

УДК 004.896

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА-ВОДИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ФОРМАЛЬНОЙ ГРАММАТИКИ

П.С. Сорокоумов (*petr.sorokoumov@gmail.com*)
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Аннотация. Разработка роботов, способных действовать совместно с людьми в одной среде, является весьма важной и актуальной задачей. Помимо прочего такие роботы должны работать с созданными для человека средствами ручного управления: кнопками, рукоятками, рулевыми колёсами и т.п. Сейчас манипуляции с ними для роботов весьма сложны, потому что контроль движений конечностей и органы захвата устроены у них иначе, чем у людей, поэтому большую важность приобретают средства, которые позволяют адекватно описать такие задачи и применять полученные описания для разработки эффективных систем управления движениями. В данной работе предлагается подход к описанию таких манипуляций с помощью формальной грамматики. Её нетерминальными символами являются двигательные задачи для конечностей робота, а терминальными - их геометрически примитивные участки. Таким образом, грамматика описывает специфику работы со средством управления без привязки к конкретной модели робота. Составленное описание позволяет разделить задачу на последовательные компоненты, которые позволяют воспроизвести нужную траекторию. Движение при этом не сводится к копированию заложенных образцов, а корректируется на каждом этапе для эффективного достижения поставленной цели. Благодаря тому, что количество разных типов требуемых для манипулирования движений невелико, описание носит достаточно универсальный характер. Предложенный метод была использован для моделирования движений антропоморфного робота-водителя, потенциально способного работать со средствами управления обычного, не подготавливаемого специально автомобиля¹.

Ключевые слова: робот-водитель, управление манипулятором, формальная грамматика.

¹ Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ №1601 от 05.07.2018г.)

1 Введение

В лаборатории робототехники НБИКС ПТ НИЦ «Курчатовский институт» в настоящее время ведётся работа по созданию робота, способного управлять автомобилем. Основными отличиями целей данного проекта от других многочисленных разрабатываемых систем роботизации автотранспорта являются:

- необходимость работы в немодифицированном автомобиле: робот должен располагаться на стандартном рабочем месте водителя-человека без существенных технических модификаций;
- требования к универсальности полученных решений: как математические, так и технические компоненты систем должны не просто обеспечивать работу водителя в её узком понимании, но обобщаться на более широкий класс задач – взаимодействие роботов с окружением, созданным для людей, и успешное их функционирование в этом окружении.

Основной акцент при разработке делается на ручном управлении автомобилем под руководством внешней системы, самостоятельно решающей задачи прокладки маршрута, анализа дорожной обстановки и выбора необходимых действий водителя.

В ручном управлении автомобилем с помощью робота можно выделить несколько подзадач. Сначала робот, помещённый в кабину, распознаёт элементы управления автомобилем по сенсорным данным и определяет их положение в пространстве. Далее он должен манипулировать органами управления, решая поставленные задачи. В процессе работы возможна потеря сенсорного контакта с органами управления, требующая повторного (частичного) распознавания окружения. Из трёх перечисленных подзадач (первоначальное ориентирование, выполнение манипуляций, дополнительное ориентирование) решение первой и третьей для нескольких характерных типов органов управления было описано ранее [Сорокоумов, 2017]. В контексте данной работы они считаются решёнными с приемлемой точностью.

Современным роботам пока сложно манипулировать органами управления, созданными для человека. В работе водителя имеются некоторые дополнительные факторы, облегчающие роботизацию: робот не должен поддерживать равновесие, потому что он при вождении сидит; количество типов органов управления невелико; ожидаемые реакции от них стандартны. Могут усложнить манипулирование внешние воздействия (тряска, инерциальные эффекты).

Для тестирования разработок используется стенд, состоящий из антропоморфного робота REEM-C и макета рабочего места водителя (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид макета рабочего места водителя с антропоморфным роботом REEM-C

2 Материалы и методы

2.1 Специфика задачи манипулирования органами ручного управления

Для перемещения органов ручного управления манипуляторами робота по заданной траектории можно использовать давно и хорошо известные методы решения задачи обратной кинематики, входящие в состав стандартных программных пакетов для работы с роботами, например, MoveIt в ROS. Однако поставленную задачу надо сначала свести к задаче обратной кинематики. Это преобразование осложняется множеством факторов:

- некоторые движения можно выполнить только одной конечностью (переключение передач выполняется правой рукой), другие – несколькими разными, некоторые – несколькими, действующими одновременно (движение рулевого колеса можно выполнять двумя руками, можно – одной);
- необходимо обеспечивать своевременный захват рукояток и их отпускание, причём для разных органов управления тип захвата будет различаться;

- движения должны иногда выполняться одновременно; часто при этом требуется синхронизация.

Исходя из изложенных факторов, понятно, что нахождение общей концептуальной основы для представления движений, позволяющей выработать решение с учётом этих факторов, весьма интересно.

2.2 Формальная грамматика как форма описания элементов управления

Целесообразным представляется найти описание органов ручного управления техническими системами, которое достаточно хорошо подходило бы для работы с ними автоматических систем манипулирования. Так как траектории движения рук при действиях достаточно просты, то можно попытаться описать их в виде набора геометрических примитивов.

Давно известно, что описание контура можно выполнить в виде формального языка, имеющего в качестве терминалов примитивные геометрические элементы контуров [Fu, 1974]. Если описать движения какого-либо органа управления таким образом и добавить терминальные символы, отвечающие за прочие действия с органом управления (захват, перехват, отпускание), то можно получить единый способ представления действий, пригодный для их трансляции в движения робота. Решения подобного рода предлагались неоднократно: например, в [Bidgoli et al, 2014] предлагается использование такого представления в манипуляторе-раскройщике материала. Для рассматриваемой задачи этот метод имеет важное преимущество: так как количество разных типов органов управления невелико, то можно построить описание небольшого размера, способное решить широкий спектр задач.

Общая архитектура предлагаемого решения представлена на рис. 2. От блока постановки задач на синтаксическую обработку поступают команды, воспринимаемые как нетерминальные символы некоторой грамматики, для которых требуется получить представление в виде последовательности терминалов. Полученные терминалы интерпретируются как команды манипуляторам робота и исполняются. При этом исполнение операций должно корректироваться сенсорными данными прозрачно для синтаксического блока.

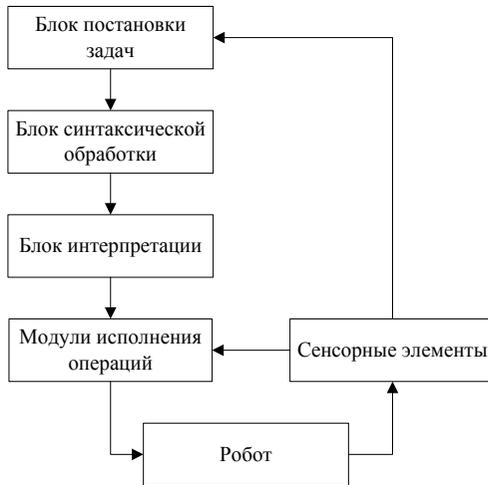


Рис. 2. Общая архитектура системы управления движением робота

2.3 Пример описания органа управления

Для описания работы с некоторыми типичными органами управления автомобилем можно использовать наборы терминальных символов (элементарных движений), показанные на рис. 3. Стрелке соответствует один терминальный символ, точке – два: захват, интерпретируемый как создание устойчивого контакта манипулятора и органа, и отпускание, интерпретируемое как отстранение манипулятора с разрушением контакта. Имена соответствующих точек терминальных символов получаются из их названий присписыванием обозначений G (grab) или R (release).

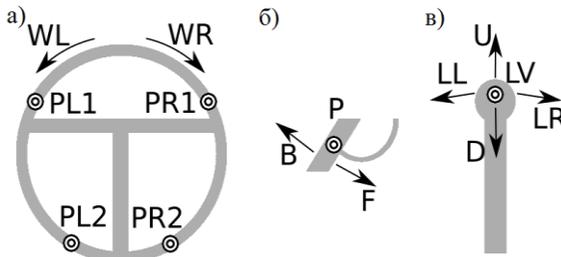


Рис. 3. Символы, требуемые для описания некоторых элементов ручного управления: а – рулевого колеса, б – педали, в – рычага.

Например, рулевое колесо (рис. 3а) управляется путём захвата либо отпускания точек из выделенного набора, включающего в примере две

точки для каждой руки P(L|R)(1|2). Поворот руля осуществляется примитивами движения конечности по дуге на единое жёстко заданное значение WR и WL. Таким образом, набор терминальных символов для рулевого колеса состоит из 10 элементов (два движения WL и WR, выполняемые каждой из двух рук, а также захват и отпускание каждой из четырёх точек). В роли команд выступают четыре нетерминала: ToLeft и ToRight, соответствующие повороту руля направо и налево на заданный угол, Break, прекращающий поворот руля, и Finish, завершающий работу робота с рулём. В таком случае простейший вариант контекстно-свободной грамматики, позволяющей описывать манипуляции с рулём, имеет следующий вид (терминальные символы выделены полужирным шрифтом):

S → Finish | GrabL ManipulateL ReleaseL S | Grab Manipulate Release S
 ManipulateL → MoveL | MoveL ManipulateL | MoveL ReleaseL GrabL
 ManipulateL
 Manipulate → Move | Move Manipulate | Move Release Grab Manipulate
 Move → Break | ToLeft **LWL RWL** Move | ToRight **LWR RWR** Move
 MoveL → Break | ToLeft **LWL** MoveL | ToRight **LWR** MoveL
 Grab → GrabL GrabR
 GrabL → **PL1 | PL2**
 GrabR → **PR1 | PR2**
 Release → ReleaseL ReleaseR
 ReleaseL → **LR** # для отпускания руля каждой рукой
 ReleaseR → **RR** # требуется одна команда
 Break → **BRK**
 ToLeft → ∅
 ToRight → ∅
 Finish → **FIN**

В показанной версии грамматики учтено, что водитель может поворачивать руль как двумя руками, так и одной левой рукой. Команды при этом порождаются символами Manipulate или ManipulateL соответственно. Терминальные команды движения, предназначенные для правой либо левой руки, различаются первой буквой названия – R или L.

Данная грамматика позволяет получить любую корректную последовательность действий с рулевым колесом. При анализе полученных из центра управления нетерминальных символов модуль синтаксического анализа выбирает, какая строка терминалов должна быть порождена. Контекст исполнения при этом обрабатывается модулем исполнения операций, который по сведениям о геометрии системы интерпретирует команду движения руки робота по окружности обода рулевого колеса в

траекторию, начинающуюся от текущего положения руки на колесе. Поскольку выбранные команды-нетерминалы не позволяют указать, как конкретно робот должен захватывать руль: одной рукой или двумя, в каких именно точках – то блок синтаксической обработки может самостоятельно выбирать любой подходящий вариант захвата. Аналогичным образом обеспечивается и перехват рук на руле.

2.4 Алгоритм порождения управляющей последовательности

Последовательность терминальных символов порождается из последовательности команд-нетерминалов, присылаемых блоком постановки задач, общеизвестными методами генерации текста по описывающей его контекстно-свободной грамматике.

Состояние S процесса порождения можно описать множеством троек (T, C, N) . Каждая тройка задаёт одну из возможных реакций системы на команду C как последовательность порождаемых терминальных символов T и множество последовательностей символов N , задающих возможные следующие состояния процесса. Для наглядности рассмотрим одну из таких троек, формируемую по описанной выше грамматике сразу после инициализации процесса, до приёма команд:

$(T = [PL1], C = ToLeft,$
 $N = [[LWL, MoveL, ManipulateL, ReleaseL, S],$
 $[LWL, MoveL, ReleaseL, GrabL, ManipulateL, ReleaseL, S],$
 $[LWL, MoveL, ReleaseL, S]).$

Данная тройка показывает, что одной из возможных реакций системы на команду $ToLeft$ является отсылка блоку интерпретации инструкции $PL1$ (команды захвата руля левой рукой), причём после выбора этого варианта действий дальнейшая работа может пойти по трём путям. После единичного движения руля налево одной левой рукой командой LWL и дальнейших движений влево, порождаемых $MoveL$, возможны выполнение дальнейших манипуляций левой рукой (первый член N), перехват руля левой рукой и дальнейшие действия ею (второй член N) либо прекращение манипуляций с возможностью их возобновления (третий член N).

Процесс порождения реализован в виде двух повторяющихся шагов – выбора реакции на команду и обновления состояния. После получения команды необходимо выбрать одну из троек, реагирующих на неё. В данной реализации выбор осуществляется случайным образом, так как любой предлагаемый вариант должен работать корректно; в общем случае можно выбирать наилучший вариант на основе сенсорных данных о состоянии процесса. Если нужных троек нет, команда игнорируется как недопустимая в текущем состоянии. Далее терминальные символы выбранной тройки T передаются для исполнения интерпретатору, а из N порождается новое состояние процесса.

Процесс порождения состоит в том, что в каждом варианте следующего состояния выполняются все порождения самого левого нетерминала до тех пор, пока этим самым левым нетерминалом не окажется команда; после этого из результата формируется тройка показанного выше вида. Такое обновление состояния завершится за конечное число шагов, только если грамматика не способна породить бесконечное множество идущих подряд терминальных символов без использования нетерминалов из набора команд. Это - основное требование к используемой грамматике.

2.5 Требования к интерпретатору и исполнительным модулям

Управление действиями робота ведёт интерпретатор, контролирующий ход элементарных двигательных операций, проводимых исполнительными модулями. В разрабатываемой системе управления к этим компонентам предъявляются следующие требования:

- одновременно полученные команды, относящиеся к разным конечностям, исполняются одновременно;
- при одновременном появлении команд, влияющих на один орган управления (LWL и RWL в примере выше), процессы их исполнения становятся взаимозависимыми (синхронизируются);
- модули исполнения операций обеспечивают плавность движений.

Проще всего удовлетворить эти требования, заставив интерпретатор работать синхронно с блоком постановки задач и блоком синтаксического анализа. Длительность такта при этом определяется длительностью самого долгого из исполняемых двигательных действий, поэтому продолжительности разных тактов могут различаться.

В настоящий момент ведётся разработка интерпретатора и модулей исполнения операций, способных удовлетворить изложенные требования для работы системы с тестовым роботом Reem-C.

2.6 Параллельные грамматики для обеспечения синхронии движений

Для совместной работы с множеством разных органов управления, каждый из которых представлен собственной грамматикой, необходимо использовать общий метод синхронизации. Одним из подходов к этой задаче является объединение отдельных грамматик в единую параллельную грамматическую систему с коммуникацией (parallel communicating grammar system). Эта конструкция представляет собой набор грамматик, в которых помимо обычных терминальных и нетерминальных символов могут

появляться символы запроса, т.е. обращения к правилам другой заданной грамматики системы [Csuhaĵ-Varĵu et al, 1990].

Среди параллельных грамматик выделяют синхронные и асинхронные. Синхронные грамматики более выразительны, но из-за сложности их задания и проверки корректности в данной работе использован асинхронный вариант. Для создания параллельной грамматики в этом случае достаточно механически объединить компоненты, соответствующие разным элементам управления, при необходимости переименовав совпадающие термины разных грамматик во избежание коллизий. Синхронизация в такой системе обеспечивается введением дополнительной центральной грамматики, которая занимается главным образом передачей команд другим грамматикам в правильной последовательности [Paun, 1993]. На практике для синхронизации может также потребоваться введение дополнительных термов в существующие грамматики. Например, чтобы запретить захват руля двумя руками при необходимости работать с рычагом, можно ввести в первое правило грамматики из примера нетерминалы, отвечающие за работу с рычагом:

```
S → Finish | WorkWithLever GrabL ManipulateL StopWorkWithLever
ReleaseL S | Grab Manipulate Release S
```

После этого использование одноручного захвата руля становится возможным только после прихода команд манипуляций с рычагом, иначе обращения к соответствующим правилам не происходит. В настоящий момент ведутся дополнительные исследования методов, позволяющих избежать модификации исходных грамматик.

3 Реализация и обсуждение

Предложенная система была реализована в виде компонента синтеза управляющих последовательностей по параллельным грамматикам и набора процедур исполнения элементарных движений. Процедуры исполнения построены в виде последовательностей обращений к библиотеке алгоритмов обратной задачи кинематики MoveIt, входящей в состав фреймворка ROS. При работе с грамматиками использованы средства платформы NLTK. Полученные наборы команд анализировались на корректность на упрощённой программной модели задачи, оценивающей правильность. Алгоритм смог обработать тестовые последовательности высокоуровневых команд, имитирующих простейшие действия водителя (трогание с места и перестроение). Длительность одного цикла синтаксической обработки на тестовой последовательности не превышала 10 мс, что приемлемо для управления целевым роботом.

Результаты моделирования говорят о том, что выбранный подход для высокоуровневого описания органов управления позволяет получить

достаточно качественное решение, позволяющее организовать работу робота-водителя. Однако для практического применения данной разработки требуется детальное исследование качества управления на реальном роботе.

Наиболее значительным недостатком предложенной системы является сложность синхронизации конечностей в процессе выполнения элементарных действий, так как для устойчивой работы, например, двух рук при совместном повороте руля синхронизации при запуске действий недостаточно. Значительной проблемой является придание последовательности выбранных действий временной составляющей при синтаксической обработке. В качестве направления будущих исследований можно также наметить получение необходимого набора геометрических примитивов непосредственно из данных о движениях реальных операторов и создание грамматик на их основе.

Предложенное решение носит достаточно универсальный характер и может использоваться в общих задачах взаимодействия манипулятора с внешней средой.

Благодарности. Автор считает долгом поблагодарить всех сотрудников лаборатории робототехники КК НБИКС ПТ и в особенности Е.П. Орлинского и Д.М. Павлова, без упорного труда которых данная разработка была бы невозможна.

Список литературы

- [**Bidgoli et al, 2014**] Bidgoli A., Cardoso-Ilach D. Towards a motion grammar for robotic stereotomy // 2014. № Daas.
- [**Csuhaj-Varju et al, 1990**] Csuhaj-Varju E., Dassow J. On Cooperating/Distributed Grammar Systems // J. Inf. Process. Cybern. 1990. Т. 26. № 1–2. с. 49–63.
- [**Fu, 1974**] Fu K.S. Syntactic Methods in Pattern Recognition. New York: Academic Press, 1974.
- [**Paun, 1993**] Paun G. On the synchronization in parallel communicating grammar systems // Acta Inform. 1993. Т. 30. с. 351–367.
- [**Сорокоумов, 2017**] Сорокоумов П.С. Система компьютерного зрения для распознавания элементов управления автомобилем роботом-водителем // IV Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2017), Казань, 5-6 октября 2017. Казань: Центр инновационных технологий, 2017. с. 46–55.