

УДК 67.02, 004.942, 519.178

Методы искусственного интеллекта в автоматизированном проектировании процессов сборки

Божко А. Н.^{1,*}, Родионов С. В.¹

* abozhko@inbox.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Сборка изделий – это сложный политехнический процесс, в котором большая часть проектных решений принимается на основе экспертного знания. В настоящее время в исследованиях по автоматизации проектирования процессов сборки все более активно используются методы и средства искусственного интеллекта. В статье выполнен обзор наиболее значительных результатов, полученных в этой области информатики. Все методы автоматизированного проектирования разделены на две группы: методы, основанные на правилах и методы, основанные на знаниях. В методах первой группы основным аппаратом является некоторая логическая система (пропозициональная, дескрипционная и др. логика). В методах второй группы знания о конструкции и технологической системе описываются декларативными способами. Чаще всего для этих целей используются семантические сети.

Ключевые слова: сборка, автоматизация проектирования, логический вывод, семантическая сеть, геометрическая разрешимость, граф механических связей, схема сборочного состава

Введение

Сборка – это завершающий этап производственного цикла изготовления большинства изделий. Качество технологической подготовки сборочных работ решающим образом влияет на потребительские и тактико-технические свойства готового продукта (машины или прибора). Поэтому автоматизация проектирования процессов сборки сложных технических систем – одна из самых важных и сложных задач технологической подготовки современного производства.

Первые работы в этой области относятся к концу семидесятых годов прошлого века. В настоящее время данная проблема становится особенно актуальной, в связи со все более интенсивным использованием в дискретном производстве сборочных роботов и производственных систем с числовым программным управлением [Ghandi S., Masehian El. Review and taxonomies of assembly and disassembly pa].

На выбор рациональных решений в процессе сборки влияет множество противоречивых и случайных факторов (свойства конструкции, параметры технологической и про-

изводственной систем и др.), поэтому на современном уровне знаний задача синтеза рационального процесса сборки машины или прибора не может быть полностью формализована. Для ее решения целесообразно использовать подходы, основанные на экспертном опыте и технологиях искусственного интеллекта.

Все исследования по автоматизации проектирования сборочных процессов, выполненные в парадигме artificial intelligence, разделим на два класса: работы, основанные на правилах, и работы, основанные на знаниях. Эта простая классификация по основному формализму введена для удобства изложения. Понятно, что любой развитый метод автоматизированного проектирования такой сложной задачи, как синтез последовательности сборки машины или механического прибора обязан использовать средства из разных областей дискретной математики и информатики.

Методы, основанные на правилах

Сборка простых объектов в «мире кубиков» обсуждалась еще в пионерских исследованиях по искусственному интеллекту [2]. Задана исходная конфигурация сцены, состоящей из элементарных геометрических форм, в простейшем случае – одинаковых кубиков. Требуется синтезировать программу поведения робота, который сформирует некоторую целевую конфигурацию, например пирамиду или арку из кубиков. Эта классическая задача искусственного интеллекта решается методами исчисления предикатов и поиска в пространстве состояний. Одна из первых разработок в области ИИ – система STRIPS (Stanford Research Institute Problem Solver) – успешно обрабатывала сцены невысокой сложности, состоящие из десятка элементов [3].

Монография [4] – одна из первых публикаций на русском языке, где сделана попытка систематического применения логического аппарата для описания свойств изделий в процессе сборки. В работе предложен способ описания структур сложных изделий при помощи пропозициональной логики. Отношения предшествования деталей в процессе сборки, которые предопределяет конструкция изделия, записываются в виде сложных логических высказываний. Синтез последовательности сборки выполняется как вывод из заданной системы аксиом.

В [5] обсуждается метод синтеза последовательности сборки, основанный на правилах упорядочения. Основные ограничения на допустимые последовательности накладывают геометрические свойства деталей и связи между ними, ограничивающие локальные перемещения деталей в составе изделия. Исходные данные для формирования правил упорядочения извлекаются из геометрической модели изделия, записанной в формате IGES. Эти сведения формируют основное содержание базы данных. Правила вывода записываются в формате IF THEN. Они формализуют геометрические, структурные и эвристические связи, которые определяют допустимую последовательность сборки. Используется прямой метод вывода. Найденная последовательность сборки записывается в виде бинарного дерева.

В [6] предлагается метод синтеза последовательности сборки изделия, основанный на формализме дескрипционной логики (description logic). Исходные данные для формирования базы знаний и правил вывода извлекаются из трехмерной геометрической модели изделия и первоначально записываются в виде матриц контактов и перемещений. Первая хранит информацию о механических связях деталей в составе изделия, вторая – возможные перемещения деталей. По этим данным строится прикладная онтология изделия, в которой детали представляют собой первичные концепты, а контакты и допустимые перемещения – роли. Для записи сборочных ограничений вводятся дополнительные концепты и роли, например Subassembly (Подсборка), HasLeftComponent (Левый компонент), ComponentSeq (Подпоследовательность) и др. При помощи ролей и концептов записываются многочисленные правила сборки изделия из комплектующих деталей. Авторы ограничились правилами, которые задают базирование деталей в процессе установки и отсутствие геометрических препятствий при сборке. Однако, язык дескрипционной логики достаточно выразителен, он способен описать и другие конструкторские и технологические ограничения, действующие при сборке, например размерные и кинематические цепи. Правила записываются и редактируются в редакторе прикладных онтологий Protege. Для вывода допустимых последовательностей сборки используется машина вывода JESS.

Еще один формальный метод синтеза последовательности сборки, основанный на правилах и логическом выводе, предлагается в [7]. Для этого выбран аппарат темпоральной логики, которая активно применяется для верификации программ. Используется так называемая пропозициональная темпоральная логика, представляющая собой пропозициональную логику с четырьмя дополнительными темпоральными операторами: Eventually, Until, Precede, Always. Элементами допустимых сборочных последовательностей служат сборочные операции, а не детали, как в большинстве работ по автоматизации проектирования сборочных процессов. Все конструктивные и технологические ограничения на упорядоченность операций делятся на два класса: hard constraints (обязательные) и soft constraints (опциональные). Статус ограничений учитывается в процессе логического вывода допустимых сборочных планов. Система вывода реализована на языке Quintus PROLOG.

Статья [8] посвящена разработке экспертной системы KBESA (knowledge-based expert system for assembly). По замыслу авторов эта система предназначена для оценки и синтеза конструкторских решений на этапе технической подготовки производства. Качество проекта оценивается по правилам и критериям, принятым в DFA (design for assembly). Согласно этой инженерной парадигме при равенстве функциональных показателей и технических параметров лучшим будет тот вариант конструкции, который обеспечивает меньшие затраты на сборку. Для оценки проекта по этому критерию система строит последовательность сборки для каждой предложенной альтернативы. Экспертная система построена как машина логического вывода. Все знание об объекте и его окружении формализованы в форме логических аксиом. Ядро системы составляют четыре модуля: AXIOM.PRO, DEDUCT.PRO, CLASSIFY.PRO, DFA.PRO. Ограничения, которые на-

кладывает конструкция изделия на возможные последовательности сборки, представлены в модуле AXIOM.PRO. Знания о технологичности при сборке (DFA) хранятся в модуле DFA.PRO. Модули DEDUCT.PRO и CLASSIFY.PRO предназначены для реализации прямого и обратного выводов в экспертной системе.

Работа написана в то время, когда существовали завышенные ожидания по поводу возможности решения сложных практических задач строго логическими средствами. Опыт программирования на языках логического вывода (Prolog, Planner и др.) показал, что техника чистой дедукции сталкивается с несколькими трудноразрешимыми проблемами, главными из которых является обоснование полноты исходного набора утверждений и высокие затраты на доказательство, связанные с реализацией поиска с возвратом (backtracking).

Основным недостатком любых моделей синтеза сборочных планов, основанных на формализации изделия в некоторой логической системе (пропозициональной, предикативной, дескрипционной, темпоральной и др.) и поиске решений как результата логического вывода, является необходимость заново формировать систему прикладных аксиом заново для каждой новой конструкции. Логические системы, сами по себе, не имеют средств описания сходных конструкций и близких проектных ситуаций, поэтому в данной парадигме сложно организовать процедуру накопления и передачи проектных знаний.

Методы, основанные на знаниях

В [9] обсуждается генерации рациональных последовательностей сборки на основе современной технологии knowledge-based engineering (KBE) и ее реализация в системе NX. Исходными данными для синтеза допустимых проектных решений служит геометрия и механические связи изделия. На основе анализа геометрических ограничений формируется так называемый explosion graph, который представляет изделие в разобранном виде. Механические связи задаются в виде графовой модели, которую авторы называют «relational model graph». Она представляет собой граф связей, в котором различными символами помечены соединения и сопряжения. По данной информации строится диаграмма предшествования (assembly precedence diagram), которая хранит информацию о допустимых последовательностях сборки. Вершинам этой диаграммы назначаются веса, которые учитывают сложность операций и экспертные предпочтения. Для синтеза рациональной последовательности используется нейронная сеть с обратным распространением ошибки. Описанная методика реализована в среде NX при помощи языка KF (knowledge fusion) и API (application programming interface) этой системы.

Если считать все детали абсолютно жесткими и невесомыми трехмерными телами, а все соединения разборными, то последовательности сборки и разборки можно рассматривать как взаимно обратимые. В подобной проектной ситуации находится, например, инженер, который оперирует трехмерной компьютерной моделью изделия в системе автоматизированного проектирования или геометрического моделирования. В работе [10] проблема сборки рассматривается с точки зрения возможной разборки изделия. Предполага-

ется, что основные ограничения на допустимые варианты разборки – это механические связи между деталями и комплектующими. Предлагается классификация соединений и рассматриваются наиболее распространенные варианты распространения силового замыкания, которое доставляет изделию устойчивость в процессе эксплуатации и сборки. На основе предложенной классификации строится прикладная онтология соединений. Фрагмент изделия, который может быть демонтирован, должен иметь, согласно терминологии авторов, жесткие внутренние связи (rigid connection) и мягкие внешние связи (loose connection). Результаты анализа представляются в виде И – ИЛИ-графа, который описывает все возможные варианты разборки. Методика реализована в КВЕ-системе (knowledge-based engineering) ProMoD. В данной методике синтеза процессов разборки нет средств описания геометрических связей, поэтому она подходит только для изделий, у которых геометрические ограничения не играют существенной роли в процессе сборки или разборки, например любые конструкции с 2- или 2,5-мерной геометрией.

Проектирование последовательности сборки на основе формализации знаний о предметной области обсуждается в [11]. Основным носителем знаний о конструкции является семантическая сеть (она называется Directed assembly connection graph, DACG), которая описывает механические связи между деталями и пространственные ограничения, импортированные из трехмерной геометрической модели (соосность, перпендикулярность, коллинеарность и др.). Вершины сети представляют детали изделия и каждой из них сопоставлена структура данных, хранящая множество конструкторских и технологических параметров детали (геометрия, материал, вес, габариты и др.). В работе предлагается комбинированный алгоритм синтеза рациональной последовательности. Сначала синтезируется частичный порядок деталей на основе информации, которая автоматически извлекается из семантической сети DACG. Эти данные пополняются и уточняются по результатам эксперимента, который проводит эксперт в системе виртуальной реальности. Он реализует виртуальную последовательность разборки геометрической модели, а программные средства автоматически анализируют возможные столкновения перемещаемого фрагмента со статической частью конструкции. В результате описанной человеко-машинной процедуры будет сформировано множество допустимых последовательностей, из которого выбирается рациональное проектное решение по дополнительным конструкторским, технологическим или производственным критериям. Очевидным недостатком описанного подхода является большая доля ручного труда, необходимого для формирования семантической сети DACG и проведения виртуального эксперимента.

Оригинальный метод проектирования последовательности сборки предлагается в обстоятельной работе [12]. Этот метод можно считать комбинированным, поскольку в нем используется техника комбинаторного анализа и искусственного интеллекта. Для описания изделия авторы предлагают две основные модели: структурную – knowledge assembly liaison graph (KALG) и геометрическую – geometric liaison model (GLM). KALG представляет собой расширение графа связей, в котором вершины могут соединяться дугами, если между соответствующими деталями есть предпочтение по порядку сборки любой физиче-

ской природы. Геометрическая модель GLM – это сложно организованный тензор, который хранит сведения о возможных контактах и геометрических препятствиях. Элементом тензора является четверка вида $(N_a, N_b, C_{ab}, t_{ab})$, где N_a, N_b – детали, C_{ab} – вектор контактов между деталями N_a, N_b а T_{ab} – вектор перемещений между этими деталями. Каждый из векторов вида C и T содержит шесть элементов, которые описывают возможные бинарные контакты и перемещения в шести направлениях (положительном и отрицательном направлениях по всем координатным осям). Такая информация должна быть задана для всех упорядоченных пар деталей, то есть, если изделие состоит из n деталей, то GLM-модель включает в себя $n(n-1)$ записей. В работе предлагаются правила синтеза корректных последовательностей сборки. Эти правила включают в себя условия геометрической разрешимости, когерентности связей, стабильности и устойчивости собираемых фрагментов, общелогические правила (транзитивность, дистрибутивность и др.), а также любые пользовательские предпочтения по порядку следования деталей в процессе сборки. Допустимые последовательности сборки представляются в виде сети Петри. Для выбора рациональной последовательности используются оценки времени и трудоемкости операций. Метод проектирования реализован в виде экспериментальной системы, которая включает в себя систему 3D-моделирования GMODELER, генератор прикладных экспертных систем CLIPS и несколько оригинальных программных модулей, написанных на языке C/C++. Недостатком этого подхода является очень высокие затраты на подготовку геометрической модели GLM.

В [13] обсуждается современный подход к проектированию сложных технических систем, когда конструкторские и технологические задачи рассматриваются совместно в рамках единого проектного процесса. Когда речь идет о технологической подготовке сборочного производства, эта инженерная парадигма в англоязычных источниках называется *design for assembly (DFA)*. Ключевую роль в DFA играет последовательность сборки изделия. Это проектное решение выполняет функции обратной связи между конструкторской и технологической подсистемами DFA. В работе предлагается методология интеграции системы DFA из существующих программных модулей и пакетов: CAD – Pro Engineer, СУБД – Blackboard, экспертная система – CDAPFAES. Подсистемы проектирования последовательности сборки предлагается строить на основе правил логического вывода и реализовать средствами программной среды Visual Prolog. Эти правила записываются по шаблону IF THEN и формируются на основе моделей KALG и GLM (см. выше). Опыт программирования на языке Prolog показал, что решение сложных задач строго логическими средствами языка, без помощи процедурных расширений, которые предлагает система программирования (например, Visual Prolog), требует операции извлечения ответа из доказательства. Это трудоемкая и трудноформализуемая операция, требующая включения в число аргументов логических предикатов специальных функций для трассировки решения.

Метод синтеза последовательности сборки, основанный на знаниях о технической системе, рассматривается в [14] и развивается в [15]. Авторы полагают, что в общем объ-

еме промышленной продукции невелика доля оригинальных изделий, последовательность сборки которых не имеет аналогов. Они предлагают не синтезировать это проектное решение, а восстанавливать его по ранее обработанным прототипам. Авторы основываются на следующем фундаментальном предположении. Если изделия имеют сходную или одинаковую структуру, то их последовательности сборки совпадают или различаются незначительно.

Для описания структур технических объектов авторы предлагают оригинальную модель, которая называется Connection Semantics Based Assembly Relational Model (CSBARM). Она представляет собой двудольный неориентированный граф, в котором вершины одной доли описывают детали, вершины другой – так называемые коннекторы (connectors). В терминологии авторов коннекторы – это соединения и сопряжения, которые формируют механическую структуру изделия. Ребра CSBARM соединяют две вершины разных долей тогда и только тогда, когда деталь и коннектор формируют одну механическую связь. С вершинами-детальями и вершинами-коннекторами связаны структуры данных, которые хранят существенную информацию об их свойствах. Например, для коннекторов это тип: Bolt-Nut (Болтовое), Screw (Винтовое), Pin (Штифтовое), Key (Шпоночное) и др.; контактные поверхности, сборочные приспособления и инструменты и пр. Структура данных деталей включает в себя: геометрическое описание, список поверхностей, сведения о контактных поверхностях, данные о подвижности детали относительно трех координатных осей и др. Таким образом, CSBARM представляет собой семантическую сеть, вершины и ребра которой «нагружены» геометрической и функциональной информацией, необходимой для полного описания сборочных свойств изделия. На основе CSBARM технической системы формируется вспомогательный носитель – Connection Semantics Based Assembly Tree (CSBAT). Это корневое ориентированное дерево, листья которого представляют детали изделия, а внутренние узлы описывают соединения. С каждым внутренним узлом связано структура данных, которая классифицирует тип соединения и его описывает его основные свойства. CSBAT изделия строится на основе CSBARM и выполняет функции поискового образца при обращении к базе знаний (БЗ). База знаний хранит сведения о сборочных свойствах близких по структуре групп изделий, например редукторов, муфт, коробок передач и др. Эти группы представлены в БЗ типовыми CSBAT, с которыми связаны типовые последовательности сборки. Если CSBAT изделия совпадает с типовой CSBAT, то для его сборки выбирается типовая последовательность, хранящаяся в БЗ. В противном случае, для синтеза сборочной последовательности применяется процедура геометрического вывода. К очевидным недостаткам описанного подхода можно отнести прежде всего очень высокие затраты труда на наполнение базы знаний и составление CSBARM изделия. Кроме того, подход основанный на поиске прототипов и аналогов затрудняет постановку задач оптимизации и поиска рациональных решений, поскольку такие задачи подразумевают множественность альтернатив, которая отсутствует в системе организации знаний, предложенной авторами.

В [16] авторы обсуждают онтологическую систему, предназначенную для описания сборочных свойств изделия. В работе предлагается развитый формализм, который описывают многочисленные бинарные связи, существующие между сборочными единицами, деталями и их геометрическими элементами в сложной технической системе. В разработанную онтологию входят геометрические связи, свойства соединений, описание подвижности деталей, допустимые виды перемещений, технологическая информация о соединениях и многое другое. Онтология записана на языках OWL и SWRL и реализована в системе Protege. Авторы предлагают специализированную программную среду для извлечения данных из компьютерной модели изделия, записанной в формате STEP, и наполнения предложенной онтологии.

Предложенная онтология очень содержательна, она включает в себя описания множества конструктивных и технологических свойств изделия. Того объема данных, который хранится в онтологии, по всей видимости, достаточно для автоматической генерации основных проектных решений сборочного передела. К сожалению, авторы не приводят алгоритм синтеза последовательности сборки, поэтому трудно сделать вывод об общности и применимости описанного подхода.

Статья [17] – одна из немногих работ, в которых обсуждается не только методы синтеза последовательности сборки, но и проблема декомпозиции изделия на сборочные единицы. Вся исходная информация для генерации сборочных проектных решений извлекается из модели изделия, записанной на языке RAPT. Это один из диалектов языка APT, адаптированный для описания процессов сборки изделий. Авторы предлагают интеллектуальные процедуры для извлечения из RAPT-моделей тех геометрических и физических свойств, который влияют на собираемость и расчленяемость изделий. Данные о механических связях записываются в форме графа связей, который авторы называют *connectivity graph* (с-граф). Сведения о геометрических препятствиях формализуются в форме множества фактов, каждый из которых представлен в форме предиката. Например, факт о размещении детали *A* на детали *B* в направлении *V* записывается предикатом $V_ON(A,B)$. Авторы предлагают правила, которые, по их мнению, способны синтезировать рациональную последовательность сборки по множеству извлеченных из модели фактов. Разбиение изделия на сборочные единицы выполняется при помощи поиска в графе точек сочленения с последующим объединением компонент связности по эвристическим правилам. Полнота и непротиворечивость прикладной логической системы в работе не обсуждаются, а ее состоятельность подкрепляется единственным рассмотренным примером.

В [18] обсуждается выбор рациональной последовательности сборки при помощи одного из направлений недедуктивного вывода – принятия решений на основе прецедентов (Case-based reasoning). Автор считает, что проблема геометрического доступа решена и дано множество всех допустимых последовательностей сборки изделия. База данных прецедентов представляет собой совокупность изделий и связанных с ними рациональных последовательностей сборки. Новое изделие представляется в виде сложной иерархической модели, которая включает в себя описание геометрии всей конструкции и ее состав-

ных частей, граф механических связей (*liaison diagram*), схему сборочного состава (*assembly tree*), количественные свойства деталей и механических связей (*part and liaison parameters*). Выбор ближайшего (похожего) проекта из базы данных выполняется по эмпирической формуле, которая, по мнению автора, может служить адекватной оценкой расстояния в абстрактном пространстве проектов. Последовательность сборки конструкции-аналога настраивается под особенности данного изделия при помощи генетического алгоритма.

В большой работе [19] подробно описан метод проектирования последовательности сборки, основанный на использовании конструктивных и технологических знаний об изделии и производственной системе. Автор предлагает систему взаимосвязанных моделей, которые описывают свойства изделия с различной детализацией: от уровня геометрических особенностей (*geometric features*) трехмерной модели до функционального уровня технической системы. Для организации данных используется объектно-ориентированный подход, когда статическая информация отделена от методов обработки, все данные структурированы в виде иерархии классов и каждое конкретное описание принадлежит некоторому классу. Эту модель автор называет MSA (*The integrated object model for mechanical systems and assemblies*). Она записывается на языке иерархических сетей Петри. Местами в сети служат сущности иерархического описания (геометрические элементы, детали, сборочные единицы), переходами – отношения между сущностями (геометрическое положение, типы соединений, предпочтения). С каждой вершиной сети Петри связана развитая структура данных, подробно описывающая свойства данной сущности или отношения. Автор утверждает, что совокупная информация, хранящаяся в сети, достаточна для генерации рациональных проектных решений. Эта задача ставится как задача удовлетворения ограничений (*Constraint satisfaction problem, CSP* [3]). Все ограничения, который накладывает конструкция и производственная система, делятся на два класса жесткие (*hard constraints*) и мягкие (*soft constraints*). К первому классу относятся ограничения, которые не могут быть нарушены в процессе сборки, – это геометрическая разрешимость и условие когерентности сборки. Во второй класс входят разнообразные условия, выполнение которых желательно, например упорядочение деталей по массе, габаритам, точности, стоимости и др. Информация, необходимая для проверки условий, извлекается из MSA по специальным алгоритмам. Например, геометрическая разрешимость моделируется при помощи разборки изделия. В работе приводятся несколько правил, позволяющих определить возможность разъединения двух сборочных единиц без моделирования движения и проверки столкновений. Это позволяет существенно сократить трудоемкость геометрического моделирования. Необходимо отметить, что все эти правила являются необходимыми условиями разбираемости, но не достаточными. В качестве примера приведем формулировку одного из правил. Сборочная единица может быть демонтирована, если все ее детали, находящиеся в контакте с деталями дополнительной части, имеют степени свободы, необходимые для поступательного движения в выбранном направлении.

Среди всех методов синтеза последовательности сборки, основанных на парадигме экспертных систем и баз знаний, описанный подход отличается основательностью и глубиной проработки

Заключение

Геометрия деталей и структура механических связей накладывают самые жесткие ограничения на возможные последовательности сборки изделия и схемы его декомпозиции на сборочные единицы. Большинство систем автоматизированного проектирования сборочных процессов, использующих представление проектных знаний в виде фактов и правил, а синтез проектных решений – в виде дедуктивного вывода в некоторой логической системе, учитывают только условия геометрической разрешимости и механической когерентности. При этом детали рассматриваются как абсолютно жесткие и невесомые тела в трехмерном пространстве.

Этот подход отличается несколькими принципиальными недостатками. Во-первых, каждое изделие рассматривается как уникальная техническая система, для которой нужно сформировать новое прикладное исчисление в виде набора фактов и правил. Во-вторых, дедуктивный вывод в любой логической системе основан на механизме поиска с возвратом, который, в общем случае, требует больших вычислительных ресурсов. В-третьих, задача синтеза рациональных проектных решений не может быть поставлена и решена в парадигме логического вывода. Эта задача требует формализации многочисленных неконструктивных ограничений, которые продуцируются технологической и производственными системами и не учитываются в системах проектирования, основанных на правилах.

Более гибким и перспективным представляется подход, в котором для синтеза процесса сборки используются экспертные знания об изделии и технологической системе. В большинстве работ данного направления для формализации экспертного знания используются различные размеченные графы, которые, по сути дела, представляют собой семантические сети. Эти модели отличаются высокой гибкостью и выразительностью. С их помощью можно описать большинство конструктивных, технологических ограничений, влияющих на последовательность сборки и схему декомпозиции изделия на сборочные единицы.

Отметим основные недостатки данного направления. Во-первых, построение системы проектирования только на экспертных знаниях означает отказ от формализации и делает невозможным изучение общих закономерностей принятия проектных решений, характерных для данной предметной области. Во-вторых, для полноценного функционирования КВЕ-систем (knowledge-based engineering) требуется очень длительная и трудоемкая подготовка исходной информации, которая включает в себя не только описание конкретного изделия, но и знания о закономерностях принятия проектных решений в данной производственной системе, подотрасли или отрасли. В-третьих, возможности проектирования процесса сборки на основе инженерных знаний имеет очевидные пределы. Существуют проектные решения, которые невозможно получить на основе прецедентов и формализо-

ванного инженерного опыта. В качестве примера можно назвать синтез допустимых траекторий перемещения деталей при сборке изделия. Эта задача преимущественно геометрическая и решается методами планирования перемещений (motion planning), которые активно развиваются в современной роботике.

Список литературы

1. Ghandi S., Masehian El. Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches // Computer-Aided Design. 2015. Vol. 67–68. Pp. 58-86. DOI: [10.1016/j.cad.2015.05.001](https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.05.001)
2. Нильсен Н. Принципы искусственного интеллекта. М.: Радио и связь. 1985. 372 с.
3. Люгер Д.Ф. Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем. 4-е издание. М.: Вильямс, 2003. 884 с.
4. Осетров В.Г., Свитковский Ф.Ю. Логика и практика сборки машин. Ижевск: ИЖГТУ. 1996. 86 с.
5. Rabemanantsoa M., Pierre S. An artificial intelligence approach for generating assembly sequence in CAD/CAM // Artificial Intelligence in Engineering. 1996. Vol. 10. No. 2. Pp. 97-107. DOI: [10.1016/0954-1810\(95\)00018-6](https://doi.org/10.1016/0954-1810(95)00018-6)
6. Meng Y., Gu T., Chang L. Reasoning about Assembly Sequences Based on Description Logic and Rule // Intelligent Information Processing VI. 2012. Vol. 385 of the series IFIP Advances in Information and Communication Technology. Pp. 131-136. DOI: [10.1007/978-3-642-32891-6_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32891-6_18)
7. Seow K., Devanathan R. Temporal logic programming for assembly sequence planning // Artificial Intelligence in Engineering. 1993. Vol. 8. No. 4. Pp. 253- 263. DOI: [10.1016/0954-1810\(93\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0954-1810(93)90008-4)
8. Jung J., Billatos S. An expert system for assembly based on axiomatic design principles // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 1993. Vol. 8. No. 2. Pp. 245-265. DOI: [10.1007/BF01257997](https://doi.org/10.1007/BF01257997)
9. Hsu Y., Tai P., Wang M. A knowledge-based engineering system for assembly sequence planning // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 55. No. 5. Pp. 763-782. DOI: [10.1007/s00170-010-3093-5](https://doi.org/10.1007/s00170-010-3093-5)
10. Borst P., Akkerman H. An Ontology approach to product disassembly // Knowledge Acquisition, Modeling and Management. 1997. Vol. 1319 of the series Lecture Notes in Computer Science. Pp. 33-48. DOI: [10.1007/BFb0026776](https://doi.org/10.1007/BFb0026776)
11. Wu M., Prabhu V., Li X. Knowledge-based approach to assembly sequence planning // Journal of Algorithms & Computational Technology. 2011. Vol. 5. No. 1. Pp. 57-70. DOI: [10.1260/1748-3018.5.1.57](https://doi.org/10.1260/1748-3018.5.1.57)
12. Zha X., Lim S., Fok S. Integrated Knowledge-Based Assembly Sequence Planning // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1998. Vol. 14. No. 1. Pp. 50-64. DOI: [10.1007/BF01179417](https://doi.org/10.1007/BF01179417)

13. Zha X., Lim S., Fok S. Development of expert system for concurrent product design and planning for assembly // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1999. Vol. 15. No. 3. Pp. 153-162. DOI: [10.1007/s001700050052](https://doi.org/10.1007/s001700050052)
14. Dong T., Tong R., Zhang L., Dong J. A collaborative approach to assembly sequence planning // Advanced Engineering Informatics. 2005. Vol. 19. No. 2. Pp. 155-168. DOI: [10.1016/j.aei.2005.05.008](https://doi.org/10.1016/j.aei.2005.05.008)
15. Dong T., Tong R., Zhang L., Dong J. A knowledge-based approach to assembly sequence planning // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 32. No. 11. Pp 1232-1244. DOI: [10.1007/s00170-006-0438-1](https://doi.org/10.1007/s00170-006-0438-1)
16. Kim K-Y., Manley D., Yang H. Ontology-based assembly design and information sharing for collaborative product development // Computer-Aided Design. 2006. Vol. 38. No. 12. Pp. 1233-1250. DOI: [10.1016/j.cad.2006.08.004](https://doi.org/10.1016/j.cad.2006.08.004)
17. Deshmukh A., Yung P., Wang H-P. Automated generation of assembly sequence based on geometric and functional reasoning // Journal of Intelligent Manufacturing. 1993. Vol 4. No. 4. Pp. 269-284. DOI: [10.1007/BF00124140](https://doi.org/10.1007/BF00124140)
18. Su Q. Applying case-based reasoning in assembly sequence planning // International Journal of Production Research. 2007. Vol. 45. No. 1. Pp. 29- 47. DOI: [10.1080/00207540600632182](https://doi.org/10.1080/00207540600632182)
19. Zha X. Knowledge based systems techniques in the integration generation and visualization of assembly sequences in manufacturing systems. Computer Aided and Integrated Manufacturing Systems. Vol. 2: Intelligent Systems Technologies. 2003. Pp. 1-75. DOI: [10.1142/9789812796783_0001](https://doi.org/10.1142/9789812796783_0001)

Artificial Intelligence Methods in Computer Aided Design of Assembly Processes

A.N. Bojko^{1,*}, S.V. Rodionov¹

[*abozhko@inbox.ru](mailto:abozhko@inbox.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: assembly, computer aided design, inference, semantic network, geometric obstacles, liaison diagram, assembly tree

Assembly work is a complex polytechnic process in which most of design decisions are based on the expert knowledge. Currently, to study the computer-aided design (CAD) of the assembly processes the artificial intelligence methods and tools find the ever-increasing use. The article gives an overview of the most significant results obtained in this field of computer science. All CAD methods are divided into two groups: methods based on rules and knowledge-based ones. In the first group the structure-technological properties of the product (machine or device) are described as the axioms of a formal logical system (prepositional, descriptive, etc.). The assembly procedure is derived from a given system of axioms according to rules of selected logics. The second group of methods is based on formalization of expert knowledge about the product to be assembled and the process system. Most often to describe this knowledge are used all sorts of marked graphs, which are, essentially, semantic networks, describing the conceptual structure of the subject area (product assembly). A semantic network language feature is high expression capabilities. It can be used to describe any structural links and relationships that affect the assembly procedure. On the other hand, semantic networks are poorly standardized and have no a universal output mechanism. Therefore, design decisions cannot be extracted from the standard procedure of proof or disproof of a goal statement, as it is done in the rule-based systems. For the synthesis of design solutions should be developed an algorithm, which takes into account the semantic network specifics.

References

1. Ghandi S., Masehian El. Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches. *Computer-Aided Design*, 2015, vol. 67–68, pp. 58-86. DOI: [10.1016/j.cad.2015.05.001](https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.05.001)
2. Nil'sen N. *Printsipy iskusstvennogo intellekta* [Artificial intelligence principles]. Moscow, Radio i svyaz' Publ. 1985. 372 p. (in Russian).

3. Lyuger D.F. *Iskusstvennyy intellekt. Strategii i metody resheniya slozhnykh problem* [Artificial intelligence. Strategies and methods for solving complex problems]. Moscow, Vil'yams Publ., 2003. 884 p. (in Russian).
4. Osetrov V.G., Svitkovskiy F.Yu. *Logika i praktika sborki mashin* [Logic and practice of machine assembling]. Izhevsk: IzhGTU, 1996. 86 p.
5. Rabemanantsoa M., Pierre S. An artificial intelligence approach for generating assembly sequence in CAD/CAM. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1996, vol. 10, no. 2, pp. 97-107. DOI: [10.1016/0954-1810\(95\)00018-6](https://doi.org/10.1016/0954-1810(95)00018-6)
6. Meng Y., Gu T., Chang L. Reasoning about Assembly Sequences Based on Description Logic and Rule. *Intelligent Information Processing VI*, 2012, vol. 385 of the series IFIP Advances in Information and Communication Technology, pp. 131-136. DOI: [10.1007/978-3-642-32891-6_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32891-6_18)
7. Seow K., Devanathan R. Temporal logic programming for assembly sequence planning. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1993, vol. 8, no. 4, pp. 253- 263. DOI: [10.1016/0954-1810\(93\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0954-1810(93)90008-4)
8. Jung J., Billatos S. An expert system for assembly based on axiomatic design principles. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1993, vol. 8, no. 2, pp. 245-265. DOI: [10.1007/BF01257997](https://doi.org/10.1007/BF01257997)
9. Hsu Y., Tai P., Wang M. A knowledge-based engineering system for assembly sequence planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 55, no. 5, pp. 763-782. DOI: [10.1007/s00170-010-3093-5](https://doi.org/10.1007/s00170-010-3093-5)
10. Borst P., Akkerman H. An Ontology approach to product disassembly. *Knowledge Acquisition, Modeling and Management*, 1997, vol. 1319 of the series Lecture Notes in Computer Science, pp. 33-48. DOI: [10.1007/BFb0026776](https://doi.org/10.1007/BFb0026776)
11. Wu M., Prabhu V., Li X. Knowledge-based approach to assembly sequence planning. *Journal of Algorithms & Computational Technology*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 57-70. DOI: [10.1260/1748-3018.5.1.57](https://doi.org/10.1260/1748-3018.5.1.57)
12. Zha X., Lim S., Fok S. Integrated Knowledge-Based Assembly Sequence Planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1998, vol. 14, no. 1, pp. 50-64. DOI: [10.1007/BF01179417](https://doi.org/10.1007/BF01179417)
13. Zha X., Lim S., Fok S. Development of expert system for concurrent product design and planning for assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1999, vol. 15, no. 3, pp. 153-162. DOI: [10.1007/s001700050052](https://doi.org/10.1007/s001700050052)
14. Dong T., Tong R., Zhang L., Dong J. A collaborative approach to assembly sequence planning. *Advanced Engineering Informatics*, 2005, vol. 19, no. 2, pp. 155-168. DOI: [10.1016/j.aei.2005.05.008](https://doi.org/10.1016/j.aei.2005.05.008)
15. Dong T., Tong R., Zhang L., Dong J. A knowledge-based approach to assembly sequence planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 32, no. 11, pp. 1232-1244. DOI: [10.1007/s00170-006-0438-1](https://doi.org/10.1007/s00170-006-0438-1)

16. Kim K-Y., Manley D., Yang H. Ontology-based assembly design and information sharing for collaborative product development. *Computer-Aided Design*, 2006, vol. 38, no. 12, pp. 1233-1250. DOI: [10.1016/j.cad.2006.08.004](https://doi.org/10.1016/j.cad.2006.08.004)
17. Deshmukh A., Yung P., Wang H-P. Automated generation of assembly sequence based on geometric and functional reasoning *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1993, vol. 4, no. 4, pp. 269-284. DOI: [10.1007/BF00124140](https://doi.org/10.1007/BF00124140)
18. Su Q. Applying case-based reasoning in assembly sequence planning. *International Journal of Production Research*, 2007, vol. 45, no. 1, pp. 29- 47. DOI: [10.1080/00207540600632182](https://doi.org/10.1080/00207540600632182)
19. Zha X. *Knowledge based systems techniques in the integration generation and visualization of assembly sequences in manufacturing systems. Computer Aided and Integrated Manufacturing Systems. Vol. 2: Intelligent Systems Technologies.* 2003. Pp. 1-75. DOI: [10.1142/9789812796783_0001](https://doi.org/10.1142/9789812796783_0001)