

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Редьки Михайла Олександровича

на тему **«Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем»**,

яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Оцінка обґрунтованості обраної теми дослідження

Дисертація присвячена розробленню моделей та методів машинного навчання для ключових задач, які необхідно вирішити для ефективного застосування місій видалення космічного сміття за допомогою іонного променя. У дисертаційному дослідженні проведено аналіз поточного стану застосування методів машинного навчання для задач навігації, керування та видалення сміття в космосі. Розглянуто метод видалення космічного сміття за допомогою іонного променя, виділено ключові задачі, які необхідно розв'язати для успішного застосування цього методу, а саме визначення сили впливу електро-реактивного двигуна (ЕРД) та ефективного керування відносним та обертальним рухом. Визначено, що для підвищення ефективності вирішення цих задач перспективно використовувати методи машинного навчання, що базуються на застосуванні штучних нейронних мереж.

Актуальність теми дослідження обумовлена наступним: по-перше, системи видалення космічного сміття потребують розвитку для підвищення технологічної готовності та ефективності, адже проблема засмічення навколосемного простору є критичною, а вартість таких систем є одним із основних критеріїв впровадження подібних місій. По-друге, у останній час набули розвитку методи машинного навчання, які демонструють багатообіцяючі результати у різних сферах, наприклад керування безпілотними автомобілями, аналіз об'єктів на зображеннях, планування космічних місій, тощо. Таким чином, застосування методів машинного навчання для проблеми видалення космічного сміття є актуальною та практично важливою задачею.

Оцінка новизни результатів досліджень

Новизна представленої роботи полягає у постановці та вирішенні актуального наукового завдання поліпшення ефективності методів видалення космічного сміття іонним променем за допомогою застосування методів машинного навчання, що базуються на використанні штучних нейронних мереж..

Основні наукові результати полягають у наступному:

- вперше розроблені нейромережеві моделі для визначення сили впливу факела ЕРД на космічне сміття та отримані аналітичні оцінки обчислювальної складності таких моделей.

- отримали розвиток методи керування орієнтацією супутника з використанням навчання з підкріпленням у частині застосування моделей динаміки, що уточнюються в процесі його функціонування та удосконалено методи імпульсного керування відносним рухом космічних апаратів.

Вказані наукові положення обґрунтовані проведенням здобувачем теоретичними дослідженнями та розрахунками, за результатами яких опубліковано 14 наукових праць, зокрема 3 статті у фахових виданнях України категорії Б, 3 статті у журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 8 тез доповідей на конференціях.

Основні положення дисертації викладено в перелічених вище працях, які задовольняють вимогам щодо кількості та якості публікацій.

Оцінка обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій

Дисертаційна робота викладена на 206 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Робота ілюстрована рисунками та таблицями. Список використаних джерел складається зі 150 найменувань.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, поставлена мета та завдання роботи, наведено наукову новизну, практичне значення, особистий внесок дисертанта та апробація роботи.

У *першому розділі* автором розглянуто літературні джерела щодо застосування моделей та методів машинного навчання у задачах керування, навігації і видалення сміття у космосі. Визначено актуальність теми дослідження роботи, розглянуто існуючі технології та рішення для видалення космічного сміття. Визначено ключові задачі методу видалення космічного сміття за допомогою іонного променя.

У *другому розділі* автором здійснено застосування нейромереж різних архітектур для задачі визначення сили іонного променя, що передає імпульс об'єкту космічного сміття для його видалення з орбіти. Розглянуто нейронні мережі з повністю пов'язаними шарами, згорткові нейронні мережі та застосовано обробку зображень для підвищення ефективності нейромережевого методу. Усі моделі порівняно із традиційним (аналітичним) методом за показниками точності та швидкодії. Визначено обчислювальну складність нейромережевих та традиційного методів, побудовано графіки.

У *третьому розділі* розглянуто задачу керування орієнтацією космічного апарату, виділено основні недоліки традиційного алгоритму керування за допомогою лінійно-квадратичного регулятора. Застосовано методологію навчання із підкріпленням для синтезу закону керування, який може уточнюватися при функціонуванні супутника на орбіті. Отриманий закон керування порівняно з лінійно-квадратичним регулятором за показниками точності шляхом комп'ютерного моделювання.

У *четвертому розділі* розглянуто задачу керування відносним положенням космічного апарату за допомогою реактивних двигунів, які можуть бути або включено, або вимкнено (тобто, не має можливості точного керування тягою). Для вирішення цієї задачі застосовано методологію навчання з підкріпленням, введено параметр, який дозволяє оптимізувати кількість умикань двигунів, що дозволяє економити ресурс двигунів. Отриманий

алгоритм керування порівняно на точність та витрату палива з контролером на базі лінійно-квадратичного регулятора та широтно-імпульсної модуляції.

Аналіз змісту дисертації показує, що основні наукові положення та висновки, зроблені в роботі, є обґрунтованими і логічно випливають з отриманих автором наукових результатів. Вони досягнуті завдяки вдалому поєднанню класичних методів теорії керування та сучасних методів машинного навчання, а також базуються на достатній кількості чисельних даних та відомих наукових фактах.

Достовірність отриманих результатів і висновків підтверджується коректним застосуванням фундаментальних наукових положень, ретельністю математичних викладок, узгодженістю теоретичних висновків з чисельними даними та результатами моделювання. Важливо відзначити, що основні наукові результати дисертації апробовані на міжнародних та всеукраїнських конференціях і достатньо повно представлені в наукових публікаціях у фахових виданнях. Таким чином, можна стверджувати, що ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації, та їх достовірність не викликають сумнівів.

Оцінка практичного значення одержаних результатів

Нейромережеві моделі для визначення впливу іонного двигуна підвищують ефективність технології видалення космічного сміття за допомогою іонного променя оскільки дозволяють визначити силу впливу на об'єкт сміття значно швидше за традиційний метод, та зробити це використовуючи лише зображення об'єкту космічного сміття, без попередньої точної інформації про його орієнтацію.

Запропоновані алгоритми на базі навчання з підкріпленням можуть бути використанні про розробці систем керування різних класів космічних апаратів перспективних місій таких як орбітальний сервіс, де умови їх функціонування можуть змінюватися.

Дотримання вимог академічної доброчесності.

У дисертаційній роботі Редьки Михайла Олександровича «Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем» ознак академічного плагіату не виявлено. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Окремі дискусійні питання і зауваження

1. У розділі 2, під час застосування нейронних мереж, не вказано про існуючі обмеження використання такого підходу. Наприклад, чи можливо використовувати такі моделі для об'єктів космічного сміття довільної форми.
2. У розділі 2 для методу визначення сили за допомогою ознак, отриманих при обробці зображення, не визначено яка саме кількість ознак необхідна для забезпечення необхідної точності визначення сили?
3. На рис. 2.1-2.8 позначення виконано англійською мовою.
4. У розділі 3 не наведено відомості про збурюючі моменти, які були враховано при аналізі динаміки обертального руху космічного апарата.

Зазначені зауваження не впливають на загальний рівень поданої дисертаційної роботи. Автором досягнуто результатів які мають наукову цінність, що дозволяє оцінити дисертацію як цілісне, завершене та актуальне наукове дослідження.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Редьки Михайла Олександровича на тему «Моделі та методи машинного навчання для аналізу динаміки та керування супутників при видаленні космічного сміття іонним променем» є актуальною за змістом, містить наукову новизну, основні результати та висновки дисертації обґрунтовані, мають теоретичне та практичне значення. Рецензована дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Оформлення дисертації відповідає чинним вимогам. Методичний рівень, наукова новизна і практичне

значення, рівень оприлюднення результатів рецензованої роботи відповідає вимогам до дисертацій ступеня доктора філософії згідно з вимогами Постанови Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (зі змінами) «Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а здобувач Редька Михайло Олександрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Офіційний рецензент

Кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
відділу системного аналізу та проблем
керування Інституту технічної
механіки НАНУ і ДКАУ



Дмитро ХРАМОВ

Підпис Храмова Д.О.

Завіряю

Учений секретар ІТМ НАНУ і ДКАУ
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник



Людмила ЛАПША