

УДК 004.932.2+004.946:004.9:519.816

ОБРАННЯ МЕТОДУ ТРЕКІНГУ ДЛЯ ВІРТУАЛЬНОЇ ПРИМІРОЧНОЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

Н. Е. Кунанець, А. І. Кондра

*Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С.Бандери, 12, Львів, 79013, Україна*

У статті розглянуто проблему вибору оптимального методу трекінгу для системи віртуальної примірконої, що забезпечує реалістичне накладання цифрового одягу на аватар користувача. Визначено, що якість користувацького досвіду залежить від точності, стабільності та затримки обраного методу відстеження рухів. Для обґрунтованого прийняття рішення застосовано метод аналізу ієрархій (АНР), який дозволяє виконати багатокритеріальну оцінку трьох альтернатив — оптичного, інерційного та магнітного трекінгу — за такими критеріями, як точність, затримка, надійність, вартість і складність інтеграції. Отримані результати показують, що оптичний трекінг має найвищу сумарну вагу (0.492) і є найкращим базовим рішенням для VR-примірконої, тоді як інерційний підхід доцільно використовувати як допоміжний шар для компенсації оклюзій та зменшення затримки. Магнітні системи рекомендовано лише для контрольованих середовищ. Запропонована модель забезпечує формалізований підхід до технічного вибору на основі прозорих метрик та може бути адаптована для різних продуктів і платформ VR/AR. Практичне значення дослідження полягає у можливості використання АНР як інструмента техніко-економічної оптимізації рішень у галузі віртуальної та доповненої реальності.

Ключові слова: *віртуальна примірконая, трекінг, метод аналізу ієрархій, оптичний трекінг, інерційні сенсори, АНР, VR/AR*

Постановка проблеми. Віртуальні примірконі набули помітної ролі в електронній комерції одягу, оскільки знижують невизначеність щодо розміру та посадки, зменшують повернення і підтримують конверсію. Користувацький досвід у таких системах критично визначається якістю трекінгу рухів—від стабільності оцінок пози до коректного суміщення цифрового одягу з аватаром у реальному часі. У практиці використовують три провідні підходи до відстеження: оптичний, інерційний і магнітний. Кожен із них характеризується власним поєднанням показників точності, затримки, стійкості до завад, вартості та складності впровадження, що ускладнює інженерні рішення в реальних проєктах.

Проблематика вибору технології посилюється багатофакторністю вимог: від latency і робастності у змінних умовах освітлення—до бюджету, апаратних обмежень і зусиль інтеграції у конкретну архітектуру VR-сервісу. Відсутність єдиного «найкращого» методу для всіх сценаріїв обумовлює потребу в систематичній

процедурі порівняння, яка узгоджує технічні метрики з практичними обмеженнями продукту та дозволяє прозоро обґрунтовувати прийняті рішення.

Запропонований у роботі підхід фокусується на формальному зіставленні альтернатив трекінгу зарелевантними критеріями, використовуючи стандартизовані у галузі показники (зокрема, motion-to-photon latency) і експертні судження. Такий формат дає можливість уніфікувати вимоги, підвищити відтворюваність порівнянь та забезпечити трасованість від вибору технічного рішення до очікуваного користувацького ефекту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні VR-примірочні спираються на три класи трекінгу — оптичний, інерційний і магнітний — із характерними компромісами між точністю, затримкою та робастністю. Автори статті [1] вважають, що більшість існуючих програм доповненої реальності (AR) підходять для випадків, коли задіяна лише невелика кількість реальних об'єктів, наприклад, накладання персонажа на одну поверхню. У цьому випадку необхідно обчислити положення камери відносно цієї поверхні. Однак, коли програма AR використовується у галузі охорони здоров'я або навколишнього середовища передбачається однозначне відношення між об'єктом у реальному світі та відповідним об'єктом у комп'ютерній моделі (геоприв'язаним об'єктом), у цьому випадку необхідно оцінити положення камери відносно спільної системи координат для кращої реєстрації геоприв'язаних об'єктів у реальному світі. Інновації в розробленні давачів, методів комп'ютерного зору, машинного навчання допомогли розробити програми з більш точним зіставленням між реальним світом та віртуальним контентом. Дослідники розподіляють методи відстеження AR на дві підкатегорії - підходи на основі маркерів та без маркерів і подають огляд методів реєстрації та відстеження без маркерів, аналізуючи їх найважливіші критерії в контексті повсюдних геопросторових інформаційних систем (ГІС) та AR. Дослідники наголошують на необхідності розробленні точних віртуальних моделей середовища як для калібрування відстеження, так і для візуалізації [1].

Відтворення та моделювання робочих місць, а також аналіз поз тіла під час робочих процесів є частиною оцінки ергономічних ризиків, вважають автори статті [2]. Комерційна система віртуальної реальності (VR) пропонує можливість моделювати складні робочі сценарії як віртуальні макети та оцінювати їх ергономічний дизайн, аналізуючи поведінку руху під час виконання робочих процесів. У цьому дослідженні систему давачів відстеження VR (трекер HTC Vive) у поєднанні з інверсною кінематичною моделлю (Final IK) порівнювали з системою оптичного захоплення руху на основі маркерів (Qualisys). Qualisys був використаний як базовий показник у цьому дослідженні. Досліджувалося наскільки точно система HTC Vive у поєднанні з Final IK може вимірювати кути суглобів, що використовуються для ергономічної оцінки. Двадцять шість суб'єктів спостерігалися одночасно з обома системами відстеження під час виконання 20 визначених рухів та було надано рекомендації щодо покращення точності відстеження та уникнення систематичних помилок.

У публікаціях підкреслюється висока точність поз/ключових точок для оптики без маркерів і водночас чутливість до оклюзій та умов освітлення. У контексті

VR центральною метрикою залишається затримка між рухом і появою кадру і методики її вимірювання. Автори статті [3] вважають, що системи віртуальної реальності все частіше використовуються в дослідженнях для вивчення сенсомоторної поведінки, але властивості таких систем потребують перевірки перед використанням як наукових інструментів. Затримка між рухом користувача та відображенням руху на дисплеї є особливо важливою метрикою, оскільки часові затримки можуть погіршити сенсомоторну продуктивність. На думку дослідників, існуючі підходи до кількісної оцінки цього показника включали використання спеціального програмного та апаратного забезпечення, що дозволяє створювати єдиний показник затримки та ігнорувати вплив алгоритмів прогнозування руху, що використовуються в сучасних VR-системах. Це знижує впевненість в узагальнюваності результатів. У статті [3] запропоновано новий метод вимірювання затримки на основі високошвидкісної камери для спільної реєстрації реальних та віртуальних рухів контролера, що дозволяє оцінити, як змінюється затримка під час руху та застосовано цей метод для вимірювання затримки руху-фотона рухів контролера в HTC Vive, Oculus Rift, Oculus Rift S та Valve Index, використовуючи ігровий движок Unity та SteamVR. Отримані результати показують, що раптові прискорення (наприклад, початок руху, удари та зміни напрямку) збільшують затримки та знижують просторову точність. Запропонована методика дозволяє дослідникам виміряти ці фактори та визначити вплив на їх експериментальний дизайн, перш ніж збирати сенсомоторні дані з VR-систем [3]. У статті [4] відзначається, що з появою низькоенергетичного надшвидкого обладнання та графічних процесорів, VR набула значної популярності за останні кілька років і використовується в різних сферах, таких як освіта, розваги, наукова візуалізація та автоматизоване проектування. VR-додатки є високоінтерактивними, і одним з найважливіших показників продуктивності для цих додатків є затримка руху до фотона (MPD). MPD - це затримка від руху голови користувача до часу, коли зображення оновлюється на екрані VR. Однак, через конкуренцію між застосунками за спільний графічний процесор, алгоритм ATW з прискоренням на графічному процесорі страждає від непередбачуваної затримки, що ускладнює пошук ідеального моменту для початку викривлення часу та забезпечення його завершення з найменшою затримкою відносно оновлення екрана. Отже, найсучаснішим підходом, на думку дослідників, є використання окремого апаратного блоку для операції викривлення часу. Запропонований підхід, використовує предиктор на основі машинного навчання для прогнозування затримки ATW для VR-застосунку, а потім планує його якомога пізніше. У результаті, предиктор досягає помилки 0,77 мс у кількох популярних VR-додатках для прогнозування затримки ATW. [4].

Інерційні та візуально-інерційні підходи забезпечують низьку затримку й плавність траєкторій, але потребують візуальної корекції дрейфу. Сучасні роботи демонструють прогрес у злитті даних і зменшенні дрейфу. Дослідники [5] вважають, що візуально-інерціальна одометрія (VIO) широко використовується для оцінки стану в автономних мікролітальних апаратах з використанням бортових давачів. Сучасні методи покращують VIO, включаючи модель поступальної динаміки

транспортного засобу, проте їхня продуктивність погіршується при роботі з низькоточними моделями транспортних засобів або безперервними зовнішніми збуреннями, такими як вітер. Авторами статті [5] представлено HDVIO2.0, яка моделює повну 6-ступінчасту, поступальну та обертальну динаміку транспортного засобу та тісно інтегрує її в VIO з мінімальним впливом на час виконання. Ключова ідея моделювання обертальної динаміки полягає в її представленні за допомогою функцій безперервного часу. HDVIO2.0 використовує розбіжність між фактичним рухом та прогнозованим рухом з гібридної динамічної моделі для оцінки зовнішніх сил, що є важливим для відслідковування рухів у віртуальній примірочній. У статті [6] запропоновано новий підхід до візуально-інерціальної одометрії, поєднуючи сильні сторони архітектури з ефективним часовим моделюванням. Використовуючи легку структуру з лінійною обчислювальною складністю, результати дослідження дозволяють ефективно фіксувати як короткострокові, так і довгострокові залежності, долаючи обмеження традиційних рекурентних моделей, таких як LSTM та Transformers. Впровадження паралельного кодера IMU додатково покращує процес вилучення ознак, значно збільшуючи продуктивність у складних середовищах. Автори [6] відзначають, що система збалансовано покращує як поступальну, так і обертальну точність, що робить її надійним рішенням для реальних застосувань в автономній навігації та робототехніці.

Магнітні системи здатні працювати у контрольованих умовах, однак демонструють підвищену похибку в присутності металу та ЕМ-шуму, що підтверджено як у ранніх експериментальних роботах, так і в сучасних прикладних дослідженнях [7-9]. Додатково індустріальні протоколи вимірювання затримки сприяють порівнюваності систем і дозволяють прив'язати багатокритеріальну оцінку до відтворюваних метрик. Досвід кінцевого споживача роботи з новими технологіями та продуктами має вирішальне значення для їх успішного впровадження. У публікації [10] досліджено важливість затримки руху до фотона, як її виміряти та оптимізувати продуктивність пристроїв. Автори відзначають, що віртуальна, змішана, доповнена реальність здебільшого стосується занурення, створення фізичної присутності в нефізичному світі, розглядаючи затримку як різниця між дією та реакцією. Користувачі не повинні відчувати затримки між фізичним рухом та виходом зображення, щоб отримати найкраще занурення. В іншому випадку відчуття фізичної присутності у віртуальному світі буде втрачено.

Поле досліджень демонструє зрілість оптичних методів у точності та доступності, ключову роль інерційного шару для зниження затримки/компенсації оклюзій і обмеження магнітних систем у нефіксованих середовищах [1, 2, 9].

Прозорий і відтворюваний вибір трекінгу для VR-примірочної може забезпечити метод аналізу ієрархій (АНР) [11], а стандартизовані вимірювання руху дають об'єктивну базу для калібрування ваг критеріїв [3, 10]. На рівні методології прийняття рішень широко застосовують багатокритеріальні підходи. Метод аналізу ієрархій вирізняється прозорою шкалою парних порівнянь, перевіркою узгодженості суджень і підтримкою чутливості до змін пріоритетів [11]. Т. Л. Сааті [11] представлено сім елементів аналітичної ієрархії. До них належать шкали співвідношень, отримані з

взаємних парних порівнянь; парні порівняння та психофізичне походження фундаментальної шкали, що використовується для проведення порівнянь; умови чутливості власного вектора до змін у судженнях; однорідність та кластеризація для розширення шкали від 1–9 до 1; адитивний синтез пріоритетів, що призводить до вектора багатолінійних форм, який застосовується в структурі рішень ієрархії або більш загальній мережі зворотного зв'язку для зведення багатовимірних вимірювань до одновимірної шкали співвідношень; дозвіл на збереження рангу (ідеальний режим) або дозвіл на зміну рангу (розподільний режим); прийняття групових рішень з використанням математично обґрунтованого способу синтезу індивідуальних суджень, що дозволяє побудувати коректне групове рішення, сумісне з індивідуальними уподобаннями. Ці властивості АНР надають йому як теоретичну підтримку, так і широке застосування. Це робить АНР доречним для обрання інструментів розроблення VR-приміркою, де критично збалансувати точність і робастність трекінгу проти затримки, вартості та інтеграційної складності.

Мета статті. Обґрунтовано визначити оптимальний метод трекінгу для віртуальної приміркою, застосувавши метод аналізу ієрархій для багатокритеріальної оцінки оптичного, інерційного та магнітного підходів. У роботі послідовно формується ієрархія «мета—критерії—альтернативи» (точність, затримка, надійність, вартість, складність інтеграції), визначаються ваги критеріїв на основі експертного оцінювання з перевіркою узгодженості суджень, обчислюються глобальні пріоритети альтернатив і виконується сенситивність для оцінювання стійкості вибору, після чого подається практична рекомендація щодо базового методу трекінгу та доцільності його гібридизації у VR-примірочній.

Завдання дослідження:

1. Формалізувати постановку вибору: визначити альтернативи трекінгу (оптичний, інерційний, магнітний) та контекст VR-приміркою (вимоги до точності, руху, робастності).

2. Сформувати систему критеріїв оцінки (Точність, Затримка, Надійність/стійкість до завад, Вартість, Складність інтеграції) з операціональними метриками та шкалами вимірювання.

3. Провести експертне оцінювання важливості критеріїв методом попарних порівнянь АНР; агрегувати судження, перевірити узгодженість та рівень згоди.

4. Побудувати попарні матриці альтернатив за кожним критерієм, отримати локальні ваги (власний вектор/геометричні середні) і перевірити їх узгодженість.

5. Обчислити глобальні пріоритети альтернатив (агрегація «критерії → альтернативи») та визначити базового переможця.

6. Виконати сенситивність: варіювати ваги ключових критеріїв (і визначити пороги зміни лідера; побудувати однобічний аналіз чутливості графіки).

Виклад основного матеріалу дослідження. Онлайн-магазин одягу з 3D/VR-приміркою пропонуватиме користувачу у веб-інтерфейсі або WebXR/VR-клієнті переглядати каталог, обирати розмір і колір, приміряти річ на аватарі з реалістичною передачею матеріалів і оформлювати покупку. Ядром системи є модуль примірювання, який виконує перенесення рухів одягу на скелет аватара, моделювання

поведінки тканин із фізичними обмеженнями, запобігає проникненню одягу крізь тіло користувача, а також забезпечує режими якості відображення та пріоритетне відтворення зображення у зоні погляду Медіа-сервіс зберігатиме та віддаватиме glTF-моделі, KTX2-текстури, HDRI та пресети PBR-матеріалів із автоматичною генерацією LOD/MIP і доставкою через CDN. Бек-офісні сервіси мають покривати каталог і пошук, інвентар і резервування, кошик і чекаут, платежі через PCI-сумісних провайдерів, замовлення та повернення, а також нотифікації. Персоналізація і методи машинного навчання забезпечуватимуть рекомендації (модуль рекомендацій супутніх товарів «доповнення образу», схожі товари), прогноз розміру та ранжування, спираючись на подієву аналітику й A/B-тести. Дані організовуватимуться у Product DB (SKU, атрибути, посилання на 3D), User DB (профіль і мірки), Orders/Payments, Event Store (сесії примірки) та Object Storage (ассети). Нефункціональні цілі проекту FPS у VR ≥ 90 , перший рендер try-on < 2 с, TTFB API < 200 мс, доступність 99.9%, безпека TLS 1.3, RBAC, шифрування ПІІ та підпис маніфестів ассетів. Інтеграції охоплюватимуть платіжні шлюзи, служби доставки, маркетинг-платформи та BI/дашборди через API-gateway (REST/GraphQL) і WebSocket для live-подій. Експлуатація базуватиметься на Kubernetes з автоскейлінгом, CDN/edge-кешах, спостережуваності (OpenTelemetry, RUM) і регулярних бекапах з DR-планом.

Сучасні методи трекінгу мають низку переваг та недоліків. Оптичний метод трекінгу [12] сприятиме визначенню положення та орієнтації об'єктів або частин тіла за зображеннями з камер. Інформаційна система має аналізувати кадри (RGB/IR/глибина), виділяти ознаки чи ключові точки тіла та в реальному часі обчислювати 3D-позу. Використовуються різні конфігурації. За розміщенням камер, коли зовнішні камери спостерігають користувача, та коли камери вбудовані в гарнітуру і спостерігають довшілля/руки. За типом позначок розрізняють методи з використанням спеціальних опорних міток і безмаркерне відстеження, що ґрунтується на розпізнаванні ключових точок людського тіла та його форми. За сенсорами — від монокамери до стерео й RGB-D/IR, інколи в комбінації з інерційним шаром (VIO/SLAM). Типовий конвєсер включає калібрування інтрінсик/екстрінсик камер, детекцію маркерів або нейромережеве виділення keypoints (тіло/руки/обличчя), оцінку пози та орієнтації методами PnP/тріангуляції з можливою багатокadroвою оптимізацією (bundle/SLAM), подальшу фільтрацію (EKF/UKF/IEKF або згладжування) і формування виходу — 6DoF-пози контролерів/сегментів тіла з оцінкою якості. Перевагами методу є висока точність і відсутність дрейфу завдяки абсолютній прив'язці до сцени та добра масштабованість у просторі, що особливо корисно для складних деформацій (наприклад, одяг або руки). Обмеженнями виступають оклюзії, залежність від освітлення та текстури, а також вища обчислювальна вартість і зазвичай більша затримка порівняно з суто інерційними системами. Для VR-примірконої оптика критично важлива, бо забезпечує геометрично точну позу для коректної «посадки» одягу і мінімізує «проколювання» тканини. На нашому випадку доцільно застосовувати гібрид, коли оптика використовується як базове джерело точності з додаванням IMU для стійкості під час коротких оклюзій і зменшення локальної затримки. При цьому досягається висока точність поз і геометрії,

відсутність дрейфу, природна сумісність з оцінкою ключових точок/сегментацією для VR-примірки. Разом з тим необхідно враховувати чутливість до оклюзій та умов освітлення, потребу в продуманому розміщенні камер.

Інерційний метод трекінгу — це відстеження положення та орієнтації за даними інерціального модуля (IMU), що містить гіроскопи та акселерометри (іноді також магнітометр) [13]. Гіроскопи вимірюють кутові швидкості, акселерометри — лінійні прискорення. Ці сигнали інтегрують у часі, щоб отримати орієнтацію (кватерніон/матриця обертання), швидкість і, за потреби, позицію. Переваги — дуже мала затримка і висока частота оновлення, робота без камер і без проблем оклюзій; недолік — накопичувальний дрейф (помилки зростають при інтегруванні), тому практично завжди застосовують фільтрацію та корекцію, зокрема, EKF/UKF/IEKF, нуль-швидкісні апдейти (ZUPT), вирівнювання по гравітації, а в реальних VR-системах — злиття з оптикою (VIO), де оптичні спостереження «прив'язують» масштаб/орієнтацію, а IMU згладжує рух і тримає трек між кадрами або під час коротких оклюзій.

Магнітний (ЕМ) метод трекінгу [14] — це відстеження позиції та орієнтації об'єкта у просторі за штучним магнітним полем. У сцені є передавач (джерело поля) з котушками, що генерують відомі у часі сигнали, і приймач на об'єкті з триосьовими датчиками (магнітометрами/котушками). За виміряними компонентами поля на приймачі система обчислює 6DoF-позу (позицію та орієнтацію), розв'язуючи обернену задачу з урахуванням моделі поля. Такий метод дозволяє працювати без камер і без оклюзій, не залежить від освітлення, здатен давати абсолютну орієнтацію/позицію у межах робочого об'єму; типова затримка низька, а оновлення стабільні навіть під час швидких рухів. Проте необхідно враховувати обмеження, серед яких чутливість до електромагнітних завад і металевих предметів, які спотворюють поле, обмежений діапазон (помилка зростає з відстанню, зазвичай десятки сантиметрів—півтора метра від передавача), потребу у калібруванні (компенсація спотворень, спричинених жорстким і м'яким намагнічуванням) і ретельній конфігурації сцени. У динамічних або насичених металом просторах точність і повторюваність можуть істотно деградувати. Для VR-примірочної ЕМ-трекінг може бути корисним у контрольованих демо-зонах або медичних/статичних сценаріях, але через залежність від оточення в ритейлових умовах його зазвичай використовують рідко або як допоміжний канал у гібридних системах (поряд з оптикою/IMU), де оптика забезпечує геометричну точність, а інерційний шар — плавність і низьку латентність.

Для обґрунтованого обрання методу трекінгу з метою використання його при розробленні VR-примірочної застосуємо метод аналізу ієрархій. Обиратимемо із трьох альтернатив - оптичного (камери), інерційного і магнітного трекінгу.

Метод аналізу ієрархій (АНР, Т. Сааті) — це структурований підхід до багатокритеріального вибору, у якому складну проблему розкладають на ієрархію «мета → критерії → підкритерії (за потреби) → альтернативи». Для кожної матриці попарних порівнянь обчислюють вектор пріоритетів (власний вектор) і перевіряють узгодженість суджень за індексом/коефіцієнтом узгодженості (CI, CR;

прийнятно $CR < 0.10$). Локальні пріоритети альтернатив за критеріями агрегують із вагами критеріїв у глобальні бали, що сприяють ранжуванню варіантів.

Крок 1. Постановка задачі

Метою використання методу аналізу ієрархій є обрання методу трекінгу для VR-примірочної. Розглядаємо три альтернативи: A_1 — оптичний (камери), A_2 — інерційний (IMU), A_3 — магнітний. Оцінювання проводимо за п’ятьма критеріями: C_1 — «Точність», C_2 — «Затримка запиту», C_3 — «Надійність/стійкість до дрейфу/завад», C_4 — «Вартість», C_5 — «Складність інтеграції».

Крок 2. Формування команди експертів

Формується команда експертів з фахівців VR/комп’ютерного зору/інженерії UI/UX, щоб отримати валідні ваги критеріїв для вибору методу трекінгу за критеріями «Точність», «Затримка», «Надійність», «Вартість», «Інтеграція» на основі узгодженої думки.

До складу експертів висуваються кваліфікаційні вимоги щодо компетентностей та їх кількості. Команда експертів складається із 7 осіб, серед яких 3 фахівці з CV/трекінгу, 2 інженери VR технологій, 1 менеджер продукту/UX, 1 системний архітектор.

Часто спостерігається ситуація, коли експерти мають однакові вагові коефіцієнти. Проте у даній ситуації експерти мають різну компетентність і вплив у контексті задачі вибору методу трекінгу для віртуальної примірочної. Проводимо присвоєння ваг 7 експертам, що відображає їхній профіль та релевантність до теми:

Таблиця 1

Структура експертної групи

Категорія експертів	Кількість	Роль у рішенні	Орієнтовна вага однієї особи	Загальна вага групи
Фахівці з CV/трекінгу (A)	3	Основна компетенція у методах оптичного та інерційного трекінгу	0.17	0.51
Інженери VR (B)	2	Відповідальні за інтеграцію трекінгу в VR-середовище, latency, стабільність	0.13	0.26
Менеджер продукту / UX (C)	1	Відповідає за досвід користувача та практичну доцільність	0.10	0.10
Системний архітектор (D)	1	Відповідальний за узгодження технологій у системі	0.13	0.13

Разом $\sum w_k = 1,00$. Розподіл ваг для кожного із 7 експертів $w_k \geq 0$.

Таблиця 2

Ваги експертів

Експерт	Спеціалізація	Вага w_k
E_1	CV / трекінг	0.17
E_2	CV / трекінг	0.17
E_3	CV / трекінг	0.17
E_4	VR інженер	0.13
E_5	VR інженер	0.13
E_6	Менеджер продукту / UX	0.10
E_7	Системний архітектор	0.13

Ваги всіх експертів рівнозначні, маємо K оцінок $a^{(1)}, \dots, a^{(K)}$. Геометричне середнє обраховуємо за формулою:

$$\bar{a}_{ij} = \left(\prod_{k=1}^K a_{ij}^{(k)\frac{1}{K}} \right) = \exp \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \ln a_{ij}^{(k)} \right). \quad (1)$$

Після такого усереднення складаємо агреговану матрицю $\bar{A} = \bar{a}_{ij}$ (з властивостями $\bar{a}_{ij} = \frac{1}{\bar{a}_{ij}}$ $\bar{a}_{ii} = 1$). Тут показник $\frac{1}{k}$ — це «усереднення» в лог-просторі.

Беремо середнє арифметичне лог-оцінок, а потім повертаємось з лог-простору експонентою.

Якщо експерти мають різну важливість і їм присвоюється певні ваги. У нашому дослідженні експерти мають різні ваги w_k (сума = 1), у агрегації окремих суджень (Aggregation of Individual Judgments, AIJ) використовують зважене геометричне середнє:

$$\bar{a}_{ij} = \left(\prod_{k=1}^K a_{ij}^{(k)} \right)^{w_k}. \quad (2)$$

Якщо кожен експерт має вагу w_k (де $\sum_k w_k = 1$), то ми вже беремо зважене середнє лог-оцінок:

$$\bar{a}_{ij} = \exp \left(\sum_{k=1}^K w_k \ln a_{ij}^{(k)} \right) = \left(\prod_{k=1}^K a_{ij}^{(k)} \right)^{w_k}. \quad (3)$$

Звідси й показник ступеня w_k : це «частка впливу» k -го експерта у зваженому середньому в лог-просторі. Нормування $\sum w_k = 1$ гарантує, що ми справді усереднюємо, а не масштабуємо.

Зважену AIJ-агрегацію для 3 альтернатив із заданими оцінками 7 експертів і вагами:

Ваги експертів (за ролями) $w = \{0,17; 0,17; 0,17; 0,13; 0,13; 0,10; 0,13\}$, $\sum w_k = 1$.

Оцінки (за парами) $a_{12}^{(k)} = \{5, 3, 4, 2, 6, 3, 5\}$, $a_{13}^{(k)} = \{4, 5, 3, 7, 5, 4, 6\}$, $a_{23}^{(k)} = \{12, 13, 12, 1, 12, 12, 13\}$.

Розрахуємо зважене геометричне середнє (AIJ з вагами)

$$\bar{a}_{ij} = \exp \left(\sum_k w_k \ln a_{ij}^{(k)} \right) = \prod_k \left(a_{ij}^{(k)} \right)^{w_k}.$$

$$\bar{a}_{12} \approx \exp \left(\sum_{k=1}^7 w^{(k)} \ln a_{12}^{(k)} \right) \approx 3,812.$$

$$\bar{a}_{13} \approx \exp\left(\sum_{k=1}^7 w^{(k)} \ln a_{13}^{(k)}\right) \approx 4,617.$$

$$\bar{a}_{23} \approx \exp\left(\sum_{k=1}^7 w^{(k)} \ln a_{23}^{(k)}\right) \approx 0,4845.$$

$$\text{Із реципрокністю } \bar{a}_{21} = \frac{1}{\bar{a}_{12}} \approx 0,2623, \bar{a}_{31} = \frac{1}{\bar{a}_{13}} \approx 0,2166, \bar{a}_{32} = \frac{1}{\bar{a}_{23}} \approx 2,0641.$$

Тобто замість простого середнього ($1/K$) використовується зважене середнє в лог-просторі — експерти з більш релевантною експертизою (CV/трекінг, VR) матимуть більший вплив на агреговані оцінки. 3 експерти з CV/трекінгу дають більшу частку впливу ($\approx 50\%$), адже саме трекінг — предмет оцінювання. VR-інженери — $\approx 1/4$ ваги, бо впливають на інтеграцію у середовище. Архітектор і продакт-менеджер — разом $\approx 1/4$, забезпечуючи системну цілісність і практичність рішення. Далі у кожній парі критеріїв експерт вказує, наскільки один важливіший за інший.

Крок 3. Побудова ієрархії

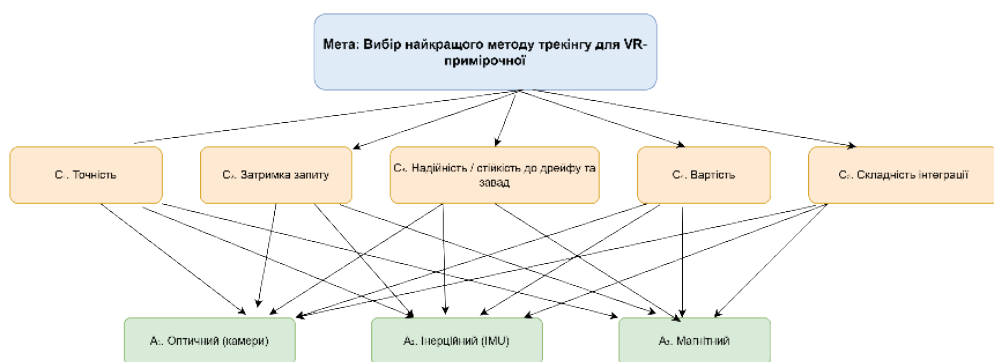


Рис. 1. Ієрархія (мета → критерії → альтернативи)

Крок 4. Збір індивідуальних суджень

Кожен експерт k заповнює матриці $M^{(k)}$. Забезпечте логіку введення: автоматичне віддзеркалення $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$, підсвітка явних протиріч (наприклад, транзитивність). Парні порівняння критеріїв за шкалою Сааті 1–9.

Матриця 5×5 (рядок «важливіший за» стовпець). Для VR-примірконої точність важливіша за інше; надійність трохи важливіша за затримку; вартість і складність — дорівнюють.

$$M_c = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 7 & 5 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 5 & 3 \\ 1/3 & 2 & 1 & 4 & 3 \\ 1/7 & 1/5 & 1/4 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Ваги критеріїв (метод геометричних середніх, нормалізовано):

$$w_c = [0.444, 0.198, 0.231, 0.065, 0.062],$$

де «Точність» складає 44.4%, «Затримка» - 19.8%, «Надійність» - 23.1%, «Вартість» - 6.5%, «Інтеграція» - 6.2%.

Перевірка узгодженості $\lambda_{\max} = 5.278, CI = 0.0695, CR = 0.062 < 0.10$: — узгоджено.

Крок 5. Парні порівняння альтернатив за кожним критерієм

Проведено парне порівняння за кожним критерієм.

Критерій C_1 Точність

A_1 — Оптичний $> A_2$ — Інерційний (3), A_1 — Оптичний (камери) $> A_3$ — Магнітний (5), A_2 — Інерційний $> A_3$ — Магнітний (2).

$$M_{Acc} = \begin{matrix} & 1 & 3 & 5 \\ 1 & & & \\ 3 & 1 & 2 & \\ 5 & 1/5 & 1/2 & 1 \end{matrix} \Rightarrow w_{Acc} = [0.648, 0.230, 0.122], CR = 0.003.$$

Критерій C_2 Затримка відгуку

A_2 — Інерційний найменша затримка; A_1 — Оптичний (камери) середня; A_3 — Магнітний найбільша.

$$M_{Lat} = \begin{matrix} & 1 & 1/3 & 2 \\ 1 & & & \\ 1/3 & 3 & 1 & 4 \\ 2 & 1/2 & 1/4 & 1 \end{matrix} \Rightarrow w_{Lat} = [0.238, 0.625, 0.137], CR = 0.016.$$

Критерій C_3 Надійність.

A_1 — Оптичний (камери) — без дрейфу, але наявна оклюзія; A_2 — Інерційний — дрейф; A_3 — Магнітний — чутливість до металу/ЕМЗ.

$$M_{Rob} = \begin{matrix} & 1 & 2 & 4 \\ 1 & & & \\ 2 & 1/2 & 1 & 3 \\ 4 & 1/4 & 1/3 & 1 \end{matrix} \Rightarrow w_{Rob} = [0.558, 0.320, 0.122], CR = 0.016.$$

Критерій C_4 Вартість.

A_2 — Інерційний виявився найдешевшим, A_1 — Оптичний (камери); A_3 — Магнітний є найдорожчими.

$$M_{Cost} = \begin{matrix} & 1 & 1/3 & 2 \\ 1 & & & \\ 1/3 & 3 & 1 & 5 \\ 2 & 1/2 & 1/5 & 1 \end{matrix} \Rightarrow w_{Cost} = [0.230, 0.648, 0.122], CR = 0.003.$$

Критерій C_5 - Складність інтеграції

A_2 — Інерційний найлегше інтегрувати; A_1 — Оптичний (камери) — середня складність інтеграції; A_3 — Магнітний — найскладніший для інтеграції.

$$M_{Int} = \begin{matrix} & 1 & 1/4 & 2 \\ 4 & 1 & 3 & \Rightarrow w_{Int} = [0.218, 0.630, 0.151], CR = 0.093, \\ & 1/2 & 1/3 & 1 \end{matrix}$$

що в межах ≤ 0.1 і є прийнятним.

Крок 6. Агрегування пріоритетів (глобальні ваги альтернатив)

Векторкритеріїв w_c множимона матрицю локальних ваг $[w_{Acc}, w_{Lat}, w_{Rob}, w_{Cost}, w_{Int}]$.

Результат (глобальні пріоритети) для A_1 — Оптичний (камери) склало 0,492, A_2 — Інерційний — 0,381, A_3 — Магнітний — 0,127.

Отже, A_1 — Оптичний (камери) трекінг для VR-примірконої має найвищий пріоритет.

Крок 7. Агрегація суджень у групові матриці (AIJ)

Індивідуальні матриці $M^{(k)} = [a_{ij}^{(k)}]$ об'єднуємо у групову $M^{group} = [\bar{a}_{ij}]$ за формулою зваженого геометричного середнього:

$$\bar{a}_{ij} = \exp \left(\frac{\sum_{k=1}^K w^{(k)} \ln a_{ij}^{(k)}}{\sum_{k=1}^K w^{(k)}} \right), \quad (4)$$

де $w^{(k)}$ — ваги експертів (для рівних ваг формула спрощується до $\bar{a}_{ij} = \left(\prod a_{ij}^{(k)} \right)^{\frac{1}{K}}$. Геометричне середнє використано завдяки його робастності до викидів і збереженню взаємної оберненості елементів матриці шкали Сааті.

Для кожного експерта e виконується перевірка логічної узгодженості матриці парних порівнянь критеріїв M_C^e розміром $n \times n$. Розраховуються такі показники:

$$CI^{(e)} = \frac{(\lambda_C^{(e)} - n)}{(n-1)}; \quad (5)$$

де $CI^{(e)}$ — індекс узгодженості Сааті, що показує ступінь відхилення суджень експерта від ідеальної узгодженості; n — кількість критеріїв, що порівнюються; $\lambda_C^{(e)}$ — найбільше власне значення матриці M_C^e , яке відображає узгодженість суджень. Для ідеально узгодженої матриці $\lambda_{max} = n$.

$$CR^{(e)} = \frac{CI^{(e)}}{RI_n}, \quad (6)$$

де $CR^{(e)}$ — коефіцієнт узгодженості, який порівнює реальний рівень узгодженості з випадковим. Якщо $CR^{(e)} < 0.10$ — прийнятна узгодженість, якщо $0.10 < CR^{(e)} \leq 0.20$ — допустимо для складних задач або великого n , а при $CR^{(e)} \geq 0.10$ — судження варто переглянути; RI_n — випадковий індекс (Random Index), табличне значення середнього CI [11] для випадкових матриць розмірності n у нашому випадку для $n = 5$ $RI_5 = 1.12$.

Для розміру $n = 5$ використано табличне значення RI_5 . За результатом $CR^{(group)} = 0,062 < 0,10$ одержано $CI^{(group)} = CR^{(group)} \cdot RI_5 = 0,069$ і $\lambda_{max}^{(group)} = n + (n-1) \cdot CI^{(group)} = 5,278$, що свідчить про прийнятну узгодженість суджень.

Агрегацію суджень (АІІ, геометричне середнє) проводимо за формулою:

$$a_{ij}^{group} = \left(\prod_{e=1}^E a_{ij}^{(e)\frac{1}{E}} \right), \quad (7)$$

де $a_{ij}^{(k)}$ — оцінка співвідношення «і проти j» від k-го експерта, K — кількість експертів. Потім з агрегованої матриці $\bar{A} = \bar{a}_{ij}$ обчислюють єдиний вектор пріоритетів.

Ми не усереднюємо вже обчислені пріоритети експертів, а безпосередньо агрегуємо їх попарні порівняння a_{ij} у матрицях суджень за допомогою геометричного середнього за формулою (5)

Використовуємо геометричне середнє, оскільки цей метод має меншу чутливість до викидів. Збереження реципрокності досягається за умови $a_{ij}^{(k)} = \frac{1}{a_{ji}^{(k)}}$, якщо $\bar{a}_{ij} = \frac{1}{\bar{a}_{ji}}$. Це критично для коректності матриці АНР. Мультиплікативна природа шкали Сааті дозволяє реалізовувати геометричне середнє, яке відповідає лог-шкалі.

Проведемо розрахунки для 3 альтернатив A_1 — оптичний (камери), A_2 — інерційний (IMU), A_3 — магнітний та оцінками 7 експертів, з АІІ-агрегацією (геометричним середнім).

Вихідні парні оцінки 7 експертів

Для пари A_1 над A_2 : $a_{12}^{(k)} \in \{5, 3, 4, 2, 6, 3, 5\}$.

Для пари A_1 над A_3 : $a_{13}^{(k)} \in \{4, 5, 3, 7, 5, 4, 6\}$.

Для пари A_2 над A_3 : $a_{23}^{(k)} \in \{1/2, 1/3, 1/2, 1, 1/2, 1/2, 1/3\}$.

АІІ-агрегація (геометричні середні по кожному елементу) за формулою (7)

$$\bar{a}_{12} \approx 3,769 \Rightarrow \bar{a}_{21} = \frac{1}{\bar{a}_{12}} \approx 0,265.$$

$$\bar{a}_{13} \approx 3,769 \Rightarrow \bar{a}_{31} = \frac{1}{\bar{a}_{13}} \approx 0,213.$$

$$\bar{a}_{23} \approx 0,492 \Rightarrow \bar{a}_{32} = \frac{1}{\bar{a}_{23}} \approx 2,034.$$

Агрегована матриця парних порівнянь $\bar{A}$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 1 & 3,769 & 4,697 \\ 0,265 & 1 & 0,492 \\ 213 & 2,034 & 1 \end{bmatrix}.$$

Групові пріоритети (метод геометричних середніх рядків)

$$w_i \alpha \left(\prod_{j=1}^3 \bar{a}_{ij} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad w = \frac{w}{\sum w_i}. \quad (8)$$

Отримуємо $w_{A_1} \approx 0,673$, $w_{A_2} \approx 0,131$, $w_{A_3} \approx 0,196$.

Таким чином побудовано $\bar{A}$ через АІІ-агрегацію по кожній парі (трьом незалежним парам для 3 альтернатив). А також обчислено групові ваги: A_1 (оптичний) ≈ 0.673 , A_3 (магнітний) ≈ 0.196 , A_2 (Інерційний) ≈ 0.131 . Узгодженість групового судження в межах норми ($CR \approx 0.084$).

Крок 8. Перевірка стійкості вибору.

Ми дослідили, наскільки вибір методу трекінгу стабільний до зміни ваг критеріїв. Виконано одновимірну чутливість (підсилення ваги окремого критерію з подальшою нормалізацією) та вказано пороги рівності між альтернативами.

Початкові ваги критеріїв $w \in R^m$, $\sum_i w_i = 1$. Підсилення ваги критерію j у $\alpha > 0$ разів з перенормуванням:

$$\tilde{w}_i(\alpha) = \begin{cases} \frac{\alpha w_j}{\alpha w_j + \sum_{r \neq j} w_r}, & i = j \\ \frac{\alpha w_j}{\alpha w_j + \sum_{r \neq j} w_r}, & i \neq j \end{cases} \quad (9)$$

де w_i — початкова (базова) вага i -го критерію у векторі ваг $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, $\sum_i w_i = 1$; j — індекс того критерію, чию вагу ми тимчасово змінюємо для аналізу чутливості; α — коефіцієнт підсилення або ослаблення ваги вибраного критерію j — показує, у скільки разів ми змінюємо його важливість (наприклад, $\alpha = 2$ означає «вдвічі важливіше»); $\sum_{r \neq j} w_r$ — сума всіх інших ваг, крім критерію; $\tilde{w}_i(\alpha)$ — нові (нормовані) ваги після зміни ваги критерію j і перенормування, щоб сума знову дорівнювала 1.

Коли ми змінюємо вагу одного критерію j у α разів, потрібно перерахувати всі ваги, щоб зберегти нормування $\sum_i \tilde{w}_i = 1$. Такі процедуру виконуємо за формулою вище. Для критерію, який ми змінюємо ($i = j$), вага зростає пропорційно αw_j . Для решти $i \neq j$ ваги зменшуються відносно тієї ж нової суми $\alpha w_j + \sum_{r \neq j} w_r$.

Глобальний бал альтернативи A обрахуємо за формулою:

$$S_a(\alpha) = \sum_{i=1}^m \tilde{w}_i(\alpha) p_{i,a}, \quad (10)$$

де — локальна вага альтернативи A за критерієм.

Виконано одновимірний аналіз чутливості за критерієм «Затримка відгуку» шляхом масштабування його ваги у α разів та подальшого нормування вектора ваг (див. формулу (1)). Глобальні бали альтернатив $S_a(\alpha)$ обчислювали як зважену суму локальних пріоритетів (локальна вага $\times$ вага критерію).

Таблиця 3

Підсумкові бали альтернатив при різних підсиленнях ваги критерію «Затримка відгуку»

α підсилення «Затримки відгуку»	A_1 Оптичний	A_2 Інерційний	A_3 Магнітний	Лідер
1.00	0.492	0.381	0.127	A_1
1.50	0.466	0.405	0.129	A_1
2.45	0.436	0.436	0.129	Паритет
3.00	0.420	0.451	0.129	A_2

Отримано поріг рівності $\alpha^* \approx 2.45$, за якого A_1 — Оптичний (камери) та A_2 — Інерційний (IMU) мають однаковий підсумковий бал. Для $\alpha < 2.45$ лідером лишається A_1 — Оптичний (камери), що підтверджує стійкість результату за реалістичних змін пріоритетів; лише при $\alpha > 2.45$ першість переходить до A_2 — Інерційний (IMU).

Щоб альтернатива A_2 — Інерційний (IMU) трекінг стала першою, «Затримка відгуку» має бути важливішою приблизно у 2.5 рази від базового налаштування. За поточних пріоритетів (де точність і надійність критичніші) A_1 — Оптичний (камери) зберігає перевагу.

Таблиця 4

Ваги альтернатив за кожним критерієм

	Оптичний	Інерційний	Магнітний
Точність	0.648	0.230	0.122
Затримка	0.238	0.625	0.137
Надійність	0.558	0.320	0.122
Вартість	0.230	0.648	0.122
Інтеграція	0.218	0.630	0.151

У кожному рядку сума значень дорівнює 1. За критерієм «Точність» найбільшу вагу має Оптичний.

Таблиця 5

Вплив ваги критеріїв на загальний бал альтернатив

	Оптичний	Інерційний	Магнітний
Точність	0.288	0.102	0.054
Затримка	0.047	0.124	0.027
Надійність	0.129	0.074	0.028
Вартість	0.015	0.042	0.008
Інтеграція	0.014	0.039	0.009

Таблиця засвідчує, наскільки кожен критерій вплинув на загальний бал альтернативи (локальна вага $\times$ вага критерію). Сума по стовпчику = підсумковий бал.

Таблиця 6

Підсумкові загальні бали альтернатив

	Оптичний	Інерційний	Магнітний
Загальний бал	0.492	0.381	0.127

Фінальні оцінки після зважування за критеріями. Лідером є Оптичний трекінг; Інерційний — другий; Магнітний — з помітним відставанням. Що підтверджує коректність попередніх розрахунків.

Крок 9. Інтерпретація результатів для VR-примірочної

A_1 Оптичний (камери) метод посідає перше місце завдяки поєднанню найвищої точності та надійності. За критерієм «Точність» (C_1) він має найбільший локальний пріоритет 0.648, а за «Надійністю» (C_3) — 0.558. Це безпосередньо дає стабільнішу посадку одягу на аватарі, менше випадків проникнення тканини крізь тіло й вищу візуальну правдоподібність. A_2 Інерційний трекінг справді лідирує за критерієм «Затримки відгуку» ($C_2 = 0.625$) та «Простою інтеграції» ($C_5 = 0.630$), однак у зваженій моделі АНР сукупної переваги цих двох критеріїв недостатньо, щоб переважити значущість критеріїв «Точність» та «Надійність». Магнітний підхід поступається за більшістю критеріїв (чутливість до ЕМ-завад, вартість/інтеграція), тому впевнено перший.

Вважаємо за доцільне використовувати оптичний трекінг як базовий у VR-примірочній. Додати легкий IMU-шар (гібрид) для компенсації коротких оклюзій і мікродрижання — це покращує затримку (C_2) без суттєвого погіршення точності/надійності (C_1/C_3). У середовищах із великою кількістю металу або сильними ЕМ-завадами уникати магнітних систем або обмежувати їх роллю допоміжного джерела.

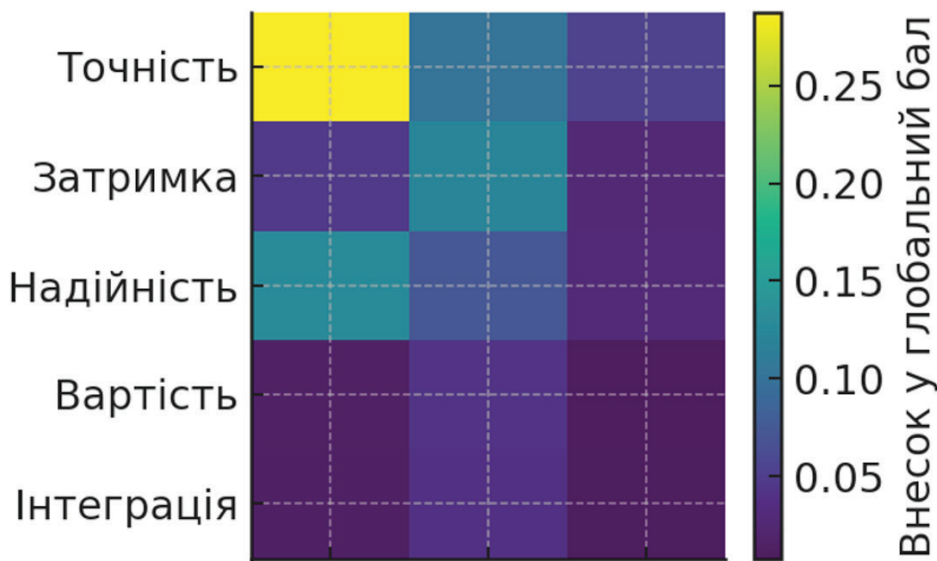


Рис. 1. Теплова карта внесків критеріїв у альтернативи

На тепловій мапі інтенсивність клітинки показує, наскільки конкретний критерій «підживлює» певну альтернативу у глобальному рейтингу.

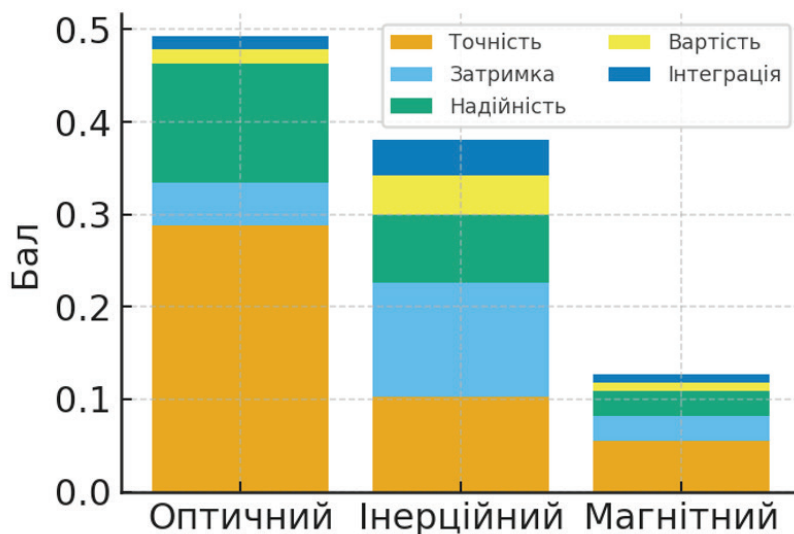


Рис. 2. Розклад глобального балу за критеріями (стек)

У стековій діаграмі кожен стовпчик — альтернатива; сегменти — внесок критеріїв (сума сегментів = глобальний бал).

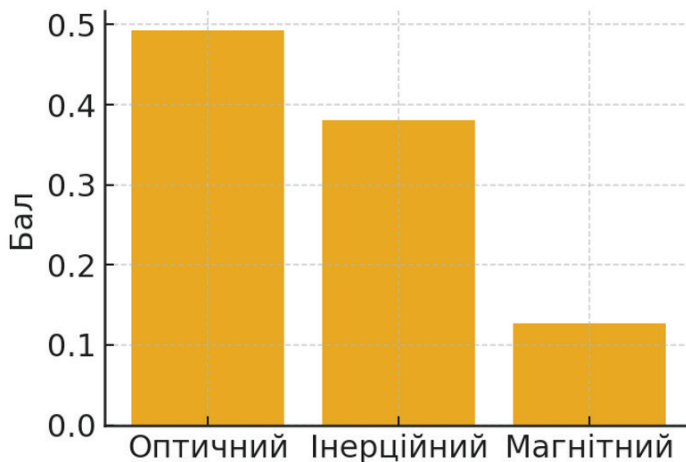


Рис. 3. Підсумкові глобальні бали альтернатив

Найбільший внесок для оптичного трекінгу дають Точність і Надійність, що і пояснює його першість. Оптичний трекінг найсильніший у «Точності» та «Надійності», інерційний — у «Затримці» та «Інтеграції», магнітний поступається всюди.

Обираємо оптичний трекінг як базовий. Інерційний корисний як допоміжний (гібрид для оклюзій), магнітний — недоцільний у більшості сценаріїв примірочної.

На основі проведених досліджень запропонуємо рекомендації для розробників. Для розробників систем VR/AR доцільно впроваджувати гібридні трекінгові

алгоритми з адаптивним фільтром Калмана, що враховує контекст середовища, з метою компенсації затримок відтворення та покращення синхронізації кадрів. Для інженерів і проєктантів рекомендовано оптимізувати геометрію розташування камер безмаркерної оптики таким чином, щоб зменшити вплив однобічної чутливості сенсорів та забезпечити стабільне позиціонування у діапазоні $\pm 3^\circ$. Для освітніх і тренінгових платформ інтегрувати створену VR-модель у навчальні лабораторії з метою відтворення реалістичних сценаріїв взаємодії користувачів з віртуальними об'єктами у режимі реального часу.

У подальших дослідженнях будемо розвивати напрям інтелектуальної компенсації руху із залученням нейронних мереж, що дозволить прогнозувати зміни пози користувача й адаптивно змінювати параметри рендерингу для мінімізації затримки «рух-фотон».

Висновки. У результаті проведеного дослідження сформовано теоретичні засади та практичну модель інтеграції технологій безмаркерного відстеження руху у системи віртуальної та доповненої реальності для застосування у галузях навчання, промислового моделювання та візуалізації складних об'єктів. Обґрунтовано доцільність використання архітектури з поетапною мінімізацією затримки «рух-фотон» та розподілом обчислювальних процесів між пристроями оптичного захоплення та GPU-модулями.

Розроблено аналітичну модель оцінювання просторової точності та часової стабільності систем трекінгу, яка враховує однобічну чутливість сенсорів, частоту оновлення та кореляцію між обчислювальними і циклами, що відображаються. Запропоновано критерії оптимізації параметрів камери, частоти кадрів і алгоритмів прогнозування руху для підвищення реалістичності віртуальної взаємодії користувача. Результати підтвердили, що комбіноване використання безмаркерної оптики, гібридних сенсорних моделей та методів комп'ютерного зору дозволяє зменшити затримку відображення до 15–20 мс при збереженні точності позиціонування в межах 2–3 мм, що є прийнятним для більшості VR-сценаріїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sadeghi-Niaraki A., Choi S.-M. A survey of marker-less tracking and registration techniques for health & environmental applications to augmented reality and ubiquitous geospatial information systems. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 10. Art. 2997. DOI: 10.3390/s20102997.
2. Vox J. P., Weber A., Wolf K. I., Izdebski K., Schüler T., König P., Wallhoff F., Friemert D. An evaluation of motion trackers with virtual reality sensor technology in comparison to a marker-based motion capture system based on joint angles for ergonomic risk assessment. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 9. Art. 3145. DOI: 10.3390/s21093145.
3. Warburton M., Mon-Williams M., Mushtaq F. та ін. Measuring motion-to-photon latency for sensorimotor experiments with virtual reality systems. *Behavior Research Methods*. 2023. Vol. 55. С. 3658–3678. DOI: 10.3758/s13428-022-01983-5.
4. Dixit A., Kumar S., Gupta R. Minimizing the motion-to-photon delay (MPD) in VR. *arXiv*. 2023. arXiv:2301.01234.

5. Robotics and Perception Group. Visual and Inertial Odometry and SLAM. URL: https://rpg.ifi.uzh.ch/research_vo.html.
6. Yang J., Xu X., Xu Z., Wu Z., Chu W. RWKV-VIO: An Efficient and Low-Drift Visual–Inertial Odometry Using an End-to-End Deep Network. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 18. Art. 5737. DOI: 10.3390/s25185737.
7. LaScalza S., Arico J., Hughes R. Effect of metal and sampling rate on accuracy of Flock of Birds electromagnetic tracking system. *Journal of Biomechanics*. 2003. Vol. 36, No. 1. C. 141–144. DOI: 10.1016/S0021-9290(02)00322-6.
8. Poulin F., Amiot L.-P. Interference during the use of an electromagnetic tracking system under OR conditions. *Journal of Biomechanics*. 2002. Vol. 35, No. 6. C. 733–737. DOI: 10.1016/S0021-9290(02)00036-2.
9. Cavaliere M., Cantillon-Murphy P. Enhancing electromagnetic tracking accuracy in medical applications using pre-trained witness sensor distortion models. *Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2024. Vol. 19, No. 1. C. 27–31. DOI: 10.1007/s11548-023-02994-z.
10. Deveci M. Measuring head-mounted display’s (HMD) motion-to-photon (MTP) latency. *OptoFidelity*. 2021. 20 травня. URL: <https://www.optofidelity.com/insights/blogs/measuring-head-mounted-displays-hmd-motion-to-photon-mtp-latency>.
11. Saaty T. L. Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process. In: Schmoldt D. L., Kangas J., Mendoza G. A., Pesonen M. (eds). *The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making. Managing Forest Ecosystems*, vol. 3. Dordrecht: Springer, 2001. C. 15–35. DOI: 10.1007/978-94-015-9799-9_2.
12. Korak G., Kucera G. Optical Tracking System. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2015. Vol. 61. DOI: 10.1515/eletel-2015-0021.
13. Lang P., Kusej A., Pinz A., Brasseur G. Inertial tracking for mobile augmented reality. *Conference Record — IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. 2002. Vol. 2. C. 1583–1587. DOI: 10.1109/IMTC.2002.1007196.
14. Franz A., Haidegger T., Birkfellner W., Cleary K., Peters T., Maier-Hein L. Electromagnetic Tracking in Medicine — A Review of Technology, Validation, and Applications. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2014. DOI: 10.1109/TMI.2014.2321777.

REFERENCES

1. Sadeghi-Niaraki A., Choi S.-M. A survey of marker-less tracking and registration techniques for health & environmental applications to augmented reality and ubiquitous geospatial information systems. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 10. Art. 2997. DOI: 10.3390/s20102997.
2. Vox J. P., Weber A., Wolf K. I., Izdebski K., Schöler T., König P., Wallhoff F., Friemert D. An evaluation of motion trackers with virtual reality sensor technology in comparison to a marker-based motion capture system based on joint angles for ergonomic risk assessment. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 9. Art. 3145. DOI: 10.3390/s21093145.
3. Warburton M., Mon-Williams M., Mushtaq F. та ін. Measuring motion-to-photon latency for sensorimotor experiments with virtual reality systems. *Behavior Research Methods*. 2023. Vol. 55. C. 3658–3678. DOI: 10.3758/s13428-022-01983-5.
4. Dixit A., Kumar S., Gupta R. Minimizing the motion-to-photon delay (MPD) in VR. *arXiv*. 2023. arXiv:2301.01234.

5. Robotics and Perception Group. Visual and Inertial Odometry and SLAM. URL: https://rpg.ifi.uzh.ch/research_vo.html.
6. Yang J., Xu X., Xu Z., Wu Z., Chu W. RWKV-VIO: An Efficient and Low-Drift Visual-Inertial Odometry Using an End-to-End Deep Network. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 18. Art. 5737. DOI: 10.3390/s25185737.
7. LaScalza S., Arico J., Hughes R. Effect of metal and sampling rate on accuracy of Flock of Birds electromagnetic tracking system. *Journal of Biomechanics*. 2003. Vol. 36, No. 1. C. 141–144. DOI: 10.1016/S0021-9290(02)00322-6.
8. Poulin F., Amiot L.-P. Interference during the use of an electromagnetic tracking system under OR conditions. *Journal of Biomechanics*. 2002. Vol. 35, No. 6. C. 733–737. DOI: 10.1016/S0021-9290(02)00036-2.
9. Cavaliere M., Cantillon-Murphy P. Enhancing electromagnetic tracking accuracy in medical applications using pre-trained witness sensor distortion models. *Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2024. Vol. 19, No. 1. C. 27–31. DOI: 10.1007/s11548-023-02994-z.
10. Deveci M. Measuring head-mounted display's (HMD) motion-to-photon (MTP) latency. OptoFidelity. 2021. 20 травня. URL: <https://www.optofidelity.com/insights/blogs/measuring-head-mounted-displays-hmd-motion-to-photon-mtp-latency>.
11. Saaty T. L. Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process. In: Schmoldt D. L., Kangas J., Mendoza G. A., Pesonen M. (eds). *The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making. Managing Forest Ecosystems*, vol. 3. Dordrecht: Springer, 2001. C. 15–35. DOI: 10.1007/978-94-015-9799-9_2.
12. Korak G., Kucera G. Optical Tracking System. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2015. Vol. 61. DOI: 10.1515/eletel-2015-0021.
13. Lang P., Kusej A., Pinz A., Brasseur G. Inertial tracking for mobile augmented reality. Conference Record — IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2002. Vol. 2. C. 1583–1587. DOI: 10.1109/IMTC.2002.1007196.
14. Franz A., Haidegger T., Birkfellner W., Cleary K., Peters T., Maier-Hein L. Electromagnetic Tracking in Medicine — A Review of Technology, Validation, and Applications. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2014. DOI: 10.1109/TMI.2014.2321777.

doi: 10.32403/1998-6912-2025-2-71-33-53

SELECTION OF A TRACKING METHOD FOR A VIRTUAL FITTING ROOM USING THE HIERARCHY ANALYSIS METHOD

N. E. Kunanets, A. I. Kondra

*National University «Lviv Polytechnic»,
12 S. Bandery St., Lviv, 79013, Ukraine
nek.lviv@gmail.com*

The paper tackles the problem of selecting an optimal tracking method for a virtual fitting room (VFR) that overlays digital garments on a user avatar in real time. Because

user experience in VFR depends critically on tracking accuracy, temporal stability, robustness to occlusions, and end-to-end latency, we frame the choice of technology as a multi-criteria decision problem. We employ the Analytic Hierarchy Process (AHP) to compare three representative approaches—optical, inertial, and magnetic tracking—against five criteria: accuracy, latency, reliability (incl. occlusion tolerance), cost of ownership, and integration complexity with 3D/AR rendering pipelines. The study combines a literature-grounded scoring scheme with expert pairwise comparisons and sensitivity analysis. We also report a lightweight prototyping exercise that couples each candidate tracker with a standardized garment draping stack and avatar animation loop, enabling consistent latency and stability measurements under identical test scenes. Results indicate that optical tracking achieves the highest global priority (0.492) due to superior spatial fidelity and mature vision toolchains, while inertial tracking ranks second (0.336), offering strong short-term stability and low marginal latency but requiring drift compensation and calibration. Magnetic tracking (0.172) shows niche suitability in controlled environments because of susceptibility to field disturbances and integration constraints. Sensitivity tests confirm the preference ordering under broad shifts of criterion weights ($\pm 20\%$), and a cost-latency frontier highlights Pareto-efficient blends where a hybrid optical-inertial stack reduces micro-jitter and occlusion gaps without materially increasing latency. We provide a reproducible AHP template, implementation notes for VFR pipelines (pose fusion, temporal filtering, error budgeting), and deployment recommendations for retail settings with variable lighting and space constraints. The proposed method offers a transparent, data-driven basis for technology selection and can be adapted to future trackers (e.g., event-based cameras) and emerging AR frameworks.

Keywords: virtual fitting room, tracking, Analytic Hierarchy Process, optical tracking, inertial sensors, AHP, VR/AR.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2025.

Received 03.10.2025.