Наукові перспективи
Видавнича група

НАУКА і ТЕХНІКА СЬОГОДНІ

№ 5 (59)
2026



З Україною в серці!

ISSN 2786-6025 Online

УДК 001.32:1 /3](477)(02)

R40-05553

DOI: **https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-5(59)**

«Наука і техніка сьогодні» (Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія «Економіка», Серія «Фізико-математичні науки», Серія «Техніка»)»: журнал. 2026. № 5(59) 2026. С. 6514

Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 07.04.2022 № 320 журналу присвоєно категорію "Б" із економіки та педагогіки (спеціальності – 015 - Педагогічні науки; 076 - Економічні науки)

Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 06.06.2022 № 530 журналу присвоєно категорію "Б" із права (спеціальність – 081 Юридичні науки)

Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 10.10.2022 № 894 журналу присвоєно категорію "Б" із техніки (спеціальність - 122 Комп'ютерні науки)

Журнал видається за підтримки Міждержавної гільдії інженерів консультантів, Інституту філософії та соціології Національної Академії Наук Азербайджану (Баку, Азербайджан), громадської організації «Християнська академія педагогічних наук України» та громадської організації «Всеукраїнська асоціація педагогів і психологів з духовно-морального виховання»

Рекомендовано до видавництва Президією Всеукраїнської Асамблеї докторів наук з державного управління (Рішення від 25.05.2026, № 9/3-1/26)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (IC), міжнародної пошукової системи Google Scholar та до міжнародної наукометричної бази даних Research Bible

Згідно Порядку формування Переліку наукових фахових видань України, затвердженого наказом МОН України від 15.01.2018 № 32, повнотекстовий доступ до наукових статей журналу представлений на платформі «Наукова періодика України» в Національній бібліотеці України імені В.І. Вернадського НАН України та в Національному репозитарії академічних текстів

Головний редактор:



Коренева Інна Миколаївна *- доктор педагогічних наук, професор, декан факультету природничої і фізико-математичної освіти Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка; професор кафедри теорії і методики викладання природничих дисциплін Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка (Україна)*

Редакційна колегія:

1. **Біляковська Ольга Орестівна** доктор педагогічних наук, професор, завідувачка кафедри загальної педагогіки та педагогіки вищої школи Львівського національного університету імені Івана Франка (Україна)
2. **Воровка Маргарита Іванівна** – докторка педагогічних наук, професорка, професорка кафедри освітології та педагогіки мистецтва Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького (Україна)

ISSN 2786-6025 Online

Король А.В. **4756**
ДИНАМІЧНА АКТИВАЦІЯ БЛОКІВ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ГРАФОВОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ДЛЯ ЕНЕРГО-ЕФЕКТИВНОГО ІНФЕРЕНСУ

Котелович Д.В., Борзов Ю.О. **4773**
ПОВНОТІЛЕСНЕ КЕРУВАННЯ ЛЮДИНОПОДІБНИМ РОБОТОМ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБЕРНЕНОЇ ДИНАМІКИ У ПРОСТОРІ ЗАДАЧ ТА ЦЕНТРОЇДАЛЬНОГО МПК У СИМУЛЯЦІЇ

Котенко Н.О., Роговець А.Ю. **4787**
ПРОЄКТУВАННЯ МОБІЛЬНОГО ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ СОЦІАЛЬНОЇ ВЗАЄМОДІЇ З ДИНАМІЧНИМ КОНТЕНТОМ

Кочина В.В., Вітвіцька К.Е., Фещенко Р.Д., Нагорний А.Г. **4799**
ВПЛИВ ВІДКРИТОЇ РОЗВІДКИ (OSINT) НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СОЦІАЛЬНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ: АНАЛІЗ ЗАГРОЗ ТА МЕТОДІВ ПРОТИДІЇ

Кравцов С.В. **4812**
МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ

Кравчук М.М., Юрченко Ю.Ю., Самойленко Г.Т. **4827**
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ВИСОКОДОСТУПНИХ СЕРВЕРНИХ КЛАСТЕРІВ

Крамаренко С.Б., Сергєєв О.В., Роценко О.В. **4837**
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ: АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНТРОЛЮ ЛІНІЙНО-КУТОВИХ РОЗМІРІВ В МЕТРОЛОГІЧНИХ ЛАБОРАТОРІЯХ

Крамаренко В.В., Старцев О.М. **4856**
УЗАГАЛЬНЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ЗАГРОЗ ДЛЯ СУДНОВОЇ АВТОМАТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ, ЯК СКЛАДОВОЇ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ СУДНОВОДІННЯ

№ 5(59)
2026
НАУКА і ТЕХНІКА СЬОГОДНІ
ISSN 2786-6025 Online
УДК 004.896

https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-5(59)-4773-4786

Котелович Денис Валерійович аспірант кафедри комп'ютерних наук, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, https://orcid.org/0009-0007-7031-2500

Борзов Юрій Олексійович кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, https://orcid.org/0000-0002-0604-0498

ПОВНОТІЛЕСНЕ КЕРУВАННЯ ЛЮДИНОПОДІБНИМ РОБОТОМ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБЕРНЕНОЇ ДИНАМІКИ У ПРОСТОРІ ЗАДАЧ ТА ЦЕНТРОЇДАЛЬНОГО МПК У СИМУЛЯЦІЇ

Анотація. Сучасні модульні системи керування цілим тілом для людиноподібних роботів поєднують обернену динаміку у просторі задач (TSID) на нижньому рівні з центроїдальним модельно-прогнозним керуванням (CMPC) на верхньому: CMPC планує траєкторії центру мас та центроїдального кутового моменту на горизонті прогнозування, а TSID у кожному контрольному циклі розв'язує задачу квадратичного програмування і формує моменти приводів, які відстежують CMPC-план з урахуванням повної динаміки робота. Такі архітектури розроблено й відкалібровано переважно на великих еталонних платформах попереднього покоління (HRP-4, TALOS); кількісної оцінки їхньої придатності для сучасних компактних дослідницьких людиноподібних роботів із вузькою стопою (Unitree G1, ergoCub, iCub3) у літературі бракує, що ускладнює пряме перенесення наявних підходів на цей клас платформ.

Мета роботи — перевірити таку систему у симуляції на повній моделі робота Unitree G1 у п'яти базових режимах руху: стоянні, періодичних присіданнях, опорі на одну ногу, бічному перенесенні ваги та кроці на місці. Експерименти проведено у середовищі Isaac Sim.

У межах обмеженого вікна симуляційного часу (≈ 8.5 с) система зберегла вертикальну стійкість у всіх 25 симуляціях (по 5 на режим) з малою помилкою відстеження центру мас та центру тиску; розв'язувач квадратичного програмування залишався оптимальним у всіх 42 903 контрольних циклах, а пікові крутні моменти приводів утримувались у межах URDF-діапазону. Гомілковостопний суглоб у бічній площині виходив на кінематичну межу у трьох із п'яти режимів; це мотивує додавання захисного рівня планування з

ISSN 2786-6025 Online

суглобовими обмеженнями (klim-демпфер у задачно-пріоритетній постановці) між плануванням і розв'язанням оберненої динаміки перед перенесенням системи на реальне обладнання. Перспективні напрямки — розширення набору режимів за межі квазістатичних (пряма хода з підлаштуванням розміщення та часу кроку, поворот), кількісна оцінка реактивності до зовнішніх збурень та робота на нерівній опорі.

Ключові слова: керування цілим тілом, обернена динаміка у просторі задач, центроїдальне модельно-прогнозне керування, людиноподібний робот, симуляція, Isaac Sim.

Kotelovych Denys Valeriyovych PhD student, Department of Computer Sciences, Lviv State University of Life Safety, Lviv, https://orcid.org/0009-0007-7031-2500

Borzov Yurii Oleksiyovych PhD, Associate Professor, Department of Information Technologies and Electronic Communication Systems, Lviv State University of Life Safety, Lviv, https://orcid.org/0000-0002-0604-0498

WHOLE-BODY CONTROL OF A HUMANOID ROBOT VIA TSID AND CENTROIDAL MPC IN SIMULATION

Abstract. Modern modular whole-body control architectures for humanoid robots combine task-space inverse dynamics (TSID) at the low level with centroidal model predictive control (CMPC) at the high level: CMPC plans centre-of-mass and centroidal angular-momentum trajectories over a prediction horizon, while TSID solves a quadratic-programming problem at every control cycle to produce actuator torques that track the CMPC plan subject to the full body dynamics. Such architectures have been developed and tuned mostly on large reference platforms of the previous generation (HRP-4, TALOS); a quantitative assessment of their applicability to the modern class of compact research-grade humanoid robots with narrow feet (Unitree G1, ergoCub, iCub3) is missing from the literature, which complicates direct transfer of existing approaches onto this class of platforms.

The goal of this work is a simulation-based validation of such an architecture on a full model of the Unitree G1 robot in five baseline motion modes: standing, periodic squatting, single-support stance, lateral weight shift, and stepping in place. Experiments are run in Isaac Sim.

Within a truncated simulation window of ≈ 8.5 c, the controller maintained vertical stability across all 25 runs (5 per mode) with small centre-of-mass and centre-of-pressure tracking errors; the quadratic-programming solver remained optimal at every one of the 42 903 control cycles, and peak actuator torques stayed within the

ISSN 2786-6025 Online
URDF range. The lateral ankle joint reached its kinematic limit in three of the five modes; this motivates adding a protective planning layer with joint constraints (a klim-damper within a task-priority formulation) between planning and inverse-dynamics resolution before transferring the architecture to real hardware. Future directions include extending the mode set beyond quasi-static motions (forward walking with step placement and timing adjustment, turning), quantitative assessment of reactivity to external disturbances, and trials on uneven terrain.

Keywords: whole-body control, task-space inverse dynamics, centroidal model predictive control, humanoid robot, simulation, Isaac Sim.

Постановка проблеми. Сучасне покоління дослідницьких людиноподібних платформ із вузькою стопою (Unitree G1, ergoCub, iCub3) утворює окремий клас, що відрізняється від еталонних платформ попереднього покоління (як-от HRP-4 [1] і TALOS [2]) меншою масою, вужчою опорною площиною стопи та обмеженими крутними моментами: маса 35 кг, стопа 12 см × 7 см, граничні крутні моменти суглобів 50 N m–139 N m [3]. Традиційна система керування цілим тілом — обернена динаміка у просторі задач на рівні розв'язання квадратичного програмування [4–6] та центроїдальне модельно-прогнозне керування на рівні планування [7; 8] — було розроблено й відкалібровано на еталонних платформах. На цих платформах бічні амплітуди центру мас, оцінені з опублікованих параметрів кроку у [1; 9], лежать у діапазоні 20 mm–35 mm.

Через геометричні та моментні обмеження нового класу амплітуди порядку 40 mm–50 mm, що перевіряються у цій роботі, виводять гомілково-востопний суглоб у фазі подвійної опори за межі робочого діапазону (рад за URDF-файлом проєкту), що ускладнює пряме перенесення наявних підходів на платформи цього класу.

Огляди [10–12] фіксують швидке зростання інтересу до малих людиноподібних роботів, проте кількісної оцінки придатності класичної системи керування для цього класу платформ у літературі немає. Невирішеними залишаються три складники: систематична перевірка архітектури TSID + центроїдального МПК на платформі з вузькою стопою у базових режимах руху; виявлення структурних обмежень, що проявляються під час такого перенесення; формулювання архітектурних доповнень для надійної роботи системи на обладнанні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Засади двоногого керування ґрунтуються на точці нульового моменту [13], моделі лінійного оберненого маятника [14] та розбіжній компоненті руху (DCM) [15]. Ієрархічне керування цілим тілом розвинуто до повнотілесного контексту [4] та формалізовано як ієрархічне квадратичне програмування [5]; динамічний рівень — обернену

ISSN 2786-6025 Online

динаміку у просторі задач — застосовано у [6], інтегрована реалізація у бібліотеці Pinocchio [16] прискорила поширення підходу.

Центроїдальне модельно-прогнозне керування обґрунтовано у [7], масштабовано на Atlas [17] та розвинуто як нелінійне МПК із підлаштуванням кроку на iCub3 [8]. Перспективне покоління інтегрованого повнотілесного МПК на рівні суглобів описано у [18]. Підходи з PI-регулятором за DCM найкраще документовано на HRP-4 [1] та у бенчмарку для iCub [9]; систематичне порівняння трьох архітектур керування на TALOS виконано у [2]. Класичний модельний підхід до стабілізації ходи на платформах з вузькою стопою — модифікація розміщення стоп поверх стабілізатора LIPM [19]. Огляди стану предметної області — [11; 12].

Жодне з цитованих джерел не дає кількісної оцінки об'єднаної архітектури TSID + центроїдального МПК на сучасній малій людиноподібній платформі з вузькою стопою. Як якісну ілюстрацію розриву наведемо тривалості фаз кроку на місці: в еталонних системах [1; 8] відношення одноопорної до двоопорної фази SSP/DSP ≈ 3 (типово DSP 0.20 с, SSP 0.74 с), тоді як на Unitree G1 виміряні значення становлять DSP 3.75 с, SSP 2.70 с (SSP/DSP ≈ 0,72), що відповідає домінуванню двоопорної фази як наслідку структурного обмеження вузької стопи.

Мета статті — перевірка у симуляції модульної системи керування цілим тілом для класу сучасних малих людиноподібних платформ із вузькою стопою. Система складається з оберненої динаміки у просторі задач на рівні розв'язання квадратичного програмування для кожного контрольного циклу і центроїдального модельно-прогнозного керування [8] на рівні планування. Оцінку здійснено у п'яти базових режимах руху: стоянні, періодичних присіданнях, опорі на одну ногу, бічному перенесенні ваги та циклі почергового підйому стопи на місці (далі — крок на місці, за термінологією скінченного автомата станів, FSM). Перевірку проведено на повній моделі робота Unitree G1 (маса 35 кг, 35 DoF: 6 плаваюча база + 29 керованих суглобів) у середовищі Isaac Sim [3; 20]. Задачі роботи: (1) кількісна оцінка стабільності та якості руху системи у кожному з п'яти режимів; (2) виявлення структурних обмежень архітектури на платформах із вузькою стопою; (3) формулювання рекомендацій щодо доповнення системи для перенесення на обладнання.

Виклад основного матеріалу.

Система керування. Система дворівнева (рис. 1). Верхній рівень — центроїдальне МПК [7; 8]; нижній — TSID, сформульована як одна зважена задача квадратичного програмування (QP) [4–6]. Зв'язок між рівнями реалізовано в TSID через м'яке відстеження цільових сил і моментів, обчислених CMPC. WBC працює на 200 Гц, CMPC — на 50 Гц; крок фізики Isaac Sim — 1.25 мс (800 Гц).

ISSN 2786-6025 Online

CMPC оптимізує 6-вимірний центроїдальний стан

$$x = [c_x,\ c_y,\ \dot{c}_x,\ \dot{c}_y,\ L_x,\ L_y]^{\top}, \tag{1}$$

на горизонті $N = 24$ кроки з кроком 50 мс. Вертикальна координата центру мас фіксована на $c_z = h_{\text{CoM}} = 0.65$ м, а вертикальна силова рівновага виноситься в окрему рівність балансу. Дискретизація — метод Ейлера на всьому горизонті:

$$m\,\ddot{c}_{xy} = \sum_{i\in\mathcal{C}} f_{xy,i}\,, \quad \sum_{i\in\mathcal{C}} f_{z,i} = m\,g,$$
$$\dot{L}_{xy} = \sum_{i\in\mathcal{C}} [\,(p_i - c) \times f_i]_{xy}, \tag{2}$$

де $\mathcal{C}$ — множина активних контактів, f_i, n_i — сила і момент i-го контакту, p_i — точка прикладання, $w_k = (f_k, n_k)$ — 6-вимірний контактний вектор сил і моментів на кроці k. Цільова функція складається з двох доданків — задачі відстеження та регуляризації керування:

$$J_k^{\text{track}} = w_{\text{com}} \parallel c_{xy,k} - c_{xy,k}^{\text{ref}} \parallel^2 + w_{\dot{c}\text{om}} \parallel \dot{c}_{xy,k} - \dot{c}_{xy,k}^{\text{ref}} \parallel^2 + w_L \parallel L_{xy,k} - L_{xy,k}^{\text{ref}} \parallel^2, \tag{4}$$

$$J_k^{\text{reg}} = w_f \parallel f_k \parallel^2 + w_n \parallel n_k \parallel^2 + w_{\dot{w}} \parallel \Delta w_k \parallel^2, \tag{5}$$

$$J = \sum_{k=0}^{N} s_k \left(J_k^{\text{track}} + J_k^{\text{reg}}\right), \qquad s_k = \begin{cases} 1, & k < N, \\ \alpha_T, & k = N; \end{cases} \tag{6}$$

ваги $w_{\text{com}} = 200$, $w_{\dot{c}\text{om}} = 5$, $w_L = 0{,}1$, $w_f = w_n = 10^{-3}$, $w_{\dot{w}} = 10^{-2}$, термінальна вага $\alpha_T = 2{,}0$. Контактні сили обмежено зовнішньою чотиригранною пірамідальною релаксацією конуса тертя $|f_{x,i}|, |f_{y,i}| \le \mu f_{z,i}$ ($\mu = 0{,}7$, $f_{z,\min} = 20$ Н) та CoP-обмеженням за прямокутником опорного полігона з півекстентами $1/2\,L_{\text{f}} = 0.075$ м, $1/2\,W_{\text{f}} = 0.040$ м. Розв'язувач — OSQP, $\varepsilon = 10^{-3}$, max_iter $= 500$.

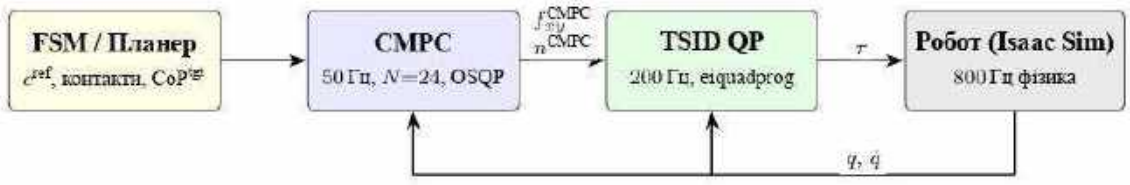


Рисунок 1 — Блок-схема дворівневої системи керування TSID + центроїдальне МПК.

ISSN 2786-6025 Online

TSID сформульовано як одну зважену (не ієрархічну) задачу QP за змінними $\ddot{q} \in \mathbb{R}^{35}$ та реакціями активних контактів $F \in \mathbb{R}^{6n_c}$. Залишок задачі i та залишок контакту:

$$e_i = J_i\ddot{q} + \dot{J}_i\dot{q} - \ddot{x}_i^{\text{ref}}, \tag{7}$$

$$e_c = J_c\ddot{q} + \dot{J}_c\dot{q} + k_d^B J_c\dot{q} + k_p^B\left(p_c - p_c^{\text{tgt}}\right). \tag{8}$$

Доданок CMPC-відстеження:

$$J^{\text{CMPC}} = \sum_{i\in\mathcal{C}} [\, w_{f_{xy}} \parallel f_{xy,i} - f_{xy,i}^{\text{CMPC}} \parallel^2 + w_n^{\text{trk}} \parallel n_i - n_i^{\text{CMPC}} \parallel^2]. \tag{9}$$

Цільова функція:

$$\min_{\ddot{q},F} \sum_i w_i \parallel e_i \parallel^2 + w_c \parallel e_c \parallel^2 + J^{\text{CMPC}} + w_{\text{reg}} \parallel [\ddot{q}, F] \parallel^2, \tag{10}$$

за обмеження повної динаміки

$$M(q)\,\ddot{q} + h(q,\dot{q}) = S^{\top}\tau + J_c^{\top}F, \quad \tau_{\min} \le \tau \le \tau_{\max}, \tag{11}$$

з URDF-обмеженнями моментів приводів 35 N m–139 N m, плюс ті самі обмеження конуса тертя та CoP, що й у CMPC. Контакт вводиться як м'яка задача зі стабілізаційними коефіцієнтами Баумгарта ($k_p^B = 100$, $k_d^B = 10$, $w_c = 10\,000$), регуляризація — $w_{\text{reg}} = 0{,}3$. Друга сума у (10) — основний канал зв'язку між рівнями: TSID відстежує цільові значення сил і моментів від CMPC з вагами $w_{f_{xy}} = 50$ та $w_n^{\text{trk}} = 5$; без цієї суми план CMPC нижнім рівнем не використовується. Прискорення кожної задачі обчислюється з PD-стабілізованої цільової траєкторії:

$$\ddot{x}_i^{\text{ref}} = \ddot{x}_i^{\text{des}} + K_{p,i}\,(x_i^{\text{des}} - x_i) + K_{d,i}\,(\dot{x}_i^{\text{des}} - \dot{x}_i). \tag{12}$$

Активні задачі включають центр мас (вага 500), центроїдальний кутовий момент (20), орієнтацію бази (500), поставу талії та рук (1000 / 100), позицію й орієнтацію махової стопи в одноопорній фазі (400 / 100) та цільовий центр тиску у режимі кроку на місці (100). Розв'язувач QP — eiquadprog (метод активних множин).

ISSN 2786-6025 Online

Платформа та симуляція. WBC застосовано до всіх 29 керованих суглобів повної моделі Unitree G1 (стопа 12 см × 7 см); швидкі траєкторії задано лише для ніг, а руки й талію утримує задача постави. Симуляція виконується у режимі покрокової синхронізації (lockstep): на кожний контрольний цикл WBC припадає чотири кроки фізики, на яких застосовуються останні видані WBC керуючі моменти; паралельно працює окрема підсистема безпеки (детектор падіння за нахилом тулуба, нахилом центру мас та просіданням z, плюс монітори орієнтації, розходження стану та фільтр NaN/Inf). У цих експериментах жоден монітор не спрацював.

Експерименти охопили 25 симуляцій — по 5 у кожному з п'яти режимів. Бюджет реального часу на симуляцію становив wall_timeout 60 с; за коефіцієнта реального часу Isaac Sim $\approx 7\times$ це відповідає ≈ 8.5 с симуляційного часу до примусового завершення (стовпчик t_{surv} у табл. 1). У жодній з 25 симуляцій падіння не зафіксовано; розв'язувач QP лишався оптимальним у всіх 42 903 контрольних циклах сукупно. Числові значення у табл. 1 — медіани за 5 симуляціями у режимі; зважаючи на невелику вибірку, їх слід читати як приклади поведінки, а не як оцінки з довірчим інтервалом.

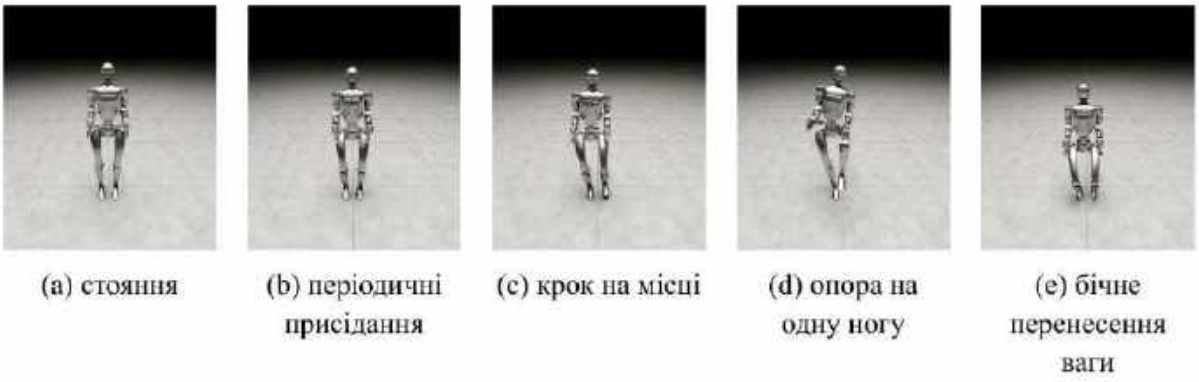


Рисунок 2 — П'ять режимів руху, оцінених у симуляції Isaac Sim на повній моделі робота Unitree G1.

ISSN 2786-6025 Online

Таблиця 1

Підсумок перевірки системи TSID + центроїдального МПК на роботі Unitree G1 у п’яти режимах руху. CoM RMS — помилка відстеження центру мас (різниця між цільовим значенням за CMPC-планом і виміряним через пряму кінематику), медіана за 5 симуляціями.

Режим	N	t_{surv}, с	CoM RMS x/y, мм	$\lvert ankle_{roll} \rvert$, рад
Стояння	5	8,76	7,99 / 0,45	0,081
Періодичні присідання	5	8,83	8,51 / 0,38	0,085
Крок на місці	5	8,06	5,12 / 21,12	0,262
Опора на одну ногу	5	8,86	6,60 / 7,65	0,262
Бічне перенесення ваги	5	8,74	4,20 / 11,98	0,262

Результати за режимами. У ненавантажених режимах (стояння, періодичні присідання) система утримала рівновагу протягом усього часу симуляції з RMS-помилкою відстеження центру мас нижче 9 мм уздовж x і 0.5 мм уздовж y; максимальне $\lvert ankle_{roll} \rvert$ не перевищувало 32 % URDF-діапазону.

У режимі присідань CMPC утримує вертикальну координату центру мас сталою на h_{CoM}, тож вертикальний рух задається TSID-задачею постави; ROS-канал телеметрії не містить окремого поля com_ref_z, тому пряме порівняння команди й відстеження уздовж осі z виходить за межі цієї роботи.

У режимі кроку на місці фактичні тривалості фаз становили DSP 3.75 с, SSP 2.70 с, тоді як FSM командував DSP 0.7 с, SSP 0.5 с: розрив між командою та виміром і є основним результатом для цього режиму. RMS-помилка відстеження центру мас уздовж осі y становить 21 мм, а гомілковостопний суглоб виходить на URDF-межу $\pm 0{,}262$ рад.

У режимі опори на одну ногу перехід у фазу SSP активує бічне стабілізаційне керування за DCM; гомілковостопний суглоб насичується у фазі LIFT, проте система компенсує його перерозподілом навантаження на опорну стопу без втрати вертикальної стійкості.

У режимі бічного перенесення ваги CMPC задає коливання центру тиску амплітудою ± 40 мм; виміряний CoP відтворює цільовий профіль з відхиленням $\lesssim 10$ мм (рис. 3, 4), однак гомілковостопний суглоб виходить на URDF-межу в обох опорних стопах.

Оцінений з опублікованих параметрів кроку [1; 9] діапазон бічних амплітуд на близьких платформах — 20 mm–35 mm; використана амплітуда 40 мм відповідає структурному фактору з постановки.

№ 5(59)
2026
НАУКА і ТЕХНІКА СЬОГОДНІ
ISSN 2786-6025 Online

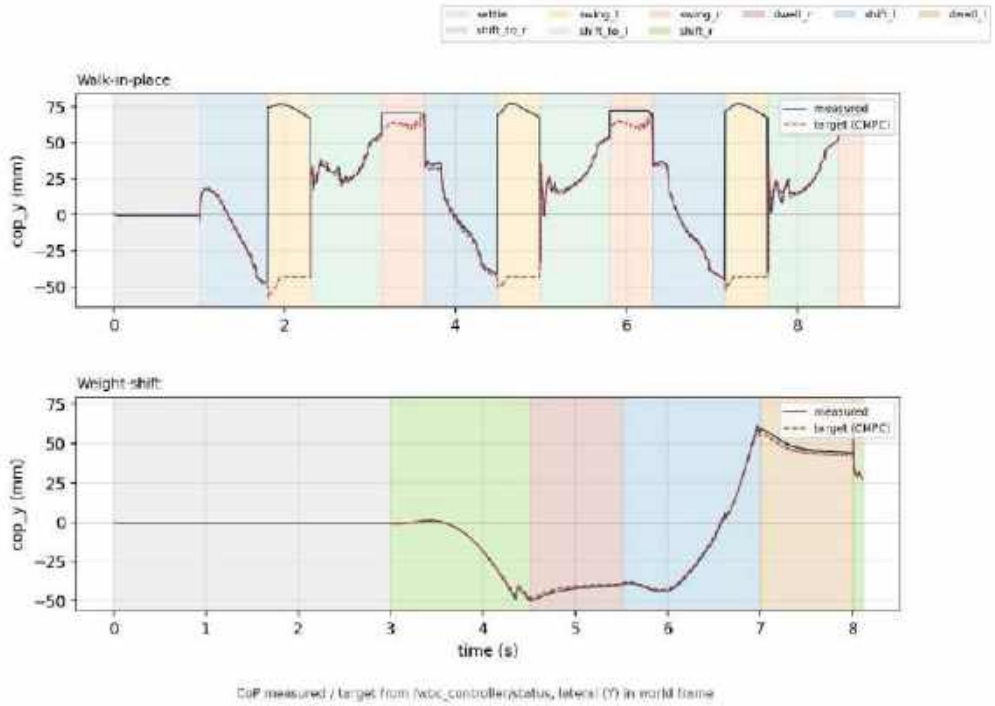


Рисунок 3 — Бічна координата центру тиску y (світова система): виміряна (Fz-зважене середнє позицій стоп) та цільова від CMPC. Верхня панель — крок на місці; нижня — бічне перенесення ваги.

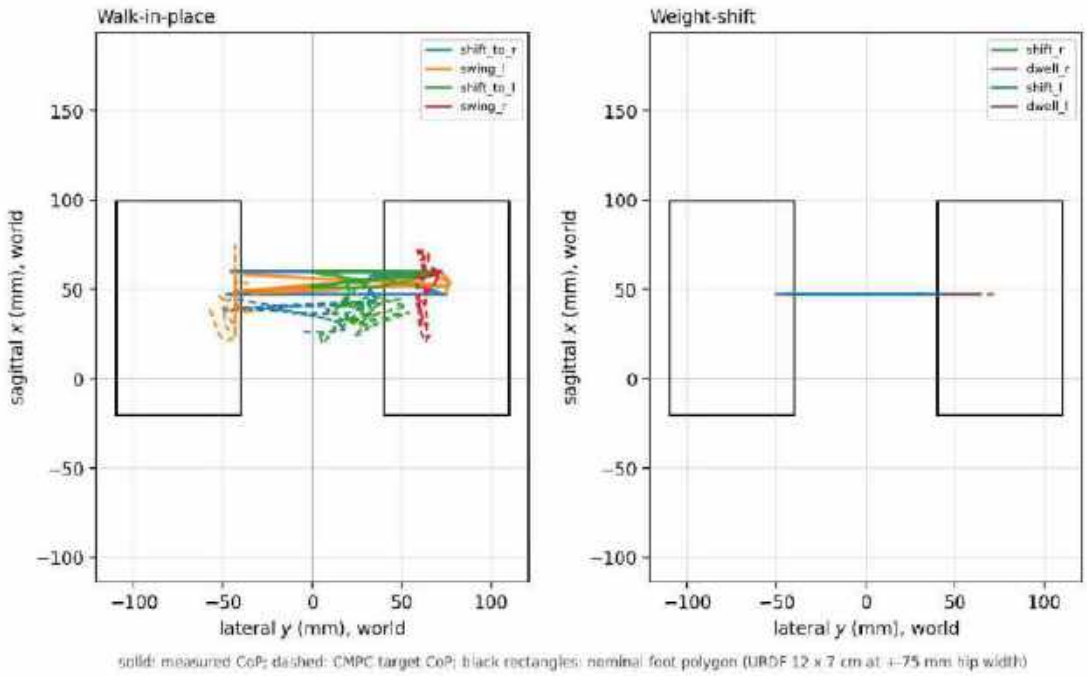


Рисунок 4 — Вид згори (xy) центру тиску відносно опорної площини. Заповнені точки — виміряна CoP, забарвлена за фазою FSM; порожні кола — цільова CoP від CMPC; чорні прямокутники — стопи на ширині таза ± 75 мм.

ISSN 2786-6025 Online

Підсумок за режимами. У всіх п’яти режимах розв’язувач квадратичного програмування залишався 100 % оптимальним (42 903 з 42 903 циклів), а пікові крутні моменти приводів утримувались у межах URDF-діапазону (стегно 88 Н·м, коліно 139 Н·м, гомілковостопний 35 Н·м); жоден суглоб не перевищував 60 % межі.

Гомілковостопний суглоб у бічній площині стабільно виходив на URDF-межу ±0,262 рад у трьох із п’яти режимів; ця межа — URDF-обмеження положення суглоба, яке Isaac Sim накладає у фізичному двигуні, бо задачу демпфування положень суглобів у TSID у цій конфігурації вимкнено. Система компенсувала цей вихід на межу без втрати вертикальної стійкості у межах wall_timeout-обмеженого тесту. Для захисту від збурень реального середовища, не змодельованих у симуляції, рекомендовано додати рівень оберненої кінематики з обмежувачем нерівностей за пріоритетом задач [21] (у реалізаціях mc_rtc та bipedal-locomotion-framework відомий як klim-демпфер кінематичних меж) між плануванням і розв’язанням оберненої динаміки — за зразком mc_rtc у проєкті HRP-4 [1] та bipedal-locomotion-framework у проєкті iCub [9].

Обмеження перевірки. Перевірку проведено лише в Isaac Sim з ідеалізаціями: оцінка стану без шуму IMU та похибок енкодерів, ідеальна контактна модель, відсутність розбіжності моделі робота й симулятора, відсутність модельованої динаміки приводів та комунікаційних затримок. Бюджет часу симуляції обмежений (≈ 8.5 с); точкові метрики слід читати як приклади, а не як оцінки з довірчим інтервалом.

У ширших розробницьких серіях з довшим бюджетом часу при ідентичному коді спостерігали значну дисперсію часу до падіння (у режимі кроку на місці — від ≈ 18 с до ≈ 42 с), а у режимах опори на одну ногу та бічного перенесення ваги — випадки падіння. Усі п’ять режимів квазістатичні або циклічні на місці; пряма хода, поворот, реакція на зовнішні поштовхи та абляційні порівняння не перевірялися.

Висновки. У роботі експериментально перевірено модульну систему керування цілим тілом (TSID + центроїдальне МПК) на повній моделі робота Unitree G1 у п’яти базових режимах руху. Сучасні людиноподібні платформи з вузькою стопою виокремлено як окремий клас, для якого традиційна система керування потребує цілеспрямованої адаптації, а не прямого перенесення. На основі експериментальних даних сформульовано два висновки:

1. Квадратичне програмування на рівні динаміки не було обмежувальним чинником у вибірці цієї роботи: у 42 903 контрольних циклах, сукупно для п’яти режимів, розв’язувач залишався 100 % оптимальним, а пікові крутні моменти приводів утримувались у межах URDF-діапазону.

2. У всіх п’яти симуляціях кожного з режимів опори на одну ногу, бічного перенесення ваги та кроку на місці гомілковостопний суглоб у бічній площині

ISSN 2786-6025 Online

виходив на URDF-межу $\pm 0{,}262$ рад; система компенсувала цей вихід на межу без втрати стійкості у межах симуляції (8.06 s–8.86 s залежно від режиму).

Напрямки подальшої роботи. Перший напрямок — розширення набору режимів за межі квазістатичних і циклічних на місці: пряма хода з підлаштуванням розміщення та часу кроку [22], поворот та зміна напрямку. Другий — кількісна оцінка реактивності до зовнішніх збурень (бічний поштовх, корисне навантаження) та робота на нерівній опорі; такі тести входять до стандартної перевірки у нещодавніх роботах [18; 23] і необхідні перед перенесенням системи на обладнання. Третій — додавання рівня оберненої кінематики з обмежувачем нерівностей за пріоритетом задач [21] (klim-демпфер у реалізаціях mc_rtc / bipedal-locomotion-framework) між плануванням і розв'язанням оберненої динаміки; ця рекомендація випливає з двох спостережень: симуляція не охоплює усіх збурень реального середовища, а вихід бічного гомілковостопного суглоба на URDF-межу у трьох із п'яти режимів свідчить про чутливість цієї осі до граничних навантажень. Альтернативний напрямок — інтегроване повнотілесне модельно-прогнозне керування на рівні суглобів [18]. Жодне з цих доповнень не перевірено експериментально в межах цієї роботи.

Декларація про генеративний ШІ. Під час підготовки статті автор використав інструмент Claude Code (Anthropic) для оформлення LaTeX-шаблону, перевірки бібліографічних посилань через Crossref та мовного редагування. Усі наукові твердження, числові результати, методологічні рішення та інтерпретації результатів належать автору; фігури, таблиці та числові результати створено автором на основі аналізу логів симуляції без участі ШІ.

Література:

1. Caron S., Kheddar A., Tempier O. Stair Climbing Stabilization of the HRP-4 Humanoid Robot using Whole-body Admittance Control. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*(2019). DOI:10.1109/ICRA.2019.8794348. P. 277–283.

2. Ramuzat N., Stasse O., Boria S. Benchmarking Whole-Body Controllers on the TALOS Humanoid Robot. *Frontiers in Robotics and AI*. Vol. 9, 2022. P. 826491. DOI:10.3389/frobt.2022.826491.

3. Unitree Robotics Unitree G1 Humanoid Robot — Product Page and Specifications. 2024. URL: https://www.unitree.com/g1 (accessed 19/05/2026).

4. Sentis L., Khatib O. Synthesis of Whole-Body Behaviors through Hierarchical Control of Behavioral Primitives. *International Journal of Humanoid Robotics*. Vol. 2, Issue 4. P. 505–518. DOI:10.1142/S0219843605000594.

5. Escande A., Mansard N., Wieber P.-B. Hierarchical Quadratic Programming: Fast Online Humanoid-Robot Motion Generation. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 33, Issue 7. P. 1006–1028. DOI:10.1177/0278364914521306.

ISSN 2786-6025 Online

6. Herzog A., Rotella N., Mason S., et al. Momentum Control with Hierarchical Inverse Dynamics on a Torque-Controlled Humanoid. *Autonomous Robots*. Vol. 40, Issue 3. P. 473–491. DOI:10.1007/s10514-015-9476-6.

7. Wensing P. M., Orin D. E. Improved Computation of the Humanoid Centroidal Dynamics and Application for Whole-Body Control. *International Journal of Humanoid Robotics*. Vol. 13, Issue 01. P. 1550039. DOI:10.1142/S0219843615500395.

8. Romualdi G., Dafarra S., L'Erario G., et al. Online Non-linear Centroidal MPC for Humanoid Robot Locomotion with Step Adjustment. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*(2022). DOI:10.1109/ICRA46639.2022.9811670. P. 10412–10419.

9. Romualdi G., Dafarra S., Hu Y., et al. A Benchmarking of DCM-Based Architectures for Position, Velocity and Torque-Controlled Humanoid Robots. *International Journal of Humanoid Robotics*. Vol. 17, Issue 01. P. 1950034. DOI:10.1142/S0219843619500348.

10. Tong Y., Liu H., Zhang Z. Advancements in Humanoid Robots: A Comprehensive Review and Future Prospects. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. Vol. 11, Issue 2. P. 301–328. DOI:10.1109/JAS.2023.124140.

11. Gu Z., Li J., Shen W., et al. Humanoid Locomotion and Manipulation: Current Progress and Challenges in Control, Planning, and Learning. (2025). URL: https://arxiv.org/abs/2501.02116 2025.

12. Kotelovych D. V., Borzov Yu. O., Burak N. Ye. Dynamic Stability in Legged Robotics: Advances and Challenges. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*. Issue 32. DOI:10.32447/20784643.32.2025.06.

13. Vukobratović M., Juricić D. Contribution to the Synthesis of Biped Gait. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. Vol. BME-16, Issue 1. P. 1–6. DOI:10.1109/TBME.1969.4502596.

14. Kajita S., Kanehiro F., Kaneko K., et al. The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A Simple Modeling for a Biped Walking Pattern Generation. *Proc. IEEE/RSJ IROS*(2001). DOI:10.1109/IROS.2001.973365. P. 239–246.

15. Englsberger J., Ott C., Albu-Schäffer A. Three-Dimensional Bipedal Walking Control Based on Divergent Component of Motion. *IEEE Transactions on Robotics*. Vol. 31, Issue 2. P. 355–368. DOI:10.1109/TRO.2015.2405592.

16. Carpentier J., Saurel G., Buondonno G., et al. The Pinocchio C++ Library: A Fast and Flexible Implementation of Rigid Body Dynamics Algorithms and Their Analytical Derivatives. *IEEE International Symposium on System Integration (SII)*(2019). DOI:10.1109/SII.2019.8700380. P. 614–619.

17. Kuindersma S., Deits R., Fallon M., et al. Optimization-based Locomotion Planning, Estimation, and Control Design for the Atlas Humanoid Robot. *Autonomous Robots*. Vol. 40, Issue 3. P. 429–455. DOI:10.1007/s10514-015-9479-3.

18. Park S., Kim M.-G., Lee H., et al. Humanoid Walking Stabilization via Model Predictive Control with Step Adjustment Based on the 3D Divergent Component of Motion. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*(2025). DOI:10.1109/ICRA55743.2025.11128625.

19. Kajita S., Morisawa M., Miura K., et al. Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking and Foot Placement Modification for Narrow Feet. *Advanced Robotics*. Vol. 25, Issue 6-7. P. 787–808. DOI:10.1163/016918611X563328.

20. NVIDIA Isaac Sim: Robotics Simulation Platform. 2025. URL: https://developer.nvidia.com/isaac/sim

ISSN 2786-6025 Online

21. Kanoun O., Lamiraux F., Wieber P.-B. Kinematic Control of Redundant Manipulators: Generalizing the Task-Priority Framework to Inequality Task. *IEEE Transactions on Robotics*. Vol. 27, Issue 4. P. 785–792. DOI:10.1109/TRO.2011.2142450.

22. Khadiv M., Herzog A., Moosavian S. A. A., et al. Walking Control Based on Step Timing Adaptation. *IEEE Transactions on Robotics*. Vol. 36, Issue 3. P. 629–643. DOI:10.1109/TRO.2020.2982584.

23. Elobaid M., Turrisi G., Rapetti L., et al. Adaptive Non-Linear Centroidal MPC With Stability Guarantees for Robust Locomotion of Legged Robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*. Vol. 10, Issue 3. P. 2806–2813. DOI:10.1109/LRA.2025.3536296.

References:

1. Caron, S., Kheddar, A., Tempier, O. (2019). Stair Climbing Stabilization of the HRP-4 Humanoid Robot using Whole-body Admittance Control. In (pp. 277–283). DOI: 10.1109/ICRA.2019.8794348

2. Ramuzat, N., Stasse, O., Boria, S. (2022). Benchmarking Whole-Body Controllers on the TALOS Humanoid Robot. , , 826491. DOI: 10.3389/frobt.2022.826491

3. Robotics, U. (2024). . URL: https://www.unitree.com/g1

4. Sentis, L., Khatib, O. (2005). Synthesis of Whole-Body Behaviors through Hierarchical Control of Behavioral Primitives. , (4), 505–518. DOI: 10.1142/S0219843605000594

5. Escande, A., Mansard, N., Wieber, P. (2014). Hierarchical Quadratic Programming: Fast Online Humanoid-Robot Motion Generation., (7), 1006–1028. DOI: 10.1177/02783 64914521306

6. Herzog, A., Rotella, N., Mason, S., Grimminger, F., Schaal, S., Righetti, L. (2016). Momentum Control with Hierarchical Inverse Dynamics on a Torque-Controlled Humanoid. , (3), 473–491. DOI: 10.1007/s10514-015-9476-6

7. Wensing, P. M., Orin, D. E. (2016). Improved Computation of the Humanoid Centroidal Dynamics and Application for Whole-Body Control. , (01), 1550039. DOI: 10.1142/S021984 3615500395

8. Romualdi, G., Dafarra, S., L'Erario, G., Sorrentino, I., Traversaro, S., Pucci, D. (2022). Online Non-linear Centroidal MPC for Humanoid Robot Locomotion with Step Adjustment. In (pp. 10412–10419). DOI: 10.1109/ICRA46639.2022.9811670

9. Romualdi, G., Dafarra, S., Hu, Y., Ramadoss, P., Chavez, F. J. A., Traversaro, S., Pucci, D. (2020). A Benchmarking of DCM-Based Architectures for Position, Velocity and Torque-Controlled Humanoid Robots. , (01), 1950034. DOI: 10.1142/S0219843619500348

10. Tong, Y., Liu, H., Zhang, Z. (2024). Advancements in Humanoid Robots: A Comprehensive Review and Future Prospects. , (2), 301–328. DOI: 10.1109/JAS.2023.124140

11. Gu, Z., Li, J., Shen, W., Yu, W., Xie, Z., et al. (2025). . arXiv:2501.02116

12. Kotelovych, D. V., Borzov, Y. O., Burak, N. Y. (2025). Dynamic Stability in Legged Robotics: Advances and Challenges. (32). DOI: 10.32447/20784643.32.2025.06

13. Vukobratovi'c, M., Jurici'c, D. (1969). Contribution to the Synthesis of Biped Gait. , (1), 1–6. DOI: 10.1109/TBME.1969.4502596

14. Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Yokoi, K., Hirukawa, H. (2001). The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A Simple Modeling for a Biped Walking Pattern Generation. In (pp. 239–246). DOI: 10.1109/IROS.2001.973365

15. Englsberger, J., Ott, C., Albu-Schaffer, A. (2015). Three-Dimensional Bipedal Walking Control Based on Divergent Component of Motion. , (2), 355–368. DOI: 10.1109/TRO. 2015.2405592

ISSN 2786-6025 Online

16. Carpentier, J., Saurel, G., Buondonno, G., Mirabel, J., Lamiraux, F., Stasse, O., Mansard, N. (2019). The Pinocchio C++ Library: A Fast and Flexible Implementation of Rigid Body Dynamics Algorithms and Their Analytical Derivatives. In (pp. 614–619). DOI: 10.1109/SII.2019.8700380

17. Kuindersma, S., Deits, R., Fallon, M., et al. (2016). Optimization-based Locomotion Planning, Estimation, and Control Design for the Atlas Humanoid Robot. , (3), 429–455. DOI: 10.1007/s10514-015-9479-3

18. Park, S., Kim, M., Lee, H., Sim, J. (2025). Humanoid Walking Stabilization via Model Predictive Control with Step Adjustment Based on the 3D Divergent Component of Motion. In . DOI: 10.1109/ICRA55743.2025.11128625

19. Kajita, S., Morisawa, M., Miura, K., Nakaoka, S., Harada, K., Kaneko, K., Kanehiro, F., Yokoi, K. (2011). Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking and Foot Placement Modification for Narrow Feet. , (6-7), 787–808. DOI: 10.1163/0169 18611X563328

20. NVIDIA (2025). . URL: https://developer.nvidia.com/isaac/sim

21. Kanoun, O., Lamiraux, F. c., Wieber, P. (2011). Kinematic Control of Redundant Manipulators: Generalizing the Task-Priority Framework to Inequality Task. , (4), 785–792. DOI: 10.1109/TRO.2011.2142450

22. Khadiv, M., Herzog, A., Moosavian, S. A. A., Righetti, L. (2020). Walking Control Based on Step Timing Adaptation. , (3), 629–643. DOI: 10.1109/TRO.2020.2982584

23. Elobaid, M., Turrisi, G., Rapetti, L., Romualdi, G., Dafarra, S., Kawakami, T., Pucci, D. (2025). Adaptive Non-Linear Centroidal MPC With Stability Guarantees for Robust Locomotion of Legged Robots. , (3), 2806–2813. DOI: 10.1109/LRA.2025.3536296

Дата першого надходження статті до видання: 08.05.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026

Журнал

«Наука і техніка сьогодні»

Випуск № 5(59) 2026

Формат 60х90/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 8,2. Наклад 100 прим.

Видавець:
Громадська наукова організація «Всеукраїнська асамблея докторів наук з державного управління»
Свідоцтво серія ДК №4957 від 18.08.2015 р., Андріївський узвіз, буд.11, оф 68, м. Київ, 04070.