний фреймворк (framework) ARIoT у концепціях доповненої реальності та Інтернету речей (Internet of Things, IoT) [5]; концепція синтезу даних (Data Fusion) у медичних пристроях візуалізації (Medical Imaging) [6]; пристрої навігації хірургічних інструментів у медичній апаратурі [7]; технології біомедичної інженерії, зокрема, для моніторингу кінематики обличчя [8]; засоби мехатроніки гнучких роботів [9] тощо.

У роботі проаналізовано сигнали та розроблено пристрої магнітного трекінгу для систем доповненої реальності. Наведені в цій публікації результати є частиною робіт зі створення апаратно-програмних засобів магнітного трекінгу – Magnetic Tracking System Integrated Development Environment (MTS IDE), яким займається наш колектив у межах низки наукових та прикладних проєктів. Це, зокрема, розроблення костюмів трекінгу рухів людини, стрічкових та площинних вимірювачів форми, інструментальних трекерів мікрохірургії в концепції доповненої реальності.

2. Аналіз проблеми та постановка задачі

Принцип функціонування сенсорних систем магнітного трекінгу ґрунтується на визначенні просторового положення об'єктів за результатами вимірювання вектора індукції опорних магнітних полів у низькочастотному спектрі електромагнітного випромінювання. Переважно сенсорами та актюаторами в таких вимірювальних системах слугують малогабаритні котушки та їх двовимірні 2D (2-Dimension) чи тривимірні 3D (3-Dimension) збірки (рис. 1).

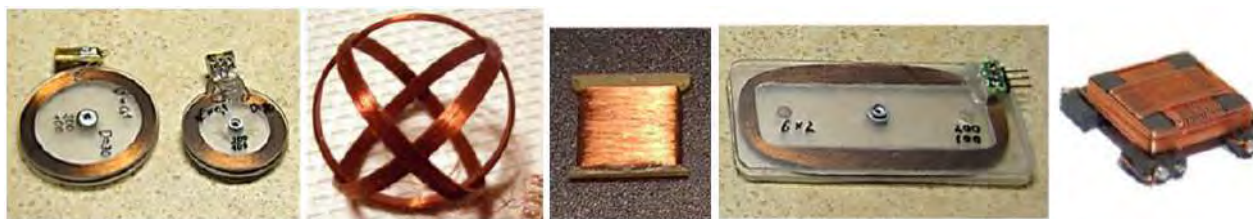


Рис. 1. Планарні (1D) та тривимірні (3D) котушки систем магнітного трекінгу

Інформативні сигнали взаємного положення у парах “актюатор-сенсор” описуються функціональними залежностями, основними аргументами яких є коефіцієнт індуктивного взаємозв'язку в парі та, власне, вимірювальні величини трекінгу - відстань між котушками та їх нахил однієї відносно іншої. Для розрахунку просторового положення використовують математичні моделі розподілу сформованих низькочастотних магнітних полів. Ці моделі синтезують на основі теоретичних припущень та результатів експериментальних досліджень. Різновидом математичних моделей є сигнальні моделі, які описують залежність сформованих вимірювальною системою сигналів від просторового положення та нахилу сенсорної котушки в системі координат актюаторної котушки [10].

Просторовий розподіл магнітного поля котушки актюатора (Actuator) та розміщення в цьому полі котушки сенсора (Sensor) в площині (2-Dimension) наведено на рис. 2, а взаємне розміщення цих котушок – на рис. 3.

Розглядають опорну та рухому системи координат. Опорну систему координат задають просторовим положенням актюаторної, а рухому – сенсорної котушок. Для спрощення викладеного далі аналізу обмежимося розглядом двовимірних 2D (площинних) систем координат. Площина котушки актюатора розміщена паралельно до осі X_A , а її нормаль N_A збігається із віссю Y_A . Нахил котушки актюатора визначається кутом θ . Нахил площини сенсорної котушки відносно рухомої системи координат $X_S Y_S$ визначається кутом α . Якщо $\alpha = 0$, площина P_S сенсорної котушки збігається із віссю X_S , а її нормаль – із віссю Y_S .

З метою побудови сенсорних пристроїв магнітного трекінгу необхідно встановити аналітичні закономірності просторового розподілу значень нормальної B_N та тангенціальної B_T проєкцій вектора індукції магнітного поля. Ці проєкції визначаються модулем індукції поля $B_M = \sqrt{B_N^2 + B_T^2}$ на відстані L_{SA} між сенсорною та актюаторною котушками та кутом θ між вектором, що з'єднує центри цих котушок, та площиною котушки актюатора. Максимальні значення нормальної B_N проєкції та нульові значення тангенціальної B_T проєкції спостерігаються вздовж осі Y_A , натомість вздовж осі X_A – нульові значення B_N та максимальні значення B_T .

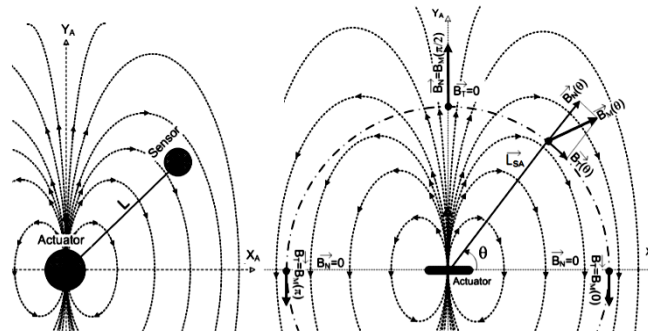


Рис. 2. Просторовий розподіл магнітного поля у площині

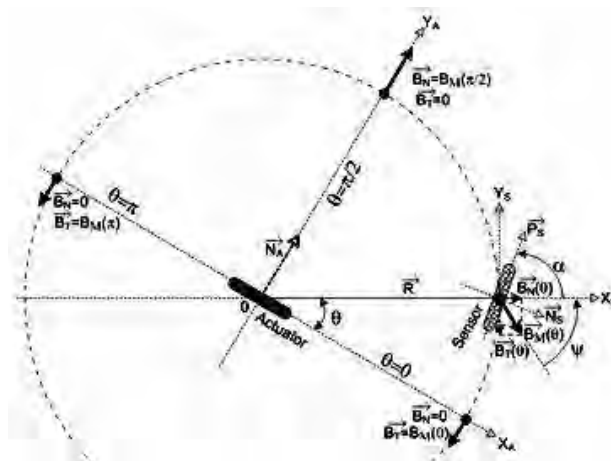


Рис. 3. Взаємне розміщення котушок у площині

Індукція поля актюатора характеризується магнітним моментом $M_A = N_A I_A A_A$, значення якого задається добутком кількості витків, струму I_A та площі A_A котушки актюатора [10]. З урахуванням цього параметра нормальна B_N та тангенціальна B_T проєкції індукції магнітного поля визначаються оберненою кубічною функцією відстані L_{SA} між сенсорною та актюаторною котушками та кутом θ :

$$B_N = \frac{k_{SA} M_A}{L_{SA}^3} \cos(\theta), B_T = \frac{k_{SA} M_A}{2L_{SA}^3} \sin(\theta), \quad (1)$$

де k_{SA} – коефіцієнт пропорційності.

Інформативний сигнал просторового положення у системах магнітного трекінгу отримують, селективно вимірюючи корисну складову напруги, що формується на виводах сенсорної котушки та визначається вищезгаданим просторовим розподілом опорного магнітного поля. Селективне вимірювання передбачає підсилення напруги сенсорної котушки, її синхронне детектування, фільтрування та подальше перетворення методами цифрової обробки сигналу. Системи магнітного трекінгу – це багатоканальні апаратно-програмні засоби, що містять оптимізовані під конкретну специфіку задачі набори 1D, 2D та 3D сенсорних та актюаторних котушок, вузли аналогового фронт-енду, комутатори, аналого-цифрові перетворювачі, мікропроцесори тощо. Кількість та взаємне розміщення котушок у цих наборах повинні забезпечувати можливість розрахунку просторового положення із заданою точністю та діапазоном вимірювання.

Проблематика цієї роботи зумовлена необхідністю створення програмного забезпечення для розрахунку координат просторового положення об'єктів із урахуванням характерних (специфічних) похибок вимірювання сигналів, що виникають у сенсорних системах магнітного трекінгу. Такі похибки спричинені відхиленням значень реальних сигналів від їх визначених сигнальною моделлю

номінальних значень. У системах магнітного трекінгу такі похибки можна класифікувати на чотири типи: ER1 – амплітудна чи/та фазова неузгодженість; ER2 – електромагнітні завади; ER3 – зміщення (off-set) базового рівня; ER4 – обмеження сигналу.

Причиною похибок типу ER1 є відхилення параметрів котушок від їх номінальних значень, зокрема, кількості витків, площі, форми тощо. В 2D та 3D збірках причиною цих похибок є відхилення кутів взаємного повороту котушок. Номінально котушки в збірках повинні розміщуватися під прямими кутами. Завдання мінімізації похибок вирішується підвищенням точності виготовлення та уточненням параметрів під час калібрування.

Похибки типу ER2 зумовлені електромагнітними завадами сторонніх (паразитних) джерел випромінювання, здебільшого – силових ліній та трансформаторів мережі живлення, перетворювачів вторинних джерел живлення, пристроїв радіозв'язку тощо. Рівень цього типу похибок визначається співвідношенням сигнал – шум. Оскільки амплітуда інформативного сигналу в системах магнітного трекінгу визначається оберненою кубічною функцією відстані L_{SA} між сенсорною та актюаторною котушками, співвідношення сигнал – шум різко зменшується зі збільшенням відстані L_{SA} . Саме ця обставина обмежує дальність магнітного трекінгу. Частково завдання збільшення дальності вирішується збільшенням магнітного моменту котушок та методами завадостійкого синхронного детектування.

Похибки типу ER3 спричинені паразитним взаємозв'язком між вхідними та вихідними сигнальними колами сенсорної системи. Оскільки в системах магнітного трекінгу співвідношення між вихідними сигналами актюаторних котушок та вхідними сигналами сенсорних котушок досягає шести порядків і більше, проблема мінімізації паразитного взаємозв'язку дуже актуальна. Часткове вирішення цієї проблеми ґрунтується на якісному екрануванні сигнальних кіл та електромагнітній розв'язці земляних контурів цих кіл.

Похибки типу ER4 спричинені обмеженням амплітуди сигналу за малих відстаней між сенсорною та актюаторною котушками. Рівень такого обмеження визначається допустимим розмахом напруг у сигнальних колах і типово не перевищує кількох вольт. Особливо актуальна проблема обмеження сигналів у новітній сенсорній апаратурі, що задовольняє вимоги живлення від низьковольтних (3 В і менше) однополярних джерел живлення. Зокрема, це пристрої у концепції Інтернету речей. Часткове вирішення цієї проблеми ґрунтується на динамічному перемиканні коефіцієнта підсилення вхідного сигналу та використанні аналогової компресії сигналу логарифмічними підсилювачами.

Отже, сигнальний аналіз у сенсорних пристроях магнітного трекінгу з урахуванням їх характерних похибок має вагомe значення для підвищення точності функціонування цих систем. Виконання такого аналізу потребує створення сигнальної моделі та використання цієї моделі для встановлення закономірностей між точністю вимірювання просторового положення та відстанню між сенсорною та актюаторною котушками.

3. Сигнальна модель

Подана в роботі сигнальна модель ґрунтується на результатах експериментальних досліджень, мова про які піде в наступному підрозділі. Відповідно до отриманих експериментальних даних максимальне значення нормальної проєкції B_{NM} індукції магнітного поля вдвічі більше від максимального значення тангенціальної проєкції B_{TM} . Відтак запишемо їх значення у нормованому вигляді:

$$B_{NM} = B_N \left(\theta = \frac{\pi}{2} \right) = 1, B_{TM} = B_T (\theta = 0) = 0,5. \quad (2)$$

Визначивши тригонометричні функції просторового розподілу цих проєкцій

$$B_N(\theta) = B_M (\sin \theta), B_T(\theta) = B_M (\cos \theta),$$

запишемо вирази залежностей модуля B_M вектора індукції та кута ψ його нахилу

$$B_M(\theta) = \sqrt{B_N^2(\theta) + B_T^2(\theta)}, \psi = \arctg \frac{B_T(\theta)}{B_N(\theta)}.$$

Далі розглянемо кути нахилу сенсорної котушки $\alpha_0(\theta)$, за яких її площина збігається із вектором індукції поля. За таких кутів спостерігається нульовий рівень інформативного сигналу

$$V_S = 0 @ \alpha(\theta) = \alpha_0(\theta) = \theta - \psi.$$

Натомість максимальний рівень сигналу досягається у разі повороту площини сенсорної котушки на $\frac{\pi}{2}$ відносно вектора індукції поля (нормаль сенсорної котушки збігається із вектором поля)

$$V_S = V_{MAX} @ \alpha(\theta) = \alpha_{MAX}(\theta) = \theta - \psi - \frac{\pi}{2}.$$

Значна частина систем магнітного трекінгу ґрунтується на котушках із деформованою формою, зокрема, як показано на фотографіях (рис. 1). Така деформація здійснюється з метою оптимального використання площі (об'єму) актюатора та сенсора, вбудовування котушок в об'єкти (зокрема, одяг, рукавиці чи взуття) спрощення технології виготовлення чи вирішення низки інших специфічних завдань.

Розглянемо основні підходи до побудови сигнальної моделі таких деформованих котушок. Для цього здійснимо декомпозицію активної площі A_S сенсорної котушки, подавши її у вигляді двох компонентів: A_{S_0} – центральної частини, просторове положення якої у разі повороту α_R навколо центра котушки залишається незмінним та A_{S_x} – периферійних частин, які у випадку повороту змінюють своє положення (рис. 4). Поворот центральної частини не змінює сигнал котушки. Натомість зміна просторового положення периферійних компонентів призводить до певної зміни сигналу сенсорної котушки, а отже, повинна враховуватися у сигнальній моделі.

Для початку подамо певну частину периферійного компонента сенсорної котушки точковим чи круговим сегментом S_x . Перший варіант переміщення такого сегмента сенсора (Sensor) відповідає рівномірному розподілу поля розподіленого актюатора (Actuator) (рис. 5, а). Натомість другий варіант (рис. 5, б) представляє точковий актюатор, чи, аналогічно до сенсора, точкове подання його сегмента.

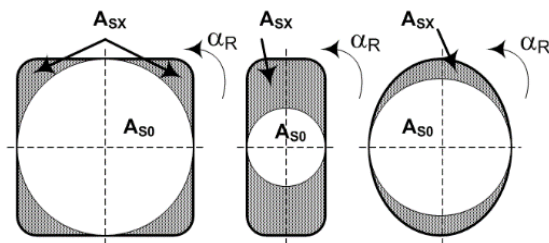


Рис. 4. Сегменти котушок із деформацією форми

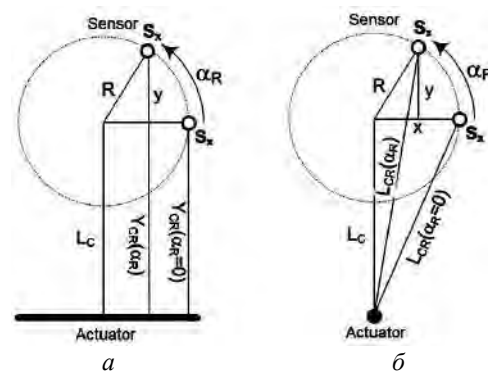


Рис. 5. Рух точкових сегментів котушок

Подавши рух точкового сегмента S_x сенсора по колу з радіусом R відносно центра, розташованого на відстані L_C від площинного чи точкового актюатора, отримуємо залежності відстаней $Y_{CR}(\alpha_R)$ та $L_{CR}(\alpha_R)$ від кута повороту α_R :

$$Y_{CR}(\alpha_R) = L_C + R \sin(\alpha_R)$$

$$L_{CR}(\alpha_R) = \sqrt{x^2 + (L_C + y)^2}; L_{CR}(0) = \sqrt{R^2 + L_C^2}$$

$$x = R \cos(\alpha_R), y = R \sin(\alpha_R).$$

Враховуючи, що індукція магнітного поля визначається оберненою кубічною функцією відстані від актюатора, подамо коефіцієнт модуляції K_X сигналу S_X його залежністю від повороту α_R точкового сегмента сенсора:

$$K_{XR}(Y_{CR}) = \frac{S_{XP}(\alpha_R)}{S_{XP}(0)} = \frac{Y_{CR}(0)^3}{Y_{CR}(\alpha_R)^3} \quad \text{— для площинного актюатора;}$$

$$K_{XR}(L_{CR}) = \frac{S_{XD}(\alpha_R)}{S_{XD}(0)} = \frac{L_{CR}(0)^3}{L_{CR}(\alpha_R)^3} \quad \text{— для точкового актюатора}$$

Приклади таких залежностей наведено на: рис. 6 – K_{XR} , якщо $R=1$, $L_C=10$; рис. 7 – K_{XR} , якщо $R=1$, $L_C=3$; та рис. 8 – K_{XR} для $R=1$, $L_C=2,3,4,5,10$. Розмірність радіуса R та відстані L_C в цьому поданні значення не мають. Важливе лише їх співвідношення.

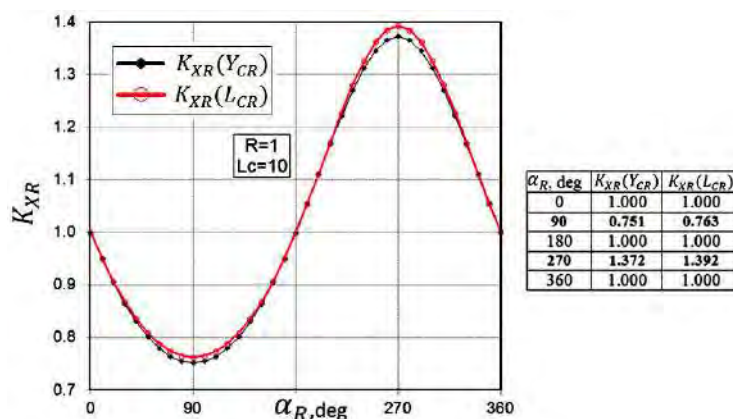


Рис. 6. Коефіцієнти модуляції сигналу K_{XR} , якщо $R=1$, $L_C=10$

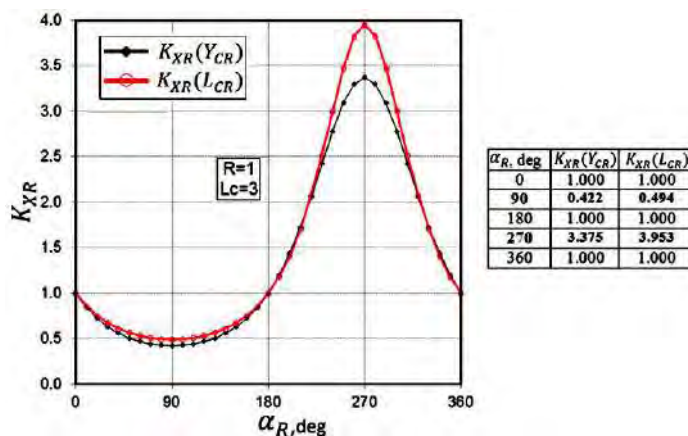


Рис. 7. Коефіцієнти модуляції сигналу K_{XR} , якщо $R=1$, $L_C=3$

Отримані результати показують, що форма залежностей K_{XR} від кута α_R не відповідає гармонічному коливанию, а сигнальна модель повороту сенсорної котушки з деформованою формою складніша. Розглянемо приклади синтезу таких моделей для прямокутної та квадратної форм сенсорних котушок (рис. 9, 10).

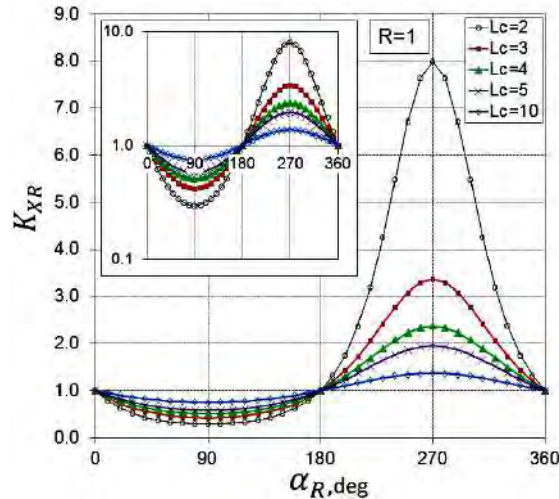


Рис. 8. Коефіцієнт модуляції сигналу K_{XR} ,

якщо $R=1$, $L_C = 2, 3, 4, 5, 10$

(на вставці – залежність у логарифмічному масштабі)

Відповідно до вищерозглянутих міркувань, коефіцієнти модуляції сигналу для прямокутної форми сенсорної котушки визначаються співвідношеннями (рис. 11, а):

$$K_{2R}(Y_{CR}) = \frac{S_{X_1P}(\alpha_R) + S_{X_2P}(\alpha_R)}{S_{X_1P}(0) + S_{X_2P}(0)} = \frac{Y_{CR_1}(0)^3 + Y_{CR_2}(0)^3}{Y_{CR_1}(\alpha_R)^3 + Y_{CR_2}(\alpha_R)^3}$$

$$K_{2R}(L_{CR}) = \frac{S_{X_1D}(\alpha_R) + S_{X_2D}(\alpha_R)}{S_{X_1D}(0) + S_{X_2D}(0)} = \frac{L_{CR_1}(0)^3 + L_{CR_2}(0)^3}{L_{CR_1}(\alpha_R)^3 + L_{CR_2}(\alpha_R)^3}$$

Узагальнюючи, коефіцієнти модуляції сигналу для інших форм котушок з N периферійними сегментами, зокрема для квадратної форми ($N = 4$) визначаємо як (рис. 11, б):

$$K_{NR}(L_{CR}) = \frac{\sum_{i=1}^N S_{X_iD}(\alpha_{Ri})}{\sum_{i=1}^N S_{X_iD}(0)} = \frac{\sum_{i=1}^N L_{CR_i}(0)^3}{\sum_{i=1}^N L_{CR_i}(\alpha_{Ri})^3}$$

$$K_{NR}(Y_{CR}) = \frac{\sum_{i=1}^N S_{X_iP}(\alpha_{Ri})}{\sum_{i=1}^N S_{X_iP}(0)} = \frac{\sum_{i=1}^N Y_{CR_i}(0)^3}{\sum_{i=1}^N Y_{CR_i}(\alpha_{Ri})^3}$$

Всі вищезгадані коефіцієнти модуляції відповідають лише змінам сигналу котушки, що зумовлені її периферійними частинами A_{S_x} . Натомість сигнал від центральної частини A_{S_0} залишається сталим. Відтак, сумарна зміна сигналу визначатиметься не лише коефіцієнтами модуляції K_{XR} , але і співвідношенням площі периферійної частини та сумарної площі сенсорної котушки $\frac{A_{S_x}}{A_{S_x} + A_{S_0}}$. Точніші моделі отримують переходом від точкового до матричного $[N, M]$

подання сегментів активної площі котушки (рис. 12, 13). У такому матричному поданні розрахунок координат матриці виконують за формулами:

$$X_{i0} = \alpha \left(i - \frac{N+1}{2} \right); Y_{j0} = \alpha \left(j - \frac{M+1}{2} \right)$$

$$L_{ji} = \sqrt{X_{i0}^2 + Y_{j0}^2}; \alpha_{ji0} = \arctan\left(\frac{Y_{j0}}{X_{i0}}\right); L_{jiC} = \sqrt{X_{i0}^2 + (L_C + Y_{j0}^2)^2}; \alpha_{jiR} = \alpha_{ji0} + \alpha_R$$

$$L_{jiR} = \sqrt{X_{iR}^2 + (L_C + Y_{jR}^2)^2}; X_{iR} = L_{ji} \cos(\alpha_{jiR}); Y_{jR} = L_{ji} \sin(\alpha_{jiR})$$

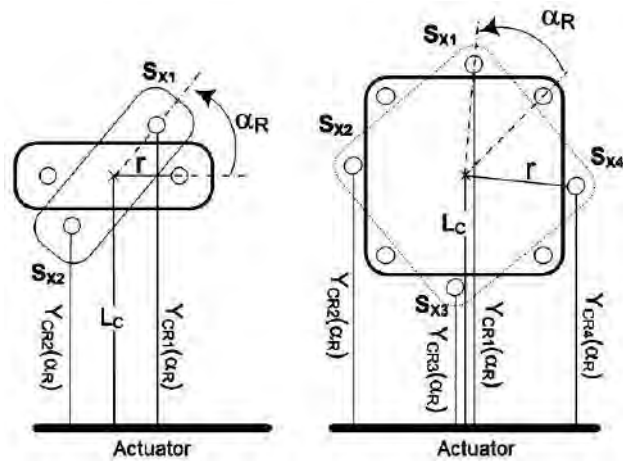


Рис. 9. Декомпозиція сенсорної котушки із площинним актюатором

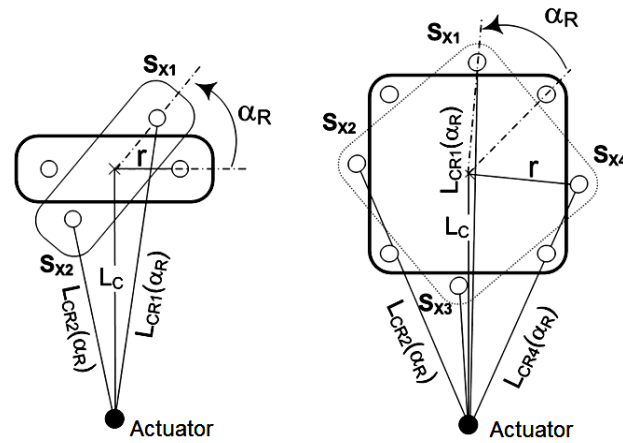
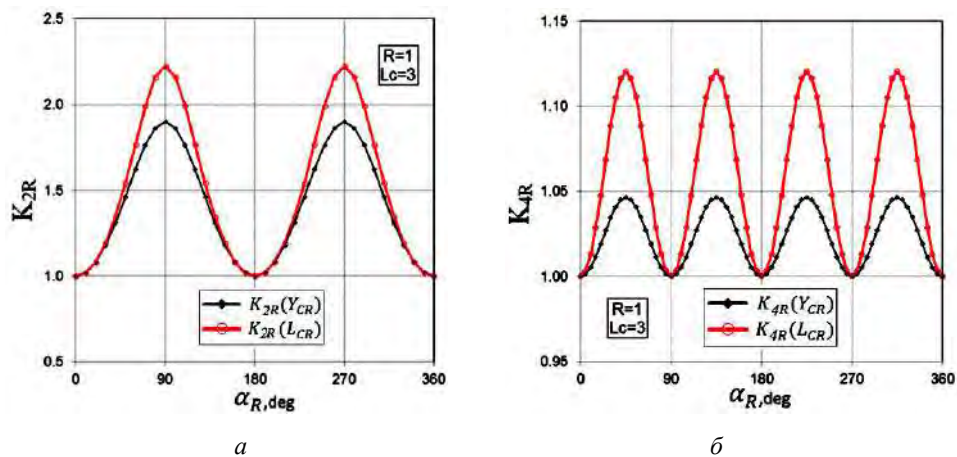


Рис. 10. Декомпозиція сенсорної котушки із точковим актюатором

Рис. 11. Коефіцієнти модуляції сигналу K_{2R} , якщо $R = 1$, $LC = 3$ (а), та K_{4R} , якщо $R = 1$, $LC = 3$ (б)

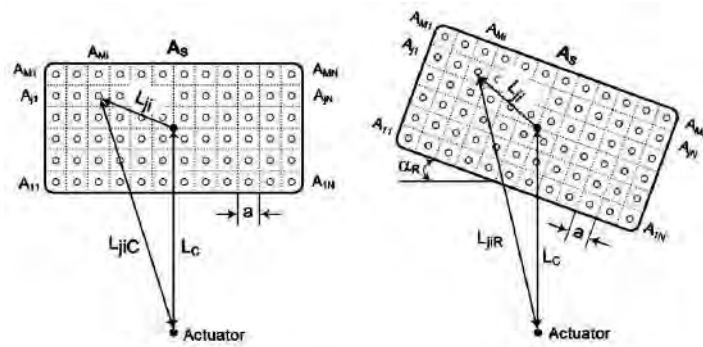


Рис. 12. Матричне подання площі котушки

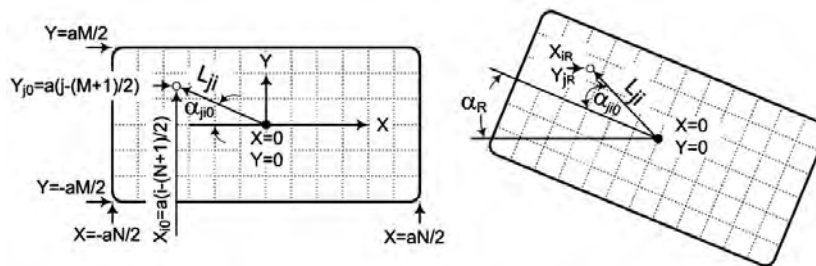


Рис. 13. Координати сегментів у матричному поданні

4. Реалізація, дослідження та апробація пристроїв магнітного трекінгу

Враховуючи вимоги до сучасної сенсорної мікроелектроніки, зокрема до пристроїв навігації об'єктів, у концепції доповненої реальності вимірювальний перетворювач апаратно-програмних пристроїв магнітного трекінгу реалізовано на платформі програмованих систем на кристалі PSoC (PSoC – Programmable System on Chip). У дослідних зразках використано систему PSoC сім'ї 5LP Family (Cypress Semiconductor Corporation) [11], зокрема модулі CY8CKIT-059 на основі CY8C58xxLP [12]. До структури PSoC входять мікропроцесор (32-bit Arm® Cortex® Microcontroller MCU), вузли цифрових та аналогових систем, енергозалежна та енергонезалежна пам'ять, системні ресурси, а також вузли програмування та керування енергоспоживанням. Основою цифрових вузлів є матриця універсальних цифрових блоків, спеціалізованих цифрових блоків, зокрема для реалізації інтерфейсів, таймерів, широтно-імпульсних модуляторів тощо. Аналоговими вузлами PSoC є блоки на перемикальних конденсаторах та блоки із неперервним сигнальним перетворенням, зокрема: операційні підсилювачі, компаратори, джерела опорної напруги на принципі забороненої зони, аналогові мультиплексори тощо. Вузли з'єднуються програмно конфігурованою мережею сигнальних ліній.

Визначальними компонентами платформи PSoC5, на основі яких реалізована програмована система сигнального тракту магнітних сенсорів трекінгу, є: синтезувальний генератор (8-bit Waveform Generator, Wave DAC8), мультифункціональний міксер (Mixer), підсилювач із програмованим коефіцієнтом підсилення (Programmable Gain Amplifier, PGA), аналогові мультиплексори MUX та два типи аналого-цифрових перетворювачів – дельта-сигма АЦП (Delta-Sigma Modulation ADC) та SAR (Successive Approximation Register ADC). Програмне керування цими компонентами здійснюється із використанням наборів відповідних API (Application Programming Interface) функцій.

На рис. 14 наведена схема універсального вимірювального перетворювача, що максимально відображає можливості платформи PSoC5 для реалізації вбудованих систем магнітного трекінгу. Ця схема розглядається лише як базова система, що може доповнюватися іншими компонентами, зокрема діодами чи транзисторами для логарифмувального перетворення, пасивними RC-колами фільтрів, модулями радіозв'язку тощо. Задаючий генератор, імпульси якого задають частоту сформованого сигналу, реалізовано на таймері Timer_1. Після букерування на тригері TFF імпульси

задаючого генератора надходять на вхід clock генератора WaveDAC8, який синтезує форму сигналу, та вхід подільника частоти (Frequency Divider) Freq_Div_1, який формує імпульси керування синхронним детектором. Коефіцієнт поділу частоти KD повинен відповідати кількості виборок NS за один період синтезованого сигналу (Samples) генератора WaveDAC8 (у цьому прикладі $KD = NS = 120$). Синхронне детектування здійснює міксер Mixer_1.

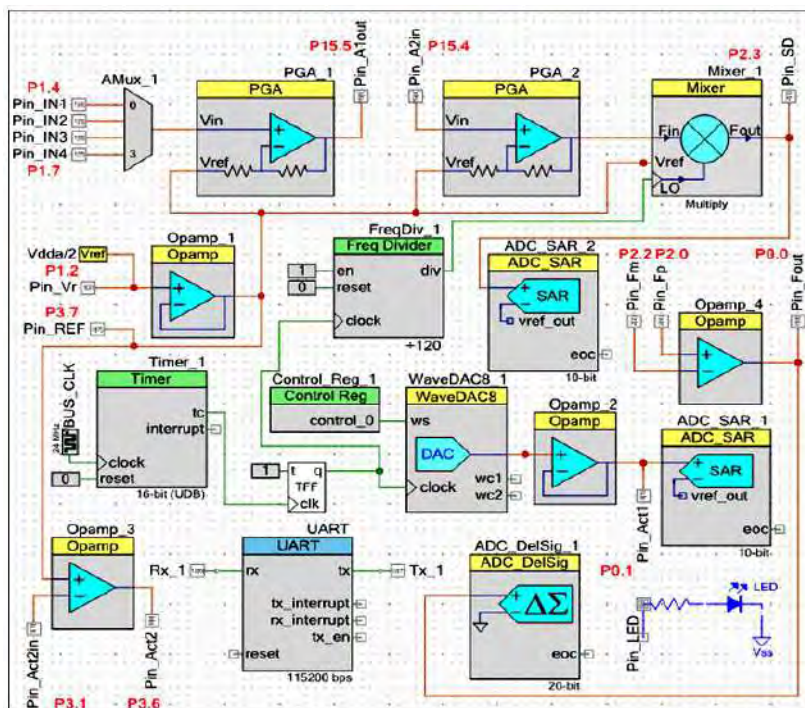


Рис. 14. Схема універсального вимірювального перетворювача на основі PSoC

Операційний підсилювач Opamp_1 використовують для формування кола опорної напруги VREF, рівень якої може програмуватися залежно від специфіки сигнального перетворення. У цьому рішенні опорну напругу формує подільник напруги живлення аналогових кіл системи $V_{dda}/2$. Операційний підсилювач Opamp_1 у режимі повторювача напруги використовується для формування синфазної складової вихідної напруги, що застосовується в актюаторах магнітного поля. Натомість операційний підсилювач Opamp_2 в режимі інвертора напруги (резистори інвертора не входять у структуру чипа, а відтак на схемі не вказані) використовується для формування протифазної складової вихідної напруги.

Вхідне коло системи містить два послідовно з'єднані програмовані підсилювачі сигналу PGA_1, PGA_2 із сумарним коефіцієнтом підсилення у діапазоні від 1 до $50 \times 50 = 2500$. Для проміжного фільтрування сигналу та зменшення сумарного рівня паразитної напруги зміщення, наявної у підсилювачах, між виходом PGA_1 та входом PGA_2 встановлено смуговий фільтр на зовнішніх (які не входять у чип PSoC5) RC колах. Завдання фільтрування сигналу після міксеру Mixer_1 синхронного детектора вирішує активний фільтр другого порядку на операційному підсилювачі Opamp_4.

Крім вищезгаданих підсилювачів, вхідне коло містить динамічно керований чотириканальний аналоговий мультиплексор AMux_1, який уможливує комутацію сигналів від чотирьох сенсорних котушок. На практиці оптимальнішим рішенням є використання мультиплексу для трьох сигналів ортогонально розміщених сенсорів та одного опорного сигналу. Цей опорний сигнал формується у сигнальному колі актюатора магнітних полів та застосовується для компенсації параметричної нестабільності компонентів системи, а відтак підвищення точності вимірювального перетворення.

У системі передбачено три аналого-цифрові перетворювачі (АЦП). Основний із них – 20-бітний дельта-сигма АЦП ADC_DelSig_1 використовується для високоточного (повільного) перетворення. Два інші – 10-бітні АЦП послідовного наближення (Successive Approximation

Register) ADC_SAR_1 та ADC_SAR_2 використовуються для експрес-аналізу форм сигналів на виході системи (на актуаторах магнітного поля) та виході синхронного детектора (на міксері Mixer_1). Таке експрес-спостереження форм сигналів важливе для налаштування системи й зумовлене можливими спотвореннями форми та фази сигналів під час програмування форми сигналів, перемикання коефіцієнтів підсилення, шунтування вихідних кіл системи вхідним імпедансом актуаторів магнітного поля тощо.

Експериментальні дослідження характеристик пристроїв магнітного трекінгу, зокрема залежності сигналів від відстані між котушками та їх взаємного нахилу, виконано із використанням вимірювального стенда (рис. 15). Стенд реалізовано із використанням розглянутого вище універсального вимірювального перетворювача на основі PSOC.



Рис. 15. Вимірювальний стенд апаратно-програмних пристроїв магнітного трекінгу

Приклад результатів експериментальних досліджень залежностей максимальних значень вихідної напруги V_{out} від відстані L між котушками в чотирьох варіантах котушок #1..#4 та їх поліноміальні апроксимації $y = f(x)$ наведено на рис. 16. Вимірювання здійснювали за розміщення сенсорних котушок вздовж осі Y_A актуаторних котушок та співспрямованості нормалей N цих котушок. Отримані результати демонструють достатньо високу точність апроксимації рівня сигналу оберненою кубичною функцією відстані між сенсорною та актуаторною котушками. Приклад результатів дослідження залежностей нормованого сигналу S_{NORM} від кутів нахилу котушок θ , α для двох фіксованих значень відстані $L_{SA} = 50$ см (оптимальне функціонування) та $L_{SA} = 15$ см (некоректне функціонування у разі перевищення сигналом діапазону вимірювання, а відтак – його обмеження) наведено на рис. 17. Ці та широке коло інших отриманих даних експериментальних досліджень підтверджують коректність розглянутої вище сигнальної моделі.

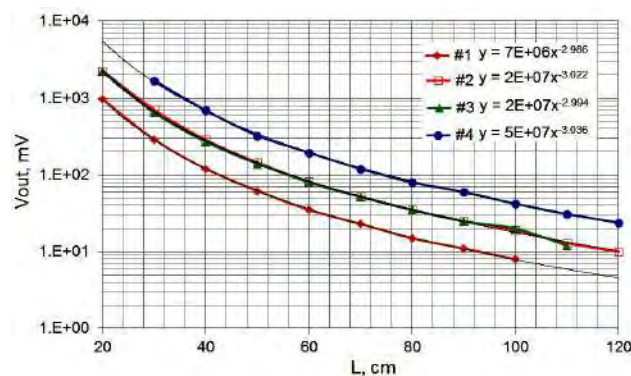


Рис. 16. Експериментальні дані (точки) та поліноміальна апроксимація (лінії) залежностей вихідної напруги V_{out} від відстані L між котушками

Апробацію наведених у роботі пристроїв магнітного трекінгу здійснено в численних проєктах із розроблення компонентів доповненої реальності в технології злиття даних із поєднанням сигналів вимірювальних перетворювачів магнітного трекінгу та IMU (Inertial Measurement Unit) модулів на

основі MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 3D акселерометрів та гіроскопів. Зокрема, це пристрої вимірювання просторового трекінгу, параметрів руху та форми об'єктів (рис. 18).

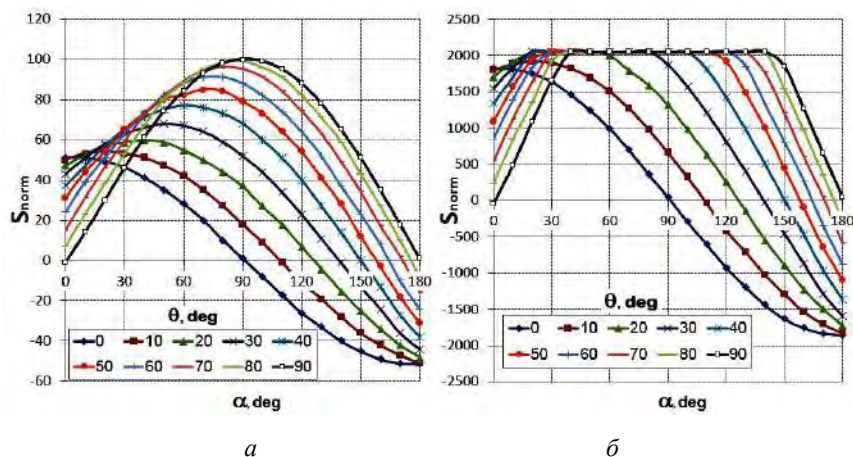


Рис. 17. Сім'я сигналів $S_{\text{NORM}} = f(L_{\text{SA}}, \theta, \alpha)$ при $L_{\text{SA}} = 50$ см (а) та $L_{\text{SA}} = 15$ см (б)

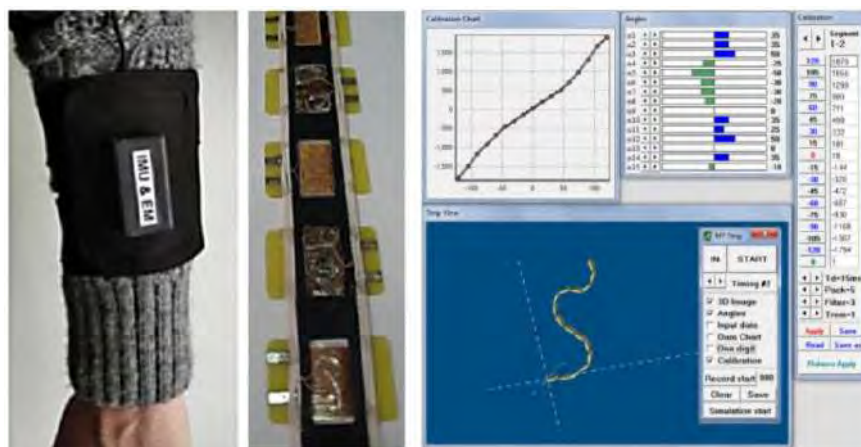


Рис. 18. Приклади апробації апаратно-програмних пристроїв магнітного трекінгу

Висновки

Проаналізовано функціонування та принципи сигнального перетворення систем магнітного трекінгу для систем доповненої реальності. Просторове положення об'єктів у таких системах визначають за результатами вимірювання вектора індукції опорних магнітних полів у низькочастотному спектрі електромагнітного випромінювання. Переважно сенсорами та актуаторами в сенсорних системах магнітного трекінгу слугують малогабаритні котушки та їх 2D чи 3D збірки. Розкрито структуру сигнального тракту програмованої системи магнітного трекінгу та його реалізацію на основі на PSoC сім'ї 5LP Family Cypress Semiconductor Corporation. Наведено результати експериментальних досліджень сім'ї сигналів у разі зміни відстані між котушками L_{SA} та кутів їх взаємного положення θ, α . З урахуванням фізичних основ функціонування та даних експериментальних досліджень розроблено сигнальну модель, що описує функціональні залежності інформативних сигналів, а саме напруги $V_s = f(L_{\text{SA}}, \theta, \alpha)$. Використання наведеної сигнальної моделі охоплює завдання розроблення та специфікації алгоритмів розрахунку просторового положення, налагодження та експрес-оцінки точності функціонування системи магнітного трекінгу, оптимізації процедур калібрування тощо. Апробацію описаних у роботі пристроїв магнітного трекінгу здійснено в численних проєктах із розроблення компонентів доповненої реальності в технології злиття даних із

поєднанням сигналів вимірювальних перетворювачів магнітного трекінгу та IMU модулів на основі MEMS 3D акселерометрів та гіроскопів.

Список використаних джерел

- [1] Hongtao W., Zhimin Y., Ping W., Santoso B., Lian O. (2018), "A novel method of motion tracking for virtual reality using magnetic sensors", in *Asia-Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC-2018)*, Shanghai. DOI: 10.1109/APMRC.2018.8601108.
- [2] Singh M. and Jung B. (2017), "High-definition wireless personal area tracking using AC magnetic field for virtual reality", in *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, Los Angeles. DOI: 10.1109/VR.2017.7892250.
- [3] Fedasyuk D., Holyaka R., and Marusenkova T. (2019), "A tester of the MEMS accelerometers operation modes", in *2019 3rd Int. Conf. on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv. DOI: 10.1109/aiact.2019.8847840.
- [4] Fedasyuk D., Holyaka R., and Marusenkova T. (2019), "Method of analyzing dynamic characteristics of MEMS gyroscopes in test measurement mode", in *2019 9th Int. Conf. on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ceske Budejovice, pp. 157–160. DOI: 10.1109/acitt.2019.8780058.
- [5] Jo D. and Kim G. (2016), "ARIoT: scalable augmented reality framework for interacting with Internet of Things appliances everywhere", *IEEE Trans. Consum. Electron.*, Vol. 62, No. 3, pp. 334–340. DOI: 10.1109/tce.2016.7613201.
- [6] Reichl T., Gardiazabal J., and Navab N. (2013), "Electromagnetic Servoing – a new tracking paradigm", *IEEE Trans. Med. Imag.*, Vol. 32, No. 8, pp. 1526–1535. DOI: 10.1109/tmi.2013.2259636.
- [7] Franz A. et al. (2014), "Electromagnetic tracking in medicine—a review of technology, validation, and applications", *IEEE Trans. Med. Imag.*, Vol. 33, No. 8, pp. 1702–1725. DOI: 10.1109/tmi.2014.2321777.
- [8] Alves N. et al. (2015), "An MEG-compatible electromagnetic-tracking system for monitoring orofacial kinematics", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 63, No. 8, pp. 1709–1717. DOI: 10.1109/tbme.2015.2500102.
- [9] Song S., Li Z., Yu H., and Ren H. (2015), "Electromagnetic positioning for tip tracking and shape sensing of flexible robots", *IEEE Sensors J.*, Vol. 15, No. 8, pp. 4565–4575. DOI: 10.1109/jsen.2015.2424228.
- [10] De Angelis G., De Angelis A., Moschitta A., Carbone P. (2017), "Comparison of Measurement Models for 3D Magnetic Localization and Tracking", *IEEE Sensors J.*, Vol. 17, No. 11. DOI: 10.3390/s17112527.
- [11] PSoC® 5LP: CY8C52LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip. Available at: <http://www.cypress.com/documentation/datasheets/psoc-5lp-cy8c52lp-family-datasheet-programmable-system-chip-psoc>.
- [12] CY8CKIT-050 PSoC 5LP Development Kit Guide. Cypress Semiconductor Corporation. 2018. Available at: <http://www.cypress.com/file/45276/download>.

DEVICES AND MODELS OF MAGNETIC TRACKING FOR AUGMENTED REALITY SYSTEMS

R. Holyaka, T. Marusenkova, M. Khilchuk

Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine

The problems of developing of magnetic tracking signal transducers for augmented reality systems are considered. The spatial position of objects in such systems is carried out by measuring the vector of reference magnetic fields induction in the low-frequency spectrum of electromagnetic radiation. Small sensors and their 2D or 3D assemblies are mainly sensors and actuators in magnetic tracking sensor systems. Informative signals of magnetic tracking systems are described by functional dependencies, the main arguments of which are the distance between the actuator and sensor coils and the angles of their mutual inclination. To calculate the spatial position, signal models are used, which describe the distribution of magnetic fields generated by actuator coils and signals of sensor coils. The structure of the signal-processing chain of the programmable magnetic tracking system and its implementation based on PSoC family 5LP Family Cypress Semiconductor Corporation are presented. The results of experimental studies of a signals family when changing the distance between the coils and the angles of their relative position are obtained. Taking into account experimental data the signal model describing functional dependences of informative signals is developed. The use of the presented signal model covers the tasks of development and specification of algorithms for calculating the spatial position, debugging and rapid assessment of the accuracy of the magnetic tracking system, optimization of calibration procedures and more. Approbation of the presented devices of magnetic tracking is carried out in numerous projects on development of augmented reality components in data fusion technology with a combination of signals of measuring converters of magnetic tracking and IMU modules based on MEMS 3D accelerometers and gyroscopes.

Key words: magnetic tracking; embedded system; augmented reality sensor.