

Голові спеціалізованої вченої ради
Д 26.002.07 при Національному
технічному університеті України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37

ВІДГУК

офіційного опонента

провідного наукового співробітника Державного науково-дослідного інституту авіації кандидата технічних наук старшого наукового співробітника Пономаренка Сергія Олексійовича на дисертаційну роботу Лакози Сергія Леонідовича на тему: «Інерціальна система оцінки параметрів руху людини», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.03 – гіроскопи та навігаційні системи

Актуальність теми дисертаційної роботи

В сучасному суспільстві зростає потреба у вирішенні задач оцінки параметрів руху динамічних об'єктів, як технічних, таких як роботи-маніпулятори, так і біологічних, таких як людина. Оцінка параметрів руху людини є актуальною для моніторингу рухової активності людини при діагностиці та лікуванні неврологічних захворювань рухів, у спортивній медицині, на тренуваннях, та для розпізнавання рухів у віртуальній реальності. При цьому відбувається як реєстрація, так і візуалізація параметрів руху людини.

Для оцінки параметрів руху, крім інерціальних, можуть використовуватись оптичні, магнітометричні, механічні, акустичні датчики і

системи. Їх основними недоліками є значні масо-габаритні характеристики і необхідність у спеціально обладнаному приміщенні. При цьому перевагами інерціальних датчиків для дослідження руху людини є їх автономність (можливість використання без спеціально обладнаних площадок), мобільність та малі масу та розміри. Найбільш придатними для таких задач є сучасні мікромеханічні датчики, у створенні та виробництві яких досягнуті досить хороші метрологічні характеристики.

Стрімкий розвиток інерціальних технологій відкриває сьогодні нові можливості для вирішення задач контролю параметрів руху людини на якісно новому рівні. Саме тому застосування інерціальних систем оцінки параметрів руху людини (ІСОПРЛ) мікромеханічного типу є пріоритетною науково-технічною задачею.

Особливості мобільного застосування ІСОПРЛ породжують проблеми змінюваності параметрів датчиків та об'єкта дослідження, а тому застосування ІСОПРЛ потребує врахування проблем завадостійкості, адаптації алгоритмів безплатформних інерціальних навігаційних систем до оцінки параметрів руху людини, розробки методів автономного оцінювання зміни параметрів чутливих елементів інерціальної системи. Для коректної оцінки параметрів руху людини потрібно застосовувати адекватну математичну модель руху людини – біомеханічну модель скелету, раціональне зменшення використовуваних сегментів кінематичних вузлів, визначення суглобових систем координат.

Таким чином, дисертаційна робота Лакози С.Л., яка спрямована на наукове обґрунтування і розробку алгоритмів функціонування інерціальної системи оцінки параметрів руху людини підвищеної завадостійкості та точності, удосконалення та розширення можливостей існуючих методів калібрування, що враховують зміни параметрів чутливих елементів, є актуальною.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків, їх достовірність

У дисертаційній роботі використані відомі моделі датчиків, методи аналізу та синтезу інерціальних систем і традиційні програмні комплекси

моделювання; результати, отримані автором, не суперечать існуючим уявленням про фізичну сутність процесів, які досліджуються; розроблені алгоритми коректно враховують об'єктивні обмеження на функціонування інерціальних систем.

Теоретичні дослідження виконано з використанням сучасного математичного апарату. Результати і висновки отримано методом імітаційного моделювання із застосування пакету MatLab. Достовірність та коректність результатів моделювання та ефективність запропонованих рішень підтверджується використанням реальних експериментальних даних, що отримані від трьох інерціальних вимірювальних блоків ADIS16400/ADIS16405.

Автором особисто розроблено експериментальне обладнання (стенд-імітатор верхньої кінцівки) для перевірки коректності та точності роботи інерціальної системи оцінки параметрів руху людини з комплексним алгоритмом, що використовує сигнали корекції по швидкості та переміщенню, які сформовані на основі біомеханічної моделі скелету людини. У роботі виконано ряд натурних експериментів на даному обладнанні.

Найбільш важливими результатами роботи, що мають наукову новизну, на мою думку, слід вважати:

1. Вперше теоретично обґрунтовано та підтверджено моделюванням принцип розділення каналів корекції безплатформної курсовертикалі, який полягає у використанні для корекції курсовертикалі сигналів акселерометрів та модифікованих сигналів магнітометрів, у яких на основі даних акселерометричного каналу виконано обнулення вертикальної складової вектора індукції магнітного поля Землі без необхідності використання апріорних даних.

2. Дістав подальшого розвитку метод скалярного калібрування для мікромеханічних акселерометрів та магніторезистивних датчиків шляхом введення даних попереднього векторного калібрування та застосування ітеративної процедури калібрування.

3. Удосконалено метод векторного калібрування шляхом оцінювання коефіцієнтів математичної моделі за допомогою фільтра Калмана з введенням

змінних стану, які характеризують шумові складові похибки чутливих елементів, що покращує збіжність результатів калібровки.

4. Вперше для інерціальної системи оцінки параметрів руху людини розроблено інваріантний до прискореного руху кінцівок комплексний алгоритм безплатформної інерціальної навігаційної системи, сигнали корекції по швидкості та переміщенню якого сформовані на основі біомеханічної моделі скелету людини.

Практичне значення результатів, полягає в тому, що:

- розроблено спрощену модель похибок безплатформної курсовертикалі для аналізу впливу похибок чутливих елементів на точність оцінки орієнтації об'єкта;

- розроблено структурні схеми інерціальної системи оцінки параметрів руху людини з корекцією за сигналами по біомеханічній моделі скелету людини;

- виконано аналітичний розрахунок точності корекційних сигналів комплексного алгоритму БНС для інерціальної системи оцінки параметрів руху людини;

- отримано оптимальну модель сигналу акселерометрів по критерію регулярності за допомогою методу групового урахування аргументів;

- розроблено рекомендації стосовно застосування методики скалярного калібрування для датчиків низької точності;

- отримано графічні залежності для оцінки точності знаходження параметрів моделі сигналу датчиків;

- розроблено прикладне програмне забезпечення алгоритму роботи безплатформної курсовертикалі та комплексного алгоритму БНС з корекцією за сигналами по біомеханічній моделі скелету людини;

- розроблено прикладне програмне забезпечення та стенд-імітатор верхньої-кінцівки людини та методика перевірки точності ІСОПРЛ.

Результати дослідження мають практичне впровадження:

- алгоритм безплатформної курсовертикалі та комплексний алгоритм БНС для використання в ІСОПРЛ впроваджено в державній установі «Інститут

травматології та ортопедії Національної академії медичних наук України» (м. Київ);

- алгоритм безплатформної курсовертикалі з використанням принципу розділення каналів корекції та удосконалений скалярний метод калібрування використовується в ТОВ «Гіротех» (м. Київ);

- спрощена модель похибок безплатформної курсовертикалі та стенд-імітатор верхньої кінцівки людини використовуються в навчальному процесі кафедри приладів і систем орієнтації і навігації НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Про використання результатів розробок свідчать відповідні акти впровадження.

Рекомендації щодо використання результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи у вигляді теоретичного обґрунтування, інженерних методик, алгоритмів та рекомендацій можуть бути використанні у приладобудуванні, а саме для розробки і покращення систем оцінки параметрів руху людини при реабілітації та діагностиці у медицині, у спорті, розпізнанні рухів людини у віртуальній реальності та інших задачах.

Зв'язок з науковими програмами та планами

Дисертаційна робота виконувалась у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках ініціативної науково-дослідної роботи «Мікромеханічна система орієнтації медичного призначення» (№ДР 0114U006184), а також відповідно до держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розробка методичного забезпечення та макетного зразка системи обробки віброакустичних сигналів для інформаційно-діагностичних комплексів роторних систем» (№ держреєстрації 0111U002186); «Розробка комплексної інтелектуальної системи моніторингу технічного стану конструкцій в експлуатації» (№ держреєстрації 0113U000498); «Імітаційне та фізичне моделювання автоматизованої системи запобігання витокам палива на українській антарктичній станції «Академік Вернадський» (№ держреєстрації 0115U005639).

Повнота відображення результатів у публікаціях

За темою дисертації опубліковано 23 наукові праці, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях; з них 5 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних; одна стаття в інших виданнях; 1 патент України на корисну модель, 1 патент України на винахід; 2 свідоцтва України про реєстрацію авторського права на твір; 13 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях. Публікації досить повно відображають отримані результати.

Оцінка змісту дисертації

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, виконаною і оформленою відповідно до вимог державного стандарту.

Дисертаційна робота містить вступ, розширені анотації українською та англійською мовою, перелік умовних позначень, чотири основні розділи, загальні висновки по роботі, список використаних джерел та 8 Додатків.

Вступ містить усі необхідні кваліфікаційні ознаки. Висвітлено обґрунтування теми дослідження, мета, задачі, об'єкт, предмет дослідження, методи дослідження; наукова новизна та значущість результатів; особистий внесок, публікації автора, апробація результатів дисертації.

У першому розділі, присвяченому сучасному стану проблеми, що досліджується, розглянуто існуючі системи оцінки параметрів руху людини, проаналізовано питання використання ІСОПРЛ у практичних задачах. Автором розглянуто основні підходи та перелік задач, які необхідно розглянути при розробці алгоритмічного забезпечення функціонування ІСОПРЛ. Проаналізовано питання калібровки системи оцінки параметрів руху людини.

Автором описано алгоритми оцінки орієнтації сегментів тіла людини. Показано, що в аналогічних дослідженнях широко використовуються алгоритми Калманівського типу, в яких виконується комплексування даних акселерометрів і магнітометрів з оцінкою орієнтації, отриманою за сигналами датчиків кутової швидкості. Остаточо сформульовано мету та задачі дослідження, зазначено пункти паспорту спеціальності, яким відповідають дослідження та положення, що виносяться на захист.

Другий розділ присвячено розробці як алгоритмів роботи ІСОПРЛ в цілому, так і алгоритмів визначення орієнтації за допомогою окремого інерціального вимірювального блоку. У цьому розділі автор приводить біомеханічну модель скелету людини, що використовується в роботі. Записані формули для розрахунку суглобових кутів верхньої кінцівки. Для початкової виставки інерціальної системи запропоновано використовувати, розроблений алгоритм безплатформної курсовертикалі на основі фільтра Калмана. У роботі виконано аналіз зв'язків між каналами корекції системи орієнтації, на основі якого показано наявність перехресних зв'язків між каналами корекції в алгоритмах безплатформної курсовертикалі. Для вирішення проблеми взаємного впливу перехресних зв'язків використано принцип розділення каналів корекції безплатформної курсовертикалі, та проведено математичне моделювання.

У даному розділі виконано розробку комплексного алгоритму ІСОПРЛ, нечутливого до прискореного руху об'єкта. Сигнали корекції сформовані із залученням інформації від датчиків кутової швидкості, про орієнтацію сегментів та прийняту біомеханічну модель скелету людини. Виконано аналітичну оцінку рівня похибки визначення переміщення і швидкості сегментів на основі біомеханічної моделі скелету.

Третій розділ присвячено питанням калібрування чутливих елементів ІСОПРЛ. На початку розділу приведено короткий огляд основних напрямків робіт стосовно даного питання. Особливу увагу приділено автономним способам, що дають можливість уточнити значення калібровочних коефіцієнтів без залучення додаткового високоточного обладнання. Дане питання є актуальним для автономного довизначення параметрів датчиків низької точності. На основі методу групового врахування аргументів, виконано вибір оптимальної математичної моделі акселерометрів. Автором розглянуто можливість використання стохастичної інформації про шуми датчиків для покращення результатів процедури калібрування. Використано варіації Алана для оцінки параметрів математичних моделей шумів датчиків, котрі

використовувалися при синтезі розширеного фільтру Калмана для калібрування акселерометрів.

У даному розділі розглянуто питання можливості застосування методу скалярного калібрування для датчиків низької точності. Методом імітаційного моделювання автором отримані чисельні результати. На основі цих даних побудовано графіки, що дають змогу оцінити рівень похибки, з якою будуть отримані параметри моделі похибок датчика.

У четвертому розділі проведено калібрування чутливих елементів трьох інерціальних вимірювальних блоків ІСОПРЛ. Виконано експериментальне дослідження можливості застосування скалярного калібрування для акселерометрів та магнітометрів. У роботі показано, що в умовах, коли значення похибок математичної моделі датчика не перевищують 10%, можна підвищити точність калібрування акселерометрів і магнітометрів при ітераційному використанні скалярного калібрування. Для підвищення точності оцінки параметрів математичної моделі сигналів чутливих елементів запропоновано формувати результуючу модель сигналу датчика, поєднуючи результати скалярного калібрування та еталонних результатів калібрування, виконаних на високоточному обладнанні.

Автор виконав натурні експерименти по перевірці точності розробленого алгоритму безплатформної курсовертикалі (використовується для початкової виставки ІСОПРЛ) в статиці та динаміці на спеціалізованому обладнанні. Виконано імітаційне моделювання розробленого комплексного алгоритму ІСОПРЛ, інваріантного до прискорення кінцівок.

У цьому розділі описано розроблений стенд-імітатор та приведено його характеристики, котрі підтверджують можливість його використання у якості еталонного обладнання. Даний стенд використано для перевірки коректності розроблених у дисертації алгоритмів ІСОПРЛ. Автором дослідження експериментально показано, що у порівнянні з використанням алгоритму безплатформної курсовертикалі, використання комплексного алгоритму в ІСОПРЛ дозволяє знизити похибки системи на $5^\circ \dots 6^\circ$ при вимірюванні кутів ротації із значним діапазоном. При швидких рухах точність оцінки кутів

згинання сегментів стелу підвищується на $1,5^\circ \dots 2^\circ$.

Додатки містять допоміжні та проміжні математичні викладки, акти впровадження результатів роботи, ілюстрації та результати чисельного моделювання, що пояснюють розроблені в дисертації наукові положення.

Мова та стиль

Дисертація написана сучасною науковою українською мовою. Стиль викладення матеріалів досліджень та наукових положень логічний і зрозумілий, в цілому він забезпечує доступність та легкість сприйняття отриманих результатів.

Зміст автореферату та його оформлення

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації та достатньою мірою відображає усі головні елементи дисертації: опис стану проблеми, відомі шляхи її вирішення, отриманих результатів дослідження.

Стиль викладення матеріалів – доказовий, має логічну послідовність і завершеність, забезпечує доступність та легкість сприйняття викладених наукових положень.

Недоліки та зауваження щодо дисертаційної та автореферату дисертації:

1. При побудові фільтру Калмана для алгоритму безплатформної курсовертикалі з розділенням каналів не вказано характер закону розподілу випадкових шумів датчиків кутових швидкостей і акселерометрів, які описані матрицями Q_1, Q_2 відповідно.

2. В дисертаційній роботі підкреслюється, що головний науковий результат роботи – алгоритм функціонування інерціальної системи оцінки параметрів руху людини – має підвищену завадостійкість, але в дисертації оцінка цієї характеристики приведена лише якісно, будь-які кількісні оцінки завадозахищеності в роботі відсутні.

3. Розроблений в дисертації алгоритм функціонування інерціальної системи оцінки параметрів руху людини потребує значних обчислень при його

реалізації в реальному масштабі часу, але в роботі відсутні оцінки обчислювальних затрат на комп'ютерну реалізацію цього алгоритму.

4. В дисертації при описі алгоритму безплатформної курсовертикалі з розділенням каналів корекції (пункт 2.2) рівнянні (2.5) на стор. 75 містить матрицю виду Ω^{bn} , яка не описана (опис цієї матриці приводиться тільки в п. 2.2.2 на стор. 85).

5. Існує невідповідність між описом анатомічної системи координат колінного суглоба і його кінематики (рухів відносно вісей X^B , Y^B , Z^B) та позначеннями на рис. 1.5 в дисертації.

6. У тексті дисертаційної роботи і авторефераті зустрічаються окремі стилістичні неточності (наприклад, в дисертації на стор. 60 використано фразу «*доповняльний* (комплементарний) кватерніонний фільтр», у таблиці 2.2 в дисертації використано посилання на рис. 2.2, а потрібне посилання на рис. 2.3; в дисертації на стор. 80 використано термін «*приладне* значення орієнтації» замість терміну «*приладове* значення орієнтації») і граматичні помилки.

Вказані недоліки і зауваження не знижують наукової цінності та значимості отриманих в дисертації теоретичних та практичних результатів, а також позитивної оцінки дисертаційного дослідження Лакози С.Л.

Висновок про дисертацію в цілому та відповідність її вимогам Міністерства освіти і науки України

Дисертація Лакози С. Л. є завершеною науковою роботою, якій характерна єдність змісту. Вона виконана відповідно до вимог державного стандарту і містить нове вирішення актуальної наукової задачі обґрунтування та розробки алгоритмів функціонування інерціальної системи оцінки параметрів руху людини з підвищеною завадостійкістю та точністю, удосконалення та розширення можливостей існуючих методів калібрування для врахування зміни параметрів чутливих елементів.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Лакози С. Л. «Інерціальна система оцінки параметрів руху людини» є завершеною науковою роботою на актуальну тему,

що виконана особисто у вигляді спеціально підготовленого рукопису. Вона містить нові науково обґрунтовані теоретичні результати і положення та свідчить про значний особистий внесок у розвиток та практичне застосування інерціальних методів для оцінки параметрів руху людини.

За глибиною, теоретичною обґрунтованістю та практичною цінністю дисертація відповідає вимогам п.п. 9, 11, «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567 із змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 року № 656, які висуваються до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.11.03 – гіроскопи та навігаційні системи, а її автор Лакоза Сергій Леонідович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за вказаною спеціальністю.

Офіційний опонент:

Провідний науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту авіації кандидат технічних наук старший науковий співробітник



С.О. ПОНОМАРЕНКО

“ 17 ” жовтня 2017 року

Підпис ПОНОМАРЕНКА С.О. завіряю:

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради СРД 26.703.01

кандидат технічних наук доцент



С.В. ПАЩЕНКО

“ 17 ” жовтня 2017 року