

Математические методы при проектировании автономного средства автоматизации работы производственного помещения

Д. М. Клионский, В. В. Чернокульский, Н. В. Размочаева¹

Факультет компьютерных технологий и информатики
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
¹razmn@mail.ru

Аннотация. Проводится сравнительный анализ различных математических методов, применяемых при проектировании специализированных автономных средств автоматизации процессов транспортировки в работе производственных помещений. Продемонстрированы преимущества использования машинного обучения. Акцентируется внимание на особенностях применения машинного обучения при проектировании автономных транспортных средств. Приводятся примеры методов оценки эффективности (точности) результатов машинного обучения. Рассматривается практический пример, по результатам которого можно говорить об эффективности и целесообразности использования машинного обучения для автоматизации работы производственного помещения.

Ключевые слова: математические методы; проектирование; автономные средства; автоматизация; автоматизация производства; машинное обучение; эффективность; точность

I. ВВЕДЕНИЕ

Сравнительно недавно в повседневную жизнь человека стали внедряться различные «умные» инструменты. Например, интеллектуальные системы работают в смартфонах и могут давать советы, например, при планировании маршрутов. Что говорить об отдельно взятом человеке, если обучаемые программно-аппаратные системы давно используются в промышленности. В программном коде сложных производственных установок реализованы инструменты интеллектуального анализа для дополнительно контроля технологического процесса и предотвращения внештатных чрезвычайных ситуаций. Но, несмотря на широкую распространенность использования, такими решениями занимаются единичные компании. Уровень экспертизы таких компаний достаточно высок, поэтому стоимость разрабатываемых ими инструментов непозволительно велика.

Математический аппарат, используемый в интеллектуальных системах, иерархически усложнялся с увеличением сложности систем. В настоящее время, накопив достаточно информации об интеллектуальных системах, можно смотреть на математические методы «от

общего к частному». Представленные на рынке высокотехнологичных ИТ-решений сложные «умные» системы могут дать толчок для решения локальных задач. Однако, все тонкости реализации, конечно, тщательно скрываются и иногда представляют собой коммерческую тайну.

Особого внимания заслуживает на первый взгляд простая задача проектирования автономных средств. К таким средствам могут относиться вышеупомянутые производственные машины, конвейерные производственные линии, средства мониторинга процессов (технологических, биологических, экономических и др.). Большое количество разработок ведется в области автономной робототехники. Геометрические размеры роботов варьируются от единиц сантиметров до сотен сантиметров.

Наибольшую популярность получили автономные средства передвижения (транспортные средства или средства транспортировки). Так, например, автономные легковые автомобили уже используются для перевозки людей. При перевозке людей обеспечивается достаточный уровень безопасности. Но пользователями таких автомобилей могут стать только единицы.

Что же касается промышленности и сферы производства, то тут автономность присутствует не только в технологических установках, но еще и в процессе транспортировки особых грузов. Большую роль играет транспортировка двух видов:

- на территории производственного помещения, будь то склад, цех и т.д.
- между вышеуказанными помещениями: между складами, между складами и цехами и т.д.

В качестве груза может выступать как отдельно взятые детали, так и целые стеллажи. Нюансом при решении такого рода задач выступает выбор алгоритмических, программных и аппаратных средств реализации.

В следующих разделах постараемся ответить на вопрос: «Какие задачи вообще рассматриваются?»

II. КЛАССИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ

Начальнику производственного участка передается (или составляется с его непосредственным участием) дневной план производства. План в обязательном порядке разрабатывается на базе какой-либо системы планирования ресурсов предприятия (*ERP* – англ. *Enterprise Resource Planning*). Системы *ERP* уже давно применяются на многих предприятиях и позволяют обеспечить ресурсами все процессы предприятия, например:

- административные;
- экономические;
- работу с поставщиками
- и управление человеческими ресурсами.

Далее дневной план разделяется на исполнителей по производственному участку. Для каждого работника формируется его индивидуальная норма.

Для реализации установленной нормы работнику, в общем случае, требуется расходный материал, комплектующие или сырье (зависит от вида производства). В большинстве случаев для получения необходимого количества расходных материалов либо сам работник получал их, либо специальные люди занимались доставкой сырья до рабочего места.

Использование автономного средства доставки расходных материалов приведет к полезному эффекту (например, [1]):

- сокращению времени транспортировки и подготовки к работе;
- увеличение объема выполненной работы;
- минимизация человеческого фактора.

Какие математические инструменты нужны для решения такой задачи?

- методы оптимизации.

В отношении планирования ресурсов методы оптимизации, в основном, заложены в *ERP*-систему. Что касается планирования траекторий перемещения автономных средств, то методы оптимизации реализуются в логистике.

Большую роль играют методы многоцелевой оптимизации [2], когда необходимо искать компромиссы между несколькими целями. Например, между сложностью модели и точностью, чувствительностью и спецификой.

- методы теории массового обслуживания для планирования обеспечения ресурсами сразу нескольких работников и планирования обработки нескольких автономных транспортировщиков.

III. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОНОМНОГО СРЕДСТВА

Автономные средства различной сложности требуют не только продуманных технических решений, но и соответствующего программного обеспечения. И очень часто разработчики стараются уменьшить себестоимость устройств, экономя на техническом обеспечении.

Преследуя цель сэкономить на техническом обеспечении, приходится решать сложные задачи подбора комплектной базы. Иногда, чем проще кажется техническое решение, тем сложнее на самом деле программное обеспечение.

При проектировании автономного средства приходится решать ряд специфических проблем разработки программного обеспечения. Далее приведен перечень только некоторых из них:

- Навигация внутри помещения, например, при отсутствии сигналов GPRS, ГЛОНАСС.
- Одновременная локализация и построение карты, так называемые, *SLAM*-задачи. *SLAM* от англ. *Simultaneous Localization and Mapping* – метод, используемый в мобильных автономных средствах для построения карты в неизвестном пространстве или для обновления карты в заранее известном пространстве с одновременным контролем текущего местоположения и пройденного пути. Популярны методы приближенного решения данной задачи включают в себя фильтр частиц и расширенный фильтр Калмана.
- Реакция на препятствия.

Будем разделять препятствия на два вида: статические и динамические. Статические – те, что уже учтены при построении карты, динамические – те, что нужно анализировать в режиме реального времени. Для описания реакции на препятствия в большинстве случаев используются методы машинного обучения.

Для анализа динамических препятствий недостаточно иметь достаточно чувствительные датчики. Датчики позволяют только вовремя фиксировать появление препятствия. Необходимо провести анализ возникшего препятствия. Анализ может быть направлен на классификацию препятствия. Для однозначной классификации необходимо иметь информацию о существующих классах объектов в помещении. База объектов должна быть актуальной и вовремя обновляться.

При классификации препятствий можно использовать искусственные нейронные сети, выдающие на выходе вероятностное распределение. Вероятности на выходе сети будут значить вероятность принадлежности к тому или иному классу объектов. Применения классифицирующих нейронных сетей может оказаться недостаточно. Например, полученная вероятность принадлежности к какому-то классу объектов составляет 65%. Для отдельных производств такая вероятность может быть причиной недостаточного уровня доверия к результату.

Уточнять сомнительные результаты можно посредством контекстного анализа помещения с учетом свойств объектов. При этом обязательным условием является наличие априорной информации, как объекты взаимосвязаны друг с другом. Априорную информацию можно представлять в матричном виде, где столбцы и строки – объекты, а на пересечении – характеристики связи объектов. Такую информацию удобнее всего держать в базе объектов вместе с описанием свойств объектов.

Контекстный анализ может быть реализован как на базе нейронных сетей, так и на базе методов и моделей нечеткой логики. При разработке алгоритмов контекстного анализа необходимо консультироваться с экспертной группой. Эксперты помогут сформировать правильное представление об объектах производственного помещения.

Следует отменить важный момент: особую опасность для автономного транспортировщика представляют сыпучие препятствия. Насколько точными должны быть датчики, чтобы достоверно определить радиус опасности в зависимости от сыпучего материала – открытый вопрос.

Состояние окружающих объектов, их геометрические параметры и другие сведения могут быть скорректированы и актуализированы с использованием данных нескольких датчиков. Алгоритмы слияния данных от различных датчиков – задача на отдельное рассмотрение.

Более того, для успешного внедрения автономного транспорта на территории производственного помещения, требуется:

1. Разработать и внедрить унифицированные стеллажи.
2. Разработать систему контрольных точек. Здесь важно определить возможность нанесения визуальных маркеров или установки радио или *RFID*-меток в помещении.
3. Внедрить систему контрольных точек.
4. Выделить помещение или рабочее время для апробации тестового образца. И др.

IV. АВТОНОМНАЯ ТРАНСПОРТИРОВКА НА ПРИМЕРЕ КОМПАНИИ AMAZON ROBOTICS

Для описания разработок компании *Amazon Robotics* введем общепринятые понятия. Автоматически управляемое транспортное средство (АУТС, англ. *Automated Guided Vehicle – AGV*) – автоматически управляемое устройство (мобильный робот), применяемый в промышленности для перемещения грузов, товаров и материалов в производственном процессе или в складском хозяйстве [3]. Устройство оснащается системой, позволяющей ориентироваться в пространстве. Такие роботы могут применяться в медицинских учреждениях для обслуживания больных с ограниченной подвижностью.

Компания *Amazon* с 2003 года занимается разработкой роботизированных складских помещений. Был разработан

принципиально новый по сравнению с конвейерами и погрузчиками подход.

Помимо уже упомянутой *ERP* системы, компания использует современную *WMS* систему (англ. *Warehouse Management System*) собственной разработки [19]. На основе обозначенных выше систем строится гибкая производственная система (англ. *FMS – Flexible Manufacturing Systems*) [5], [6].

А. Содержательное описание решения

Единицы хранения (сырье, комплектующие и пр.) находятся в специальных модулях хранения. У каждого модуля хранения есть идентификационный маркер.

Ставится задача доставки определенного модуля в заданное место. Запрос на транспортировку направляется в базу данных системы. Программа находит ближайшего транспортировщика и направляет его к модулю хранения.

С помощью специальных визуальных маркеров, нанесенных на полу склада, устройства могут ориентироваться и перемещаться. Столкновения роботов исключаются при помощи специальных датчиков и программных алгоритмов.

По достижении модуля хранения, робот располагается определенным образом под модулем и поднимает в транспортное положение. Затем модуль перемещается в заранее назначенное место для дальнейшей обработки.

При каждом обслуживании, можно сделать следующие выводы:

В. Некоторые используемые математические методы

В программном коде автономных транспортировщиков используются такие алгоритмы идентификации модулей хранения [7], как, например, метод главных компонент (англ. *PCA – Principal Component Analysis*) и метод опорных векторов (англ. *SVM – Support Vector Machine*).

В качестве алгоритмов маршрутизации применяется *Q*-обучение (*Q-learning* – метод машинного обучения с подкреплением в условиях неопределенности окружающей среды) [8], [9]. Основная решаемая задача – прокладывание кратчайших маршрутов. В работах [8], [9] маршрут определяется как кратчайший на основании количества времени передвижения и количества времени ожидания автономного устройства.

Если рассматривать кратчайший маршрут как расстояния, то можно использовать специализированную процедуру решения задачи методом ветвей и границ [10]. Метод используется для сведения к минимуму общего расстояния, пройденного транспортными средствами в соответствии с ограничениями (в предположении, что результирующая сеть состоит из одного сильно связанного компонента).

Техническим системам свойственно отказывать в неподходящий момент. Но даже в нештатных ситуациях должна быть сохранена способность автоматизированной системы работать соответствующим образом. Для

предотвращения чрезвычайных ситуаций должны действовать меры оперативного контроля. Для таких целей используют экспертные системы на базе эвристических правил вывода [11], [12].

Важная задача – определение поведения отдельного взятого устройства в потоке с другими устройствами [13]. Другие важные задачи, такие как проектирование направляющих путей, определение требований к транспортным средствам, позиционирование в режиме ожидания, управление батареей и разрешение тупиковой ситуации рассмотрены в работе [14].

Достаточно эффективно использовать сразу несколько математических методов. Например, методы распознавания образов, построение экспертных систем, искусственных нейронных сетей, нечетких систем и современных гибридных методов искусственного интеллекта (AI) в [15] рассматриваются как последовательные элементы производственного процесса.

Подробное описание теории АУТС можно найти в книге [16][1].

Вопросы точности позиционирования робота рассматриваются в работе [17]. Где говорится о высоком уровне точности устройства при достаточном уровне автономности. Автономность достигается за счет внедрения модулей прогнозирования, восприятия окружающей среды, планирования пути и дополнительного отслеживания собственного пути. Одновременно с этим уменьшается объем ручной работы, требуемой при установлении априорных знаний об окружающей среде.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано современное состояние вопроса. Определена актуальность разработки автономных средств транспортировки производственных объектов. Проведен тщательный обзор предметной области. Рассмотрены основные точки зрения на задачу проектирования.

Предложены различные математические методы, применяемые при проектировании специализированных автономных средств. Акцентируется особое внимание на применимости AGV-средств для автоматизации процессов транспортировки в работе производственных помещений. Продемонстрированы основные преимущества использования машинного обучения. Предложены средства уточнения результатов интеллектуального анализа окружающих объектов. Отмечается, что при разработке базы объектов нужно вести активную работу с экспертами предметной области.

Рассмотрен пример передового использования автономных транспортировщиков для автоматизации склада. По результатам рассмотрения примера можно говорить об эффективности и целесообразности использования машинного обучения для автоматизации работы производственного помещения.

Другие обзоры на проектирование автономных устройств для автоматизации производственных помещений можно найти в [18], [14].

Следует отметить, что не только рассмотренный в работе проект компании *Amazon* известен миру. Аналогичный проект представлен в работе [19].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] BARTHOLDI III J.J., Platzman L.K. Decentralized control of automated guided vehicles on a simple loop // IIE transactions. 1989. Т. 21. №. 1. С. 76-81.
- [2] Jin Y. (ed.). Multi-objective machine learning. Springer Science & Business Media, 2006. Т. 16.
- [3] Ganesharajah T., Hall N. G., Sriskandarajah C. Design and operational issues in AGV-served manufacturing systems // Annals of Operations Research. 1998. Т. 76. С. 109-154.
- [4] Jun-tao Li, Hong-jian Liu. Design Optimization of Amazon Robotics // Automation, Control and Intelligent Systems 2016. Т. 4(2). С. 48-52.
- [5] Bozer Y. A., Srinivasan M. M. Tandem configurations for automated guided vehicle systems and the analysis of single vehicle loops // IIE transactions. 1991. Т. 23. №. 1. С. 72-82.
- [6] Sabuncuoglu I., Hommertzhaim D. L. Dynamic dispatching algorithm for scheduling machines and automated guided vehicles in a flexible manufacturing system // The International Journal Of Production Research. 1992. Т. 30. №. 5. С. 1059-1079.
- [7] Fuji T., Kimura N., Ito K. Architecture for recognizing stacked box objects for automated warehousing robot system // IRISH MACHINE VISION & IMAGE PROCESSING Conference proceedings 2015. 2015. С. 51-58.
- [8] Lim J. K. et al. A construction algorithm for designing guide paths of automated guided vehicle systems // International Journal of Production Research. 2002. Т. 40. №. 15. С. 3981-3994.
- [9] Jeon S. M., Kim K. H., Kopfer H. Routing automated guided vehicles in container terminals through the Q-learning technique // Logistics Research. 2011. Т. 3. №. 1. С. 19-27.
- [10] Venkataramanan M. A., Wilson K. A. A branch-and-bound algorithm for flow-path design of automated guided vehicle systems // Naval Research Logistics (NRL). 1991. Т. 38. №. 3. С. 431-445.
- [11] Egbelu P. J. The use of non-simulation approaches in estimating vehicle requirements in an automated guided vehicle based transport system // Material flow. 1987. Т. 4. №. 1. С. 17-32.
- [12] Egbelu P. J., Tanchoco J. M. A. Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules // The International Journal of Production Research. 1984. Т. 22. №. 3. С. 359-374.
- [13] Gaskins R. J., Tanchoco J. M. A. Flow path design for automated guided vehicle systems // International Journal of Production Research. 1987. Т. 25. №. 5. С. 667-676.
- [14] Le-Anh T., De Koster M. B. M. A review of design and control of automated guided vehicle systems // European Journal of Operational Research. 2006. Т. 171. №. 1. С. 1-23.
- [15] Monostori L. AI and machine learning techniques for managing complexity, changes and uncertainties in manufacturing // Engineering applications of artificial intelligence. 2003. Т. 16. №. 4. С. 277-291.
- [16] Muller T. Automated guided vehicles. Kempston, UK : IFS, 1983.
- [17] Martínez-Barberá H., Herrero-Pérez D. Autonomous navigation of an automated guided vehicle in industrial environments // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2010. Т. 26. №. 4. С. 296-311.
- [18] Vis I. F. A. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems // European Journal of Operational Research. 2006. Т. 170. №. 3. С. 677-709.
- [19] Cameron S., Probert P. Advanced Guided Vehicles: Aspects of the Oxford AGV project. World Scientific, 1994. Т. 9. 267 С.