

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Редьки Михайла Олександровича
«Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Актуальність теми дисертації

Проблема засмічення навколосезного простору залишками технологічної діяльності людини є одною з актуальних проблем у сучасній космонавтиці. За даними вчених, на орбіті Землі вже перебуває понад мільйон об'єктів різного розміру, які є потенційно небезпечними для діючих супутників і майбутніх космічних місій. Це сміття може призвести до катастрофічних наслідків, аж до пошкодження космічних апаратів, що призведе ще до більшого збільшення кількості уламків на орбіті.

Традиційні (контактні) методи видалення космічного сміття за допомогою механічних маніпуляторів дуже складні у реалізації і вимагають значних фінансових ресурсів для впровадження. У зв'язку з цим, безконтактні методи, які засновані на використанні лазерів, електро-реактивних двигунів або інших технологій, стають все більш привабливішими. Однак їх ефективність значною мірою залежить від ефективного вирішення системою керування супутника цільових задач, а саме точності виявлення та відстеження об'єктів сміття та визначення необхідної сили, яку необхідно прикласти до об'єкта космічного сміття. Крім цього, такі системи відводу потребують зниження вартості їх реалізації, адже за даними вчених, це одна із основних причин повільних темпів впровадження супутників для видалення космічного сміття.

В наш час при створенні алгоритмічного забезпечення систем керування супутників відводу космічного сміття широко використовуються підходи, основані на методах машинного навчання. При цьому алгоритми навчаються на сукупності всіх зібраних даних. Відомо, що використання алгоритмів машинного навчання для аналізу зображень, отриманих з космічних телескопів

або з камер на борту супутників, вже зараз дозволяє отримати результати, які раніше неможливо було досягти за допомогою традиційних методів комп'ютерного зору.

Таким чином, дослідження автора, яке спрямоване на застосування методів машинного навчання для видалення сміття іонним променем не лише сприятиме розвитку та впровадженню нових технологій для безконтактного видалення космічного сміття, але й матиме важливе значення для вдосконалення систем керування космічними апаратами.

Слід зазначити, що до теперішнього часу немає добре опрацьованих методів побудови таких алгоритмів, в зв'язку з чим створення методології їх побудови є надзвичайно важливою для практичної космонавтики задачею. Це і визначає актуальність дисертаційної роботи.

Оформлення дисертаційної роботи та аналіз вимог дотримання академічної доброчесності

Аналіз результатів досліджень, представлених у дисертації, підтверджує унікальність роботи дисертанта. У тексті коректно застосовуються загальноприйняті технічні терміни. Автор оперує цитуванням та самоцитуванням без зауважень. У процесі аналізу дисертаційної роботи ознак порушення академічної доброчесності не встановлено.

Рукопис дисертації підготовлено згідно існуючих вимог.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає у наступному:

1. Вперше запропоновано нейромережеві моделі для визначення сили впливу іонного променя на об'єкт сміття за наступними входними даними: відносним положенням та орієнтацією, або за зображенням із бортової фотокамери.

2. Вперше отримано рівняння для асимптотичної оцінки обчислювальної складності для запропонованих моделей визначення сили іонного променя.

3. Отримали подальший розвиток методи керування орієнтацією супутника в частині застосування методології навчання з підкріпленням для отримання законів керування, що уточнюються в процесі функціонування космічного апарату.

4. Отримали розвиток методи імпульсного керування відносним рухом космічного апарату, які дозволяють враховувати кількість включень реактивних двигунів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і достовірності результатів.

У ході дослідження була проаналізована сучасна наукова література з тематики дисертації, що дозволило окреслити існуючі проблеми і виділити перспективні напрямки досліджень. Наукові положення та результати є достатньо обґрунтованими, що забезпечується строгістю формулювань математичних задач, чіткістю у визначенні умов та припущень щодо застосування математичних моделей. Основні наукові положення пройшли апробацію на наукових семінарах та конференціях.

Практична значимість результатів дисертаційної роботи

Практична цінність отриманих результатів роботи полягає в наступному:

1. На основі методів машинного навчання розроблені алгоритми для визначення сили впливу іонного променя на об'єкт сміття які дозволили знизити вимоги до бортового комп'ютера космічного апарата.

2. Отримано модель визначення сили впливу іонного променя по зображенню об'єкта космічного сміття з бортової фотокамери, без необхідності визначення точної орієнтації та відносної позиції об'єкту космічного сміття.

3. Алгоритм керування орієнтацією космічного апарата, отриманий за допомогою навчання з підкріпленням, дозволяє враховувати зміну параметрів динаміки космічного апарату, що дозволяє досягти більш точного керування.

4. Для проблеми керування відносним положенням космічного апарата, автором було отримано закон керування, який дозволяє контролювати кількість включень двигунів, що зберігає його ресурс.

Структура роботи, оцінка змісту дисертації та її завершеність.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. В додатках наведені список публікацій за темою дисертації та результати валідації нейромережових моделей. Загальний обсяг роботи 206 сторінок.

Вступ до дисертації містить обґрунтування вибору теми дослідження, мету, об'єкт і предмет дослідження. Також зазначається інформація про наукову новизну, практичну значимість та апробацію результатів роботи.

Перший розділ дисертації присвячений розгляду проблем, пов'язаних з перспективними методами активного видалення космічного сміття. Проведено аналіз застосовності методів машинного навчання для задач навігації та керування у космосі, а також для задач, пов'язаних з видаленням космічного сміття. Вказано на доцільність застосування існуючих та розробки нових моделей та методів машинного навчання. Обґрунтовано вибір моделей та методів для подальшого дослідження. Сформульовано завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі розглядаються питання застосування нейронних мереж для визначення сили електро-реактивного двигуна, що передається об'єкту космічного сміття при його видаленні з орбіти. Запропоновано три різні нейромережові моделі, що відрізняються вхідною інформацією, точністю та швидкістю отримання результатів. Проаналізовано обчислювальну складність нейромережових методів у порівнянні із традиційним методом розрахунку сили за допомогою центральних проєкцій на допоміжну площину.

У третьому розділі запропоновано застосування методів навчання з підкріпленням для задачі керування орієнтацією космічного апарата. Проведено навчання агента, а також його тестування. Показано, що отриманий алгоритм має кращі показники якості керування у порівнянні з традиційним

керуванням, крім цього, має здатність покращувати якість керування при отриманні додаткових даних.

Четвертий розділ вирішує задачу керування відносним рухом КА з використанням реактивних двигунів. Запропоновано використовувати функцію вартості зі змінними ваговими коефіцієнтами, що дозволило оптимізувати кількість включень реактивних двигунів з використанням навчання з підкріпленням. Показано, що така система керування дає кращі результати ніж система з модулятором тяги.

Висновки по дисертації відповідають поставленій меті і відображають виконання поставлених задач. Вважаю дисертаційну роботу завершеною наукою працею з досягнутою метою і вирішенням задач, які були поставлені у дисертації.

Повнота викладу результатів дисертаційної роботи в публікаціях.

Дисертантом опубліковано шість статей, з них:

- 3 – в фахових виданнях категорії А, включених до баз «Scopus» та «Web of Science»,
- 3 – в державних фахових виданнях категорії Б. Серед перелічених статей, одна стаття здобувачем опублікована без співавторів.

Автором опубліковано вісім тез доповідей на наступних Міжнародних конференціях: Міжнародна наукова конференція «Космічні технології: сучасне та майбутнє» (м. Дніпро, 2019), Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (м. Дніпро, 2020, 2021, 2022), Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос» (м. Дніпро, 2022); Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (м. Дніпро, 2023); Міжнародна наукова конференція «Космічні горизонти» (м. Дніпро, 2021); міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та моделювання – 2022» (м. Івано-Франківськ, 2022).

За сукупними результатами дисертаційного дослідження, здобувач опублікував чотирнадцять наукових праць, які розкривають основні наукові результати роботи, що виносяться на захист.

Зауваження і рекомендації щодо змісту дисертації

1. Аналіз літературних джерел варто було б доповнити аналізом сучасного стану застосування пасивних та активних методів відводу космічного сміття, визначити чинники, які заважають впровадженню таких систем відводу у поточний час та у найближчому майбутньому.
2. Нейромережеві моделі для визначення сили порівнюються з методом центральних проєкцій на допоміжну площину. Однак, незрозуміло, чи цей метод розрахунку є оптимальним для вирішення цієї задачі – варто було б звернути увагу на порівняння з іншими методами розрахунку сили.
3. У третьому та четвертому розділах роботи пошук керування реалізовано шляхом мінімізації відомого квадратичного критерію, що враховує вектор стану та керування, але не відзначено чи можливо використовувати запропоновану методологію для інших можливих критеріїв оптимальності.
4. У третьому розділі у якості параметрів орієнтації використовуються кути Ейлера – Крилова. Ця модель має суттєвий недолік: нелінійність кінематичних рівнянь обертання і наявністю в них обчислювальних особливостей, що істотно ускладнює синтез законів керування. Особливо це проявляється при знаходженні оптимального керування. Тому доцільніше було використовувати модель кутового руху КА, в якій для опису орієнтації використовуються параметри Родріга-Гамільтона.

Вказані зауваження не є суттєвими та не змінюють загальну позитивну оцінку роботи, підготовленої автором. Рукопис дисертації написано із використанням фахової термінології. Для тексту характерні наступні ознаки: цілісність змісту та завершеність.

Вважаю, що дисертаційна робота повністю відповідає вимогам, передбаченим «Порядком присудження ступеня доктора філософії та

скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44, а її автор, Редька М. О., заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, доцент,

професор кафедри

«Інформаційні технології електронних засобів»

Національного університету

«Запорізька політехніка»



Микола ЄФІМЕНКО

Підпис Єфименко засвідчую:

Учений секретар вченої ради

НУ «Запорізька політехніка»



Віктор КУЗЬМІН