

Технічні науки

УДК 004.93

Короткіх Віктор Миколайович

*аспірант кафедри систем автоматизованого проектування
Національного університету «Львівська політехніка»*

Korotkykh Viktor

*Graduate Student of the Computer Design System Department
Lviv Polytechnic National University*

Щербовських Сергій Володимирович

*доктор технічних наук, професор,
професор кафедри систем автоматизованого проектування
Національний університет «Львівська політехніка»*

Shcherbovskykh Serhiy

*Doctor of Technical Science, Professor,
Professor of the Computer Design System Department
Lviv Polytechnic National University*

**ОГЛЯД МЕТОДІВ ПОШУКУ 3D-МОДЕЛЕЙ У СИСТЕМАХ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
OVERVIEW OF 3D MODEL SEARCH METHODS IN COMPUTER
DESIGN SYSTEMS**

***Анотація.** В процесі сучасної проектно-конструкторської діяльності накопичуються великі об'єми креслень та іншої технічної документації, представленої в електронному вигляді, що створює передумови для повторного використання технічної інформації при розробці нових технічних об'єктів. Повторне використання наявних ресурсів може скоротити цикли розробки нових виробів, зменшити витрати на розробку та підвищити продуктивність і якість нових виробів. У цій статті*

представлено огляд сучасних методів пошуку 3D-моделей в процесі проектування. Це охоплює методи, засновані на 3D-моделях (включаючи методи статистичного пошуку, аналізу геометричної форми та аналізу топології) і семантичних технологій (включаючи методи пошуку онтологій та методи пошуку графів знань). У цьому огляді також проводиться порівняльна характеристика існуючих методів пошуку та пропонуються майбутні напрямки досліджень.

Ключові слова: *семантика, онтологія, системи автоматизованого проектування.*

Summary. *In the process of modern design and construction activities, large volumes of drawings and other technical documentation presented in electronic form accumulate, which creates the prerequisites for the reuse of technical information in the development of new technical objects. Reuse of existing resources can shorten the development cycles of new products, reduce development costs and increase the productivity and quality of new products. This article presents an overview of modern methods for searching for 3D models in the design process. This covers methods based on 3D models (including statistical search methods, geometric shape analysis and topology analysis) and semantic technologies (including ontology search methods and knowledge graph search methods). This review also provides a comparative description of existing search methods and suggests future research directions.*

Key words: *semantics, ontology, computer-aided design systems.*

Постановка проблеми. Із широким застосуванням технологій цифрового моделювання та виробництва накопичення даних 3D-моделей САПР швидко зростає. Сучасні системи САПР проникли в усі галузі та на всіх рівнях виробництва та проектування. З розвитком підприємств і збільшенням кількості виконаних проєктів, масштаб внутрішньої бази

даних підприємства, яка є цінним ресурсом, буде продовжувати зростати. Ефективне повторне використання наявних ресурсів підприємств, скорочення циклу розробки нових продуктів, скорочення витрат на розробку та покращення продуктивності та якості нових продуктів мають стратегічне значення для підвищення основної конкурентоспроможності підприємств.

У сучасному світі глобалізації та міжнародного поділу праці діяльність з розробки нових продуктів зазвичай динамічно організовується та проводиться інженерами різних спеціалізацій, з різних регіонів та організацій. Життєвий цикл технічних об'єктів включає аналіз вимог і постановку технічного завдання, ескізне та детальне проектування, створення діючого зразка, розробку технологічної документації, тестування та сертифікація, виробництво та експлуатація, обслуговування і ремонт, утилізація або повторне використання та інші процеси. На всіх етапах життєвого циклу технічних об'єктів відбувається інтеграція внутрішніх і зовнішніх ресурсів даних 3D-моделі та формування міждисциплінарної платформи програмного забезпечення для досліджень і розробок. За допомогою ефективної технології пошуку даних, надання даних моделі 3D CAD для дослідження та розробки продукту, сприяння стандартизації інформації 3D CAD та формування «бази знань» або «бібліотеки» з ресурсами даних як ядром. Внутрішні бази даних тривимірних CAD-моделей підприємства і бази даних підприємств пов'язаних в ланцюжки постачальник-отримувач, взаємодіють з даними систем управління даними про продукт (PDM) і систем планування ресурсів підприємства (ERP), щоб реалізувати наскрізний рух інформації про продукцію, включаючи геометричні параметри, тип матеріалу, інформацію про обробку поверхні, класифікаційний номер, розмір та іншу інформацію про атрибути [1]. Таким чином, можна зробити висновок, що пошук елементів 3D моделі є ключем до управління ресурсами даних.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз інженерної практики свідчить про те що приблизно 75–80% нових елементів моделей повторно використовують існуючі зразки виробів за допомогою варіантного та адаптивного дизайну, і лише приблизно 20–25% нових деталей сконструйовані de-novo [2]. Крім того, мінімальні зміни конструкції дозволяють використовувати накопичені технологічні та організаційні знання, заходи з охорони праці та екологічної безпеки. Повторне використання існуючих цифрових моделей виробів пришвидшує і здешевлює процес виробництва, дозволяє застосування готових програм числового керування (NC), технологічної оснастки та допоміжного обладнання, які накопичується в процесах проектування та виробництва. [3]; В структурному проектуванні, проектуючи частини та компоненти, інженери використовують модульний підхід до конструкції готового виробу, розбиття складного інженерного об'єкта на окремі рівні проектування, значно покращують здатність проектувати та розробляти складні продукції та ефективно зменшити споживання ресурсів обробки на 30% і вартість складання на 12% [4].

Незважаючи на те, що поточна система САПР відіграє значну роль на етапах проектування, моделювання та симуляції, існують труднощі в забезпеченні ефективної підтримки в пошуку та зіставленні існуючих технічних рішень з концепцією виробу, який проектується на ранній стадії проектування. На початку проектування інженери повинні мати загальне уявлення про конструкцію деталі, матеріал, технологічність та економічність її виготовлення, експлуатаційні характеристики готового технічного об'єкту. Ранній етап проектно-конструкторської часто полягає у творенні ескізів у ручну і є ефективним методом для конструкторів, щоб швидко фіксувати візуалізувати та обмінюватися конструкторськими ідеями [4]. Автоматизація переходу від ескізу деталі до отримання 3D-моделі може значно підвищити ефективність проектування деталі [5].

Пошук ідентичних або аналогічних технічних об'єктів на основі геометрії та функції деталей займає багато часу та енергії, і є актуальною проблемою проектно-конструкторської діяльності. Наразі недосконалість методів пошуку в базах даних САПР обмежують повторне використання готових технічних рішень. В основному це проявляється в наступному:

1. Методи пошуку мають низьку точність. Підприємства з виробництва деталей зазвичай використовують програмне забезпечення PDM/PLM для керування процесом проектування деталей. Традиційний метод керування базується на створенні унікального ідентифікатора моделі САПР і використовує ключові слова для отримання назви моделі. Недоліками цього методу є те, що ідентифікація та кодування деталей не є уніфікованими, а стандарт ідентифікації є недосконалим; інформація, що міститься в ключових словах, обмежена, що не може точно та вичерпно описати технічний об'єкт, що впливає на точність пошуку.

2. Процес пошуку ресурсозатратний і займає багато часу. Виробничим підприємством бракує методів і систем наукової класифікації технічних об'єктів. Відсутність стандартизації обміну інформацією між різними конструкторськими системами також погіршує умови роботи конструкторів і технологів. Конструктори не можуть швидко знайти відповідні підказки під час пошуку 3D-моделей САД тому у процесі пошуку перевіряються багато неадекватних об'єктів що зазвичай займає 60% або більше часу розробки продукту.

3. Істотні характеристики технічного об'єкту неможливо отримати тільки на основі його геометрії, відсутність зв'язку між геометричними параметрами деталі та її функціональним призначенням. Інженери повинні враховувати крім геометричних параметрів деталі її матеріал технологічність економічність та експлуатаційні якості. Ескіз є ефективним засобом конструкторів для швидкого прототипування технічного об'єкту.

Однак важко шукати очікувану модель на основі ескізу, коли відомі лише, загальні геометричні параметри або зовнішній вигляд деталі.

Точний і ефективний пошук 3D-моделей деталей може полегшити оперативне виявлення та повторне використання існуючих проектно-конструкторських рішень, заощадити значний час і витрати на розробку продукту, додатково оптимізувати дизайн і уникнути помилок в процесі розробки.

Враховуючи вищезазначені проблеми, у цій статті розглядаються методи пошуку 3D-моделі САПР при проектуванні та виготовленні деталей машин, обговорюються принципи існуючих методів пошуку, підсумовуються останні дослідження методів, систематизовано узагальнено переваги та недоліки кожного методу та вказано напрямки подальшого розвитку.

Мета статті. Дослідити та систематизувати сучасні методи пошуку 3D-моделей у системах автоматизованого проектування (САПР), включаючи підходи на основі геометричного аналізу, топологічних структур та семантичних технологій. Провести порівняльний аналіз існуючих методів, виявити їхні переваги та недоліки, а також окреслити перспективи подальших досліджень у напрямку покращення ефективності пошуку, зокрема через використання онтологічних моделей та графів знань.

Виклад основного матеріалу. Методи пошуку на основі дескрипторів наразі є основними методами пошуку, ключем до пошуку 3D-моделі є побудова дескрипторів функцій для виявлення характеристик моделі. Ефективний дескриптор ознак повинен бути достатньо інформативним, щоб забезпечити повне та ефективне представлення технічних параметрів. Крім того, він має бути обчислювально ефективним, компактним і стійким до типових збурень. Суть порівняння та зіставлення описів ознак форми після вилучення ознак моделі полягає в обчисленні просторових відстаней між описами ознак моделі запиту та моделі, яку

потрібно отримати, і сортування їх [5]. Ті, що розташовані близько один до одного, вважаються подібними, і таким чином може бути реалізовано пошук 3D-моделей.

Для пошуку 3D-моделі САПР були запропоновані методи пошуку, зосереджені на аналізі форми моделі [6]. За формою аналізу ці методи можна класифікувати як методи статистики даних, методи аналізу геометричної форми та методи аналізу топологічної структури. . Методи статистики даних

Принцип методу пошуку 3D-моделі на основі статистики даних полягає у вибірці характеристик 3D-моделі та статистичному аналізі інформації про функції. Ранні дослідження в основному зосереджені на аналізі геометричних особливостей, таких як параметри поверхні моделі, включаючи кути між поверхнями, геометричну відстань, розподіл вершин, кривизни ліній та ін. [7].

Дескриптори об’єктів форми встановлюються за допомогою гістограм або векторів для виявлення ключових об’єктів геометричної інформації і подальшого кількісного аналізу геометричної інформації для обчислення подібності. Спрощення геометричної інформації та відкидання даних, викликане особливостями статистичного методу, роблять пошуковий ефект цього методу слабким. Метод пошуку 3D-моделі на основі статистики даних зіставляє моделі обчислювальним способом. Метод розрахунку простий і швидкий, але він не може отримати достатньо тонких характеристик для подальшого вимірювання відмінностей між моделями. Таким чином, ефект пошуку цього методу обмежений.

Методи пошуку 3D-моделі на основі геометричних форм полягає у виділенні геометричних особливостей форми 3D-моделі, що сприяє побудові дескрипторів ознак форми. Одним з підходів до аналізу геометрії є модель “сумки зі словами” яка вперше була застосована для класифікації тексту. Цей метод розглядає словник елементів як незалежну ознаку та

підраховує частоту ознак; він широко використовується в класифікації зображень [8]. Мішок ознак — це метод виділення ознак зображення, який спирається на ідею класифікації тексту (мішок слів), абстрагує репрезентативні ключові слова із зображенням, формує словник, а потім підраховує кількість «ключових слів», що з'являються на кожному зображенні, щоб отримати вектор ознак зображення. Метод EMD, також відомий як відстань Вассерштейна, використовується для представлення подібності між двома розподілами. Загальною рисою цих методів є сегментація та виділення ознак 3D-моделей. Об'єкти варіюються від простих геометричних форм до абстрактних сутностей. Інформація про геометричну форму 3D-моделі деталі повністю й точно відображає задум конструктора, а результат розрахунку на основі подібності геометричної інформації є більш точним. Однак, через різноманітність і складність геометричної форми конструкції деталі, важко ефективно визначити особливості форми моделі. Ряд вчених застосували перетворення 3D-моделі в кілька дрібномасштабних мета-моделей, щоб максимально зберегти вихідну інформацію про модель.

Методи аналізу топологічної структури 3D-моделі полягає у виявленні особливостей структурних зв'язків елементів відповідно до просторової організації моделі в топологічному просторі [8]. Як більш просунутий метод опису моделі, метод представлення топологічної структури схожий на людське сприйняття і широко використовується в модельному представленні жорстких і нежорстких моделей.

Граф суміжності атрибутів AAG [9] і скелетний граф [10] зазвичай використовуються для представлення топологічної структури 3D-моделей. Метод ігнорує форму зовнішньої поверхні та представляє структуру 3D-моделі у вигляді скелетного графа, що полегшує отримання глобальних характеристик. Скелетний граф представляє грані об'єкта або центральну лінію області як групу з'єднаних відрізків ліній або точок для абстрагування

структури об’єкта. Ця структура проста і ефективна. Глобальні ознаки фокусуються на цілому і можуть бути швидко класифіковані; локальні особливості зосереджені на місцевих деталях і підходять для точного розрізнення.

Методи пошуку на основі семантики. Семантика виражає інформацію як групу вузлів, які з’єднані один з одним через групу позначених спрямованих ліній, які представляють зв’язок між вузлами. Область семантики постійно розвивається та накопичила ефективні знання з управління даними з точки зору обміну даними, виявлення, інтеграції та повторного використання [11]. Перший етап, який охоплював початок і середину 2000-х років, базувався на онтологічному підході, другий етап ґрунтувався на асоціативних даних і тривав до 2010 року, третій етап визначається графами знань і триває до сьогоднішнього дня.

Ключ до методу пошуку 3D-моделі САПР на основі семантики полягає у створенні та використанні семантики частин моделі. При створенні дескрипторів моделі цей метод враховує не лише базову геометричну інформацію, але й семантичну інформацію високого рівня, таку як особливості конструкції та особливості обробки. Методи пошуку поділяються на методи пошуку онтології та графа знань. Існуючі методи семантичного пошуку зазвичай реалізуються за допомогою мови веб-онтології (OWL). Як мова мережевої онтології, OWL має чітку семантичну послідовність і характеристики міркування. Метод пошуку онтології асоціює геометричну топологічну інформацію низького рівня з семантичною інформацією високого рівня. Семантика високого рівня містить інформацію про виробництво продукту, особливості обробки, функції продукту, задум дизайну та іншу інформацію. Завдяки гнучкості представлення онтології обґрунтоване та ефективне представлення 3D-моделі САПР через онтологію є однією з ключових технологій пошуку. Однак не існує уніфікованих семантичних описів або семантичних

дескрипторів для гетерогенних моделей, побудованих з використанням різних систем що стримує широке використання даного методу.

Метод пошуку з допомогою графу знань. Оскільки Google запропонував концепцію графів знань, програми, засновані на графах знань, стали гарячою точкою досліджень у сфері інформаційних технологій, таких як семантичний пошук, обґрунтовані відповіді на запитання та персоналізовані рекомендації [12]. Графи знань підтримують більш широкі та глибші функції, включаючи семантичний пошук, багатовимірне відображення знань і логічне міркування. Знання граф — це структурована семантична база знань, яка представляє сутності знань про дизайн, включаючи 3D-моделі САПР, зв'язок між сутностями у формі графіка і використовує з'єднувальні лінії для представлення зв'язку між сутностями.

Поява та розвиток атласу знань дає нові ідеї для семантичного пошуку. Як розширення семантичних мереж, його суть також полягає у величезній семантичній мережі, яка використовує потрібні атрибути відношення сутності для вираження знань і семантичних зв'язків між знаннями. На відміну від семантичних мереж, графи знань більше зосереджуються на значеннях атрибутів сутностей і зв'язків між сутностями. Репрезентація знань більш детальна. Природа його вузлів і шляхів зв'язків робить аналіз і міркування, наприклад кластеризацію та прогнозування, більш зручними. Будучи основою інтелектуального семантичного пошуку, основна технологія побудови карти знань включає представлення знань і міркування.

Технології семантики та онтології забезпечують ефективний, уніфікований та формальний метод семантичного вираження знань предметної області. Однак у сфері САПР жодне дослідження не намагалося описати неоднорідні моделі функцій САПР, створені системами САПР на основі семантики, або створити семантичні дескриптори таких моделей, особливо щодо семантичної бази даних з інформацією про життєвий цикл.

Під час використання тензорної декомпозиції для обґрунтування знань ключем є зменшення розмірності високо вимірною графа знань, таким чином значно зменшуючи розмір обчислених даних. Однак алгоритм має обмеження, оскільки він не враховує наявності альтернативних шляхів на карті, що перешкоджає його здатності виводити глибокі зв'язки між об'єктами. Крім того, при використанні тензорної декомпозиції у великомасштабній карті знань збільшується часова складність алгоритму. Алгоритм обґрунтування шляху вивчає графову структуру карти знань, аналізуючи зв'язки між сутностями та виводячи зв'язки на глибшому рівні. Однак алгоритм має проблеми із загальними здібностями міркувати під час роботи з кількома переходами.

Висновки і перспективи подальших досліджень. На даний момент досягнуто значного прогресу в дослідженні технології пошуку 3D-моделі в процесі проектування. Технології семантики та онтології забезпечують ефективний, уніфікований та формальний метод семантичного вираження знань предметної області. Дослідники застосували їх до багатьох галузей, змоделювали знання предметної області, розробили онтологічні моделі різних форм, деталізації та масштабу, і таким чином реалізували різні семантичні застосування. Разом з тим існує протиріччя між ефективністю пошуку та точністю. Існуючі дескриптори ознак являють собою набір надвисокомірних векторів, структур графів або локальних дескрипторів ознак, що призводить до складних і громіздких порівнянь подібності між моделями; таким чином, ефективність пошуку зазвичай низька і ресурсозатратна. Тому актуальною проблемою є побудова бази знань проектування та моделювання бази знань життєвого циклу деталі на основі семантичної технології в майбутньому. Методи семантичного пошуку, засновані на онтології в поєднанні з технологіями глибокого навчання, безсумнівно найперспективнішим напрямком у даній сфері.

Літэратура

1. Elangovan, U. 2020. Product Lifecycle Management (PLM): A Digital Journey Using Industrial Internet of Things (IoT). Boca Raton: CRC Press.
2. Huang, B., S. Zhang, R. Huang, X. Li, and Y. Zhang. 2018. “An Effective Retrieval Approach of 3D CAD Models for Macro Process Reuse.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102 (5–8):1067–1089.
3. Mesa, J., J. Pierce, J. Zuciga, I. Esparragoza, and H. Maury. 2021. “Sustainable Manufacture of Scalable Product Families Based on Modularity.” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 35:80–95. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.05.011>.
4. Serrano Lasa, I., M. Mazmela Etxabe, and I. Ricondo Iriondo. 2022. “New Application for Sketching in a Machine Tool Company.” *Journal of Engineering Design*, 33 (1): 64–94.
5. Carvalho, L., and A. von Wangenheim. 2019. “3D Object Recognition and Class indication: A Systematic Literature Review.” *Pattern Analysis and Applications*, 22 (4):1243–1292.
6. Bonino, B., F. Giannini, M. Monti, and R. Rafaeli. 2023. “Shape and Context-Based Recognition of Standard Mechanical Parts in CAD Models.” *Computer-Aided Design*, 155:103438.
7. Chen, J., H. T. Ilies, and C. Ding. 2022. “Graph-Based Shape Analysis for Heterogeneous Geometric Datasets: Similarity, Retrieval and Substructure Matching.” *Computer-Aided Design*, 143:103125. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2021.103125>.
8. Hao, Z., L. Kaidong, and Q. Feng. 2019. “Improvement of Word Bag Model Based on Image Classification.” *Proceedings of the 2019 IEEE 1st International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)*, Kunming, China. IEEE.

9. Ning, F., Y. Shi, M. Cai, and W. Xu. 2021. “Part Machining Feature Recognition Based on a Deep Learning Method.” *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1–13.

10. Lei, H., Y. Li, H. Chen, S. Lin, G. Zheng, and X. Luo. 2015. “A Novel Sketch-Based 3D Model Retrieval Method by Integrating Skeleton Graph and Contour Feature.” *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, 9 (4): JAMDSM0049–JAMDSM0049.

11. Nzetchou, S., A. Durupt, S. Remy, and B. Eynard. 2022. “Semantic Enrichment Approach for Low-Level CAD Models Managed in PLM Context: Literature Review and Research Prospect.” *Computers in Industry*, 135:103575. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103575>.

12. Fensel, D., U. Şimşek, K. Angele, E. Huaman, E. Korle, O. Panasiuk, I. Toma, J. Umbrich, and A. Wahler. 2020. *Introduction: What is a Knowledge Graph? Knowledge Graphs*, 1–10. Switzerland: Springer.

13. Willis, K. D., P. K. Jayaraman, J. G. Lambourne, H. Chu, and Y. Pu. 2021. “Engineering Sketch Generation for Computer-Aided Design.” *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Nashville, TN, USA.

14. Ma, N., B. Yang, and J. Shang. 2020. “Part Retrieval Technology Based on Geometric Shape and Topological Correlation.” In *Advances in Mechanical Design*, edited by, J. Tan, 499–507. Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9941-2_41.