

## НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОИСКА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ (РВП)

Тимофеев Адиль Васильевич, Титов Виктор Викторович

**Abstract:** Рассматривается вариант использования нейронных сетей в системе управления среднего уровня робота вертикального перемещения. Предлагается и обсуждается структура управления движением двуногого присосочного робота с использованием нейросетевого приближения решения обратной задачи кинематики при планировании движений.

**Keywords:** Робот вертикального перемещения, обратная задача кинематики, планирование движений, нейросетевая аппроксимация, стохастический поиск.

**ACM Classification Keywords:** I.2.9 Robotics: Kinematics and dynamics.

### Введение

Мобильные роботы в настоящее время используются как в промышленности, так и в местах и средах, труднодоступных или опасных для человека (например, в космическом пространстве, под водой, а также в условиях высокой температуры и радиации). Одним из относительно новых направлений в развитии мобильной робототехники является создание роботов вертикального перемещения (РВП). Подобные роботы способны выполнять операции различного рода, находясь на поверхности с произвольным углом наклона.

Данное направление робототехники начало активно развиваться в 90-х годах в таких странах, как Япония, США, Англия, Германия, а также в России. Вначале 90-х были выпущены многочисленные статьи, посвященные созданию или описанию уже действующих прототипов роботов вертикального передвижения. Среди российских разработок можно выделить транспортный робот вертикального передвижения (ТРВП), описанный в [Градецкий, 1997].

Исследования в этом направлении используют для достижения поставленных задач разнообразные механизмы, материалы и принципы движения. В частности, широко используются вакуумные механизмы (присоски), новейшие материалы в аппаратах крепления к поверхности (как правило, это различного рода адгезионные поверхности с микроструктурным и наноструктурным материалом) и принципы передвижения, заимствованные из природы (*bio-inspired hardware*).

Разработанный в ЦНИИ РТК робот вертикального перемещения (рис.1) имеет пять степеней подвижности и использует две вакуумные присоски (стопы) для перемещения по плоским вертикальным и поверхностям произвольной ориентации.

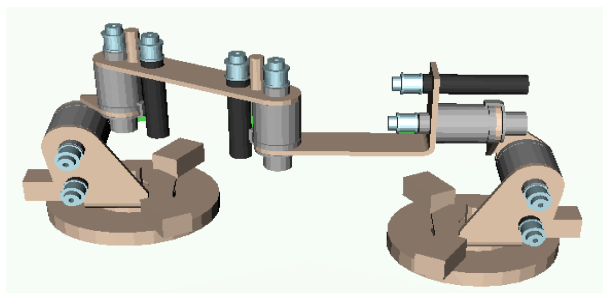


Рис. 1. Стопоходящий робот вертикального перемещения

---

### Постановка задачи

---

Верхний уровень управления мобильными роботами, отвечающий за тактическое планирование движений и перемещений, как правило, берет на себя нагрузку по формированию формы и параметров траектории движений сочленений робота с целью обеспечения его общего перемещения в пространстве. При планировании тактический уровень управления должен учитывать как специфику конфигурации робота, так и особенности непосредственной окружающей среды робота (локальная навигация и обход препятствий).

Для выполнения такого планирования алгоритм должен уметь рассчитывать положения сочленений в зависимости от обобщенных координат механизма, а также уметь решать обратную данной задачу за минимально возможное время.

Другим аспектом работы данного уровня управления является генерация траектории движения механизма в среде с препятствиями за ограниченное время.

Таким образом, при разработке принципов передвижения рассматриваемого робота решались две перечисленные задачи тактического уровня управления:

- быстрое решение обратной задачи кинематики;
- метод генерации траектории движения сочленений при наличии препятствий и кинематических ограничений

---

### Решение обратной задачи кинематики

---

В ходе экспериментальных работ и исследований по моделированию была подтверждена необходимость в решении обратной задачи кинематики данного механизма, применяемая в задачах контроля положения, планирования и калибровки. Из множества подходов к решению данной задачи ([Тимофеев,1999], [Тимофеев,1988], [Фу, 1989]) был выбран подход, связанный с численной минимизацией функционала

$$Z(q) = Q_{зад} - F(q) \quad (1)$$

где  $q$  – углы шарниров,  $F(q)$  – решение прямой задачи кинематики,  $Q_{зад}$  – целевое положение и ориентация в декартовых координатах.

Как известно, при использовании градиентных и других методов поиска минимумов этого функционала имеются известные проблемы, связанные со скоростью сходимости алгоритмов оптимизации функционала (1), зависящие от начальных приближений  $q_0$ .

В качестве альтернативы был рассмотрен подход, основанный на нейросетевой аппроксимацией обратной задачи кинематики. Данный подход столкнулся с рядом трудностей, связанных с невозможностью достаточно точно аппроксимировать все пространство допустимых конфигураций робота нейронной сетью приемлемой сложности. Время обучения сети и генерации обучающих выборок в рамках такого подхода оказалось велико.

Однако использование нейросетевого приближения для последующего численного решения задачи минимизации функционала (1) оказалось более выгодным по сравнению с табличным хранением начальных приближений. Помимо этого был исследован подход, при котором нейросеть приемлемой сложности (размерности) обучается на заранее заданной (или спланированной) траектории движения звеньев механизма с учетом конструктивных ограничений на углы поворота шарниров при этом движении.

Совокупность таких предобученных нейронных сетей (рис.2) является решением обратной задачи кинематики для всего пространства конфигураций. Она может быть использована как с алгоритмом численного уточнения, так и без него.



Рис. 2. Схема функционирования множества сетей

Решения обратной и прямой задачи кинематики играют важную роль при планировании движений любого робота. Как показали модельные эксперименты, решение обратной задачи кинематики при плоскостном хождении робота смысла не имеют ввиду того, что те классы препятствий (ступени не выше 5 см), которые робот способен преодолевать, легко преодолеваются за счет трех механических датчиков определения углов наклона присоски к поверхности (они же являются детекторами касания поверхности). При переходе на стену обратная задача кинематики, решаемая с помощью нейросетевого приближения с численным уточнением, в дальнейшем применялась при генерации промежуточных точек в алгоритме поиска траектории перехода на стену, а также для визуализации положения звеньев механизма при ручном управлении в сложно проходимых местах.

### Стохастический алгоритм планирования траектории

Для случаев движения робота в среде с препятствиями или перехода на другие поверхности был разработан алгоритм стохастического планирования траектории движения сочленений (являющийся модификацией алгоритмов, предложенных в [Siciliano, 2009]). Одной из особенностей алгоритма является использование пошагового приближения к желаемой конфигурации робота из начальной конфигурации при стохастическом выборе величины и направления шага. Для величины и направления шага было использовано нормальное распределение. При этом математическое ожидание величины шага изменялось пропорционально обобщенному расстоянию до целевой конфигурации, что обеспечивало подход к целевой конфигурации лишь с незначительными колебаниями. Направление шага на каждой итерации также выбиралось, исходя из нормального распределения по каждой из компонент вектора обобщенных координат механизма. При этом среднеквадратичное отклонение целенаправленно уменьшалось в случае движения в направлении, близком к направлению на целевую конфигурацию. Такой подход позволяет отнести разработанный алгоритм к алгоритмам целенаправленного (*goal directed*) стохастического поиска. В случае столкновения с препятствием в ходе планирования движения среднеквадратичное отклонение направления и математическое ожидание величины шага получают дополнительное скачкообразное увеличение, которое затем снижается в ходе планирования. Такое увеличение позволяет алгоритму быстрее находить обход/выход из препятствия. Стартуя в начальной точке, алгоритм выбирает несколько точек вокруг текущей по нормальному распределению с небольшой дисперсией. Затем каждая сгенерированная точка проверялась на столкновение со стеной или выход за пределы углов механизма, а также на возможность перехода в нее из предыдущей конфигурации. Если точка проверку не проходила, то выбрасывалась из списка. Из оставшихся точек в качестве заносимой в траекторию выбирается та, которая наиболее близка к целевой конфигурации.

Кроме того, была введена дополнительная небольшая вероятность выбора из сформированного списка произвольной точки, а не наиболее близкой к целевой конфигурации. Также был рассмотрен вариант с

присвоением каждой точке списка вероятности быть выбранной, пропорциональной ее близости к целевой конфигурации (данный подход показал более быструю сходимость в сравнении с первым вариантом).

Таким образом, обеспечивалось плавное продвижение в направлении целевой конфигурации. Время планирования перехода на стену для одной ноги в среднем составило 25 секунд, что в среднем почти на 60% быстрее, чем аналогично построенное планирование, но без адаптации параметров случайного распределения (в среднем 60 секунд).

---

## Заключение

Реализация алгоритма поиска решения обратной задачи кинематики с применением нейронных сетей, позволило в значительной степени увеличить быстродействие других алгоритмов, обрабатывающих данные о положении звеньев и шарниров, и увеличило общее качество функционирования системы.

Использование целенаправленного стохастического планирования позволило увеличить скорость работы алгоритма на открытых (без препятствий) зонах пространства состояний. Однако целенаправленность ухудшает поведение алгоритма в зонах пространства состояний с вогнутыми препятствиями. Тем не менее, заданная конфигурация робота позволяет использовать данный алгоритм достаточно эффективно.

Решение данных задач практически полностью покрывает потребности тактического уровня управления рассматриваемого робота, что позволяет ему свободно двигаться и маневрировать в любых направлениях, используя циклически повторяющиеся движения.

В дальнейшем планируется рассмотреть возможность автоматического синтеза походки всего робота, как, например, это было сделано в работе [Dittrich, 1998].

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РГНФ–ГФЕН Китая № 10–08–91159–ГФЕН–а “Исследование научных проблем интеллектуального управления магистральными транспортными средствами и мобильными роботами”.

---

## Библиографический список

- [Градецкий, 1997] Градецкий В.Г., Рачков М.Ю., Роботы вертикального перемещения, М.: Тип. Мин. Образования РФ, 1997, 223с.
- [Тимофеев, 1999] Тимофеев А.В., Экало Ю.В. Системы цифрового и адаптивного управления роботом: учебн. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 1999. 248 с.: ил. ISBN 5-288-01081-1.
- [Тимофеев, 1988] Тимофеев А. В. Адаптивные робототехнические комплексы. // Л.: Машиностроение. 1988. 332 с.
- [Фу, 1989] Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624 с., ил. ISBN 5-03-000805-5
- [Siciliano, 2009] B. Siciliano, L. Sciacivico, L. Villani, G. Oriolo Robotics Modelling, Planning and Control 2009 Springer-Verlag London Limited ISBN 978-1-84628-641-4
- [Dittrich, 1998] Peter Dittrich, Andreas Bürgel, Wolfgang Banzhaf, Learning to move a robot with random morphology, CONFERENCE PAPER, Conf. First European Workshop on Evolutionary Robotics 1998, p. 165--178

---

## Информация об авторах

**Тимофеев Адиль Васильевич** – заведующий лабораторией информационных технологий в управлении и робототехнике Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39, СПИИРАН, tav@iias.spb.ru

**Титов Виктор Викторович** – аспирант Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39, СПИИРАН, victortitov2005@mail.ru