

СЕМАНТИЧЕСКИЕ СЕТИ В ПЛАНИРОВАНИИ ДЕКОМПОЗИЦИИ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В статье рассматривается интеграция семантических сетей с графовыми методами для решения задач планирования декомпозиции сложных технических изделий в системах автоматизированного проектирования (САПР) [1]. Традиционные методы, опирающиеся на И-ИЛИ графы, графы связей компонентов (Connection Constraint Graphs, CCG) и матрицы предшествования, демонстрируют ограничения при интеграции с гетерогенными источниками данных предприятия [2]. В статье представлено использование централизованной онтологии разборки (Disassembly Core Ontology, DCO). Показано, что явное кодирование доменных знаний снижает вычислительную сложность поиска в графовом пространстве состояний, автоматически исключая физически нереализуемые конфигурации. Рассмотрены примеры реализации в системах автоматизированного проектирования, использующих языки RDF (Resource Description Framework, Фреймворк описания ресурсов) и OWL (Web Ontology Language, Язык веб-онтологий) [3].

This article examines the integration of semantic networks with graph methods for solving problems of planning the decomposition of complex technical products in computer-aided design (CAD) systems [1]. Traditional methods based on AND-OR graphs, connection constraint graphs (CCG), and precedence matrices demonstrate limitations when integrating with heterogeneous enterprise data sources [2]. The article presents the use of a centralized disassembly ontology (Disassembly Core Ontology, DCO). It is shown that explicit encoding of domain knowledge reduces the computational complexity of searching in the graph state space, automatically excluding physically unrealizable configurations. Examples of implementation in CAD systems using RDF

(Resource Description Framework) and OWL (Web Ontology Language) [3] are considered.

Ключевые слова: САПР, онтология, семантические сети, графовые модели, И-ИЛИ граф, граф связей, планирование разборки

Keywords: CAD, ontology, semantic networks, graph models, AND-OR graph, relationship graph, disassembly planning

Введение

Системы САПР хранят структуру сложного изделия в виде иерархических моделей, включающих информацию о компонентах, сборках и подсборках, материалах, типах соединений и других характеристиках [4]. Эта информация часто фрагментирована между несколькими системами: системами управления жизненным циклом изделия (Product Lifecycle Management, PLM), системами управления производством (Manufacturing Execution System, MES), системами технического обслуживания и т.д.

Современные методы формализации задач планирования разборки в значительной степени опираются на графовые модели структуры изделия. Фундаментальным и наиболее универсальным инструментом в этой области являются И-ИЛИ графы (AND/OR graphs) — иерархические гиперграфовые структуры, которые компактно кодируют логику композиции изделия (AND-связи, определяющие, что узел существует только при наличии всех своих компонентов) и альтернативность технологических операций (OR-связи, отображающие различные допустимые способы разборки узла). Для решения специфических подзадач и повышения эффективности алгоритмов планирования используются и другие специализированные графовые представления [5]. Графы связей (Connection Constraint Graphs, CCG), где вершины соответствуют деталям, а рёбра — физическим соединениям между ними, позволяют явно моделировать топологию сборки и анализировать зависимости доступности компонентов [6]. Графы ограничений предшествования (Precedence Constraint Graphs, PCG) фокусируются

на кодировании технологической последовательности операций, где направленные рёбра задают обязательный порядок их выполнения. Наиболее комплексными являются гибридные графы разборки (Hybrid Disassembly Graphs, HDG), которые интегрируют в единую модель информацию о топологии, предшествовании, стоимостных и ресурсных параметрах, обеспечивая тем самым полноценную базу для многокритериальной оптимизации процесса демонтажа.

Ограничение рассмотренных графовых моделей заключается в том, что они не учитывают аспект семантической интеграции разнородной информации, необходимой для планирования. В практических условиях, когда специалист по разборке формирует последовательность операций, требуемые данные (о структуре изделия, свойствах материалов, доступности инструмента, стоимостных нормативах) распределены между гетерогенными источниками: CAD-системами, базами PLM и ERP и другими источниками технической информации. Каждый из этих источников оперирует собственной, зачастую изолированной, терминологией и схемой данных, что порождает проблему семантической неоднородности: один и тот же конструктивный или технологический концепт может быть обозначен различными терминами в разных системах, а отношения между понятиями остаются неявными [7]. Это приводит к необходимости сложного и подверженного ошибкам ручного сопоставления данных, задержкам и снижению качества принимаемых решений.

Использование семантических сетей представляет формализованный подход к решению указанной проблемы через построение предметных онтологий. Онтология выступает в роли формальной спецификации предметной области, задавая систему согласованных понятий, их свойств и взаимосвязей с явно выраженной семантикой. Таким образом, онтология выполняет функцию верхнего семантического слоя (семантического ядра), который накладывается на существующие графовые модели и структуры баз данных, обеспечивая их однозначную интерпретацию и возможность логического вывода новых фактов [8].

Структура онтологии разборки (DCO)

Ядром предлагаемого подхода является формальная онтология разборки (Disassembly Core Ontology, DCO) — согласованная концептуальная модель, которая определяет основные сущности, их атрибуты и отношения в предметной области демонтажа сложных изделий. DCO включает три ключевые группы классов. Первая группа описывает компоненты изделия, начиная с базового класса `Component` и его специализаций: `HomogeneousComponent` (из однородного материала), `CompositeComponent` (из нескольких материалов), `ComplexComponent` (необратимо соединённые компоненты) и `Subassembly` (функциональная сборка). Вторая группа формализует типы соединений (`Connection`). Третья группа определяет операции разборки (`DisassemblyOperation`) через классы `Non-destructiveOperation` и `DestructiveOperation`.

Практическая ценность DCO реализуется через механизм явных правил, позволяющих осуществлять автоматический логический вывод новых фактов на основе задекларированных. Эти правила формализуют экспертные знания о предметной области. Например, правило классификации типов компонентов устанавливает, что если объект класса `Component` агрегирует как минимум два объекта типа `HomogeneousComponent`, то он должен быть отнесён к классу `ComplexComponent`. Для соединений действуют правила определения их типа: если для разъединения `Connection` требуется приложение усилия (`hasRequireForce`), оно классифицируется как `RigidConnection`, в противном случае — как `LooseConnection`. Критически важными являются правила предшествования операций, которые кодируют причинно-следственные связи, например, для пары «болт–гайка» устанавливается, что операция снятия гайки должна предшествовать операции извлечения болта. Отдельный класс правил служит для исключения заведомо невыполнимых последовательностей операций, проверяя, что компонент не может быть извлечён до удаления всех блокирующих его частей. Совокупность этих правил позволяет существенно сократить пространство поиска допустимых планов

разборки, исключая технологически нереализуемые варианты на семантическом уровне, до выполнения ресурсоёмких геометрических проверок [9].

На основе DCO и графовых представлений формируется интегрированная семантико-графовая модель планирования разборки. Данная модель объединяет три ключевых информационных слоя: топологическую структуру, представленную И-ИЛИ графами и графами ограничений предшествования; формальные семантические ограничения, заданные правилами и классами онтологии; а также стоимостные и ресурсные параметры, агрегированные из связанных гетерогенных источников. Такая интеграция обеспечивает комплексное представление, необходимое для многокритериальной оптимизации.

Процесс планирования с использованием этой модели включает несколько этапов. Первоначальный этап заключается в загрузке формальной онтологии (DCO) и конкретных данных об изделии, после чего к ним применяются семантические правила для логического вывода дополнительных фактов и автоматического исключения технологически невозможных конфигураций. На втором этапе на основе семантически обогащённой информации строится или уточняется граф ограничений, гарантирующий учёт всех выявленных зависимостей. Финальный этап — применение алгоритмов оптимизации (линейного программирования, генетических алгоритмов, методов роя частиц) к сокращённому за счёт семантики пространству состояний, что существенно повышает вычислительную эффективность поиска.

Для реализации семантических моделей разборки используются стандарты RDF (Resource Description Framework) и OWL (Web Ontology Language)[3]. RDF служит фундаментальной моделью данных, представляя информацию в виде ориентированного графа, состоящего из троек «субъект-предикат-объект». Эта модель обеспечивает гибкое и машиночитаемое описание ресурсов и их взаимосвязей. Надстройкой над RDF выступает язык OWL, предназначенный для создания формальных онтологий. OWL, основанный на логике описаний, позволяет

определять сложные классы, их иерархии, свойства и ограничения, а также выполнять автоматизированный логический вывод для проверки согласованности модели и получения новых знаний. Совместное использование RDF и OWL создаёт технологическую основу для поддерживающих логический вывод семантических моделей, таких как DCO, обеспечивая их интеграцию в распределённую информационную среду предприятия.

Практическая эффективность данного подхода подтверждается результатами исследований для различных категорий изделий. При планировании разборки смартфона iPhone6 использование семантических правил в рамках двухпопуляционного генетического алгоритма позволило автоматически отсеять несколько сотен нереализуемых последовательностей, сократив расчётное время разборки на 11.2% [10]. В задаче оптимизации демонтажа аккумуляторного блока электромобиля с помощью алгоритма роя частиц (PSO) применение семантических ограничений улучшило качество решений на 15-20% [11].

Заключение

Технологии семантических сетей и традиционные графовые методы представления структуры изделия образуют не альтернативные, а взаимодополняющие уровни в системах автоматизированного планирования разборки. Графовые модели (И-ИЛИ графы, графы связей и ограничений) обеспечивают эффективное представление топологических отношений и пространственных зависимостей между компонентами. В то же время, семантические онтологии, такие как Disassembly Core Ontology (DCO), решают фундаментальную проблему интеграции гетерогенных данных, устанавливая единую систему понятий и правил логического вывода для различных информационных источников.

Синтез этих подходов в единую семантико-графовую модель демонстрирует ряд значимых преимуществ. Во-первых, он позволяет существенно повысить вычислительную производительность алгоритмов планирования за счёт

исключения технологически невозможных конфигураций на этапе логического вывода, что сокращает пространство поиска. Во-вторых, онтология выступает в роли семантического интеграционного ядра, обеспечивая согласованный обмен данными между CAD-системами, базами PLM, ERP и системами технической поддержки. В-третьих, использование открытых стандартов, таких как RDF и OWL, гарантирует возможность расширения и совместимости решения с другими корпоративными системами.

Данный интегрированный подход находит практическое применение в машиностроении, в частности, при построении систем управления технической документацией, в интеграционных платформах САПР и PLM.

В качестве перспективных направлений дальнейших исследований выделяются: автоматизация построения и обогащения онтологий с помощью методов машинного обучения для извлечения знаний из документации [12], разработка специализированных расширений DCO для различных отраслей (электроника, автомобилестроение, энергетика), развитие гибридных алгоритмов оптимизации, работающих с онтологически заданными ограничениями.

Таким образом, комбинированное применение графовых моделей и семантических онтологий формирует мощный методологический базис для создания интеллектуальных систем поддержки решений, направленных на оптимизацию процессов декомпозиции сложных изделий и повышение эффективности использования материальных ресурсов на завершающей стадии жизненного цикла изделия.

Литература

1. Zhu, B. Towards A Semantic Web Approach for Disassembly Planning / B. Zhu, U. Roy // Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2014). – Buffalo, New York : ASME, 2014. – Paper No. DETC2014-34793. – Pp. 1–9.

2. Lambert, A. J. D. Disassembly Modeling for Assembly, Maintenance, Reuse and Recycling / A. J. D. Lambert, S. M. Gupta. – Boca Raton, Florida : CRC Press, 2005. – 428 p.
3. Towards a Semantic Web of Things: A Hybrid Semantic Annotation, Extraction, and Reasoning Framework for Cyber-Physical System // Sensors. – 2017. – Vol. 17, № 2. – P. 403.
4. An Approach for Semantic Integration of Heterogeneous Data Sources // PeerJ Computer Science. – 2020. – Vol. 8. – Art. cs-254.
5. Sequence Planning for Selective Disassembly Aiming at Reducing Energy Consumption Using a Constraints Relation Graph and Improved Ant Colony Optimization Algorithm // Energies. – 2018. – Vol. 11, № 8. – P. 2106.
6. Parallel Disassembly Sequence Planning Using a Discrete Whale Optimization Algorithm for Equipment Maintenance in Hydropower Station // Processes. – 2024. – Vol. 12, № 7. – P. 1412.
7. A Design Method with Knowledge Modeling for Complex Product Based on Ontology // Journal of Software Engineering and Applications. – 2013. – Vol. 6, № 7. – Pp. 326–335.
8. OntoIMM: An Ontology for Product Intelligent Master Model // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9, № 12. – P. 2553.
9. Research of Partial Destructive Based Selective Disassembly Sequence Planning // Open Mechanical Engineering Journal. – 2015. – Vol. 9. – Pp. 605–618.
10. Research on Robotic Disassembly Sequence Planning Based on Genetic Programming // Proceedings of the International Conference on Computer, Control and Robotics (CCCAR 2022). – Paris : ITM Web of Conferences, 2022. – Paper № 02031.
11. An improved disassembly hybrid graph model for selective disassembly sequence planning // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2023. – Vol. 237, № 13. – Pp. 1987–2001.

12. Design Ontology Supporting Model-based Systems-engineering Formalisms: ArXiv preprint. – 2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2010.07627> (дата обращения: 24.05.2024). – Текст: электронный.

Literature

1. Zhu, B., & Roy, U. (2014). Towards a semantic web approach for disassembly planning. *Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2014)*. Buffalo, New York: ASME. Paper No. DETC2014-34793, pp. 1–9.
2. Lambert, A. J. D., & Gupta, S. M. (2005). *Disassembly Modeling for Assembly, Maintenance, Reuse and Recycling*. Boca Raton, Florida: CRC Press. 428 p.
3. Towards a Semantic Web of Things: A Hybrid Semantic Annotation, Extraction, and Reasoning Framework for Cyber-Physical System. (2017). *Sensors*, 17(2), 403.
4. An Approach for Semantic Integration of Heterogeneous Data Sources. (2020). *PeerJ Computer Science*, 8, Art. cs-254.
5. Sequence Planning for Selective Disassembly Aiming at Reducing Energy Consumption Using a Constraints Relation Graph and Improved Ant Colony Optimization Algorithm. (2018). *Energies*, 11(8), 2106.
6. Parallel Disassembly Sequence Planning Using a Discrete Whale Optimization Algorithm for Equipment Maintenance in Hydropower Station. (2024). *Processes*, 12(7), 1412.
7. A Design Method with Knowledge Modeling for Complex Product Based on Ontology. (2013). *Journal of Software Engineering and Applications*, 6(7), 326–335.
8. OntoIMM: An Ontology for Product Intelligent Master Model. (2019). *Applied Sciences*, 9(12), 2553.
9. Research of Partial Destructive Based Selective Disassembly Sequence Planning. (2015). *Open Mechanical Engineering Journal*, 9, 605–618.

10. Research on Robotic Disassembly Sequence Planning Based on Genetic Programming. (2022). *Proceedings of the International Conference on Computer, Control and Robotics (CCCAR 2022)*. Paris: ITM Web of Conferences. Paper No. 02031.
11. An improved disassembly hybrid graph model for selective disassembly sequence planning. (2023). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 237(13), 1987–2001.
12. Design Ontology Supporting Model-based Systems-engineering Formalisms. (2020). arXiv preprint, arXiv:2010.07627. Available at: <https://arxiv.org/abs/2010.07627> (accessed: 24.05.2024).