

ОТЗЫВ Официального оппонента

кандидата технических наук, Рыжикова Ивана Сергеевича на диссертацию Финкельштейн Евгении Александровны «Вычислительные технологии аппроксимации множества достижимости управляемой системы», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации»

Актуальность темы диссертации

В диссертации рассматриваются задачи оценивания множества достижимости для нелинейных динамических систем с параллелепипедными ограничениями на функцию управления. Задача оценки множества достижимости позволяет ответить на вопрос, в каких состояниях может быть система в определенный момент времени при известных начальных условиях. Системы указанного типа имеют широкое распространение на практике, а задача оценки множества достижимости не только является важной самостоятельной задачей, но и сопряжена с другими задачами из области оптимального управления, анализа свойств системы и выработки требований к системе управления. Понятно, что сложность системы, обусловленная ее нелинейностью, объясняет невозможность применения аналитических методов и требует применения численных оценок.

Решение таких задач опирается не только на теорию управления, но также на методы вычислительного моделирования и информационные технологии. Несмотря на продолжительное развитие этих направлений, равно как и методов решения обратных задач и теории оптимизации, потребность в дальнейшем совершенствовании существующих и в разработке новых эффективных подходов и алгоритмов оценки множества достижимости не уменьшается. Объясняется это, в общем случае, тем, что со стороны практического применения всегда растет потребность в повышении эффективности, особенно при сохранении общности постановки.

Сложность задач и сосредоточенность исследовательских работ вокруг частных постановок приводит к тому, что не сформирован общепринятый набор тестовых задач, который мог бы использоваться в оценивании эффективности подходов. Такая практика является широко распространенной в теории оптимизации, где наборы тестовых задач существуют для разных классов задач: без ограничений и с ограничениями, со статическими целевыми функциями и динамически изменяющимися целевыми функциями, одно- и многокритериальных и т.д. Более того, наборы

таких тестовых задач меняются с определенной периодичностью, и создаются все новые наборы для новых постановок задач поиска экстремума. Последнее свидетельствует о высокой оценке значимости, и необходимости поддержки развития тестовых задач и культуры сравнения алгоритмов.

В связи с этим, бесспорно, **актуальной** и важной является **задача** совершенствования и создания новых алгоритмов аппроксимации множества достижимости для нелинейных динамических систем с ограничением по функции управления. В работе рассматриваются несколько различных алгоритмов аппроксимации множества достижимости, предлагаются способы решения порожденных задач. Так же **актуальным** является формирование тестового набора задач для оценки множества достижимости в текущей постановке.

Содержание работы

Во введении диссертационной работы обоснована актуальность темы, сформулирована цель, поставлены задачи исследования, рассмотрены вопросы научной новизны и практической значимости проведенных исследований и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведена общая постановка задачи оценивания множества достижимости, общие теоретические аспекты, выраженные в предложениях, которые ложатся в основу обоснования применимости приводимых в работе эвристик. Выделяется класс решаемых задач, приводятся основные понятия. В главе рассматриваются существующие семейства аналитических и численных методов решения рассматриваемой задачи, изложение сопровождается литературным обзором. Отдельно рассматривается задача оптимального управления с терминальным функционалом, дается обзор методов невыпуклой оптимизации для решения задач такого класса. Для каждой из приведенных задач рассматриваются программные решения с кратким описанием их функционала.

Во второй главе диссертации изложены существующие и предлагаемые автором подходы к решению задачи оценки множества достижимости. Подходы подробно описаны, приводится специфика каждого из них. Первым рассматривается известный метод стохастической аппроксимации. Далее решения, полученные этим методом, используется для наглядного сравнения с результатами, полученными предлагаемыми подходами. Приводится пример, который отражает чувствительность алгоритма к управляющему параметру – числу точек переключений. Первым из предлагаемых автором алгоритмов рассматривается алгоритм равномерной аппроксимации, в котором каждая последующая точка внутри оценки множества достижимости выбирается такой, которая бы минимизировала некоторый функционал. Приводится список функционалов, каждый из которых порождает задачу, приводящую к разным характеристикам равномерности заполнения. Следующим рассматривается метод

квазиравномерной аппроксимации, аналогичный методы равномерной аппроксимации, но с функционалом, вид которого обеспечивает невозможность последующей точки расположиться дальше некоторого порога. Аналогично, приводится набор функционалов. Демонстрируются результаты работы алгоритмов на частной задаче, где показано, как по мере работы алгоритма происходит заполнение множества точек достижимости.

Далее рассматриваются подходы к аппроксимации границы множества: метод кусочно-линейной аппроксимации и метод равномерной монотонной аппроксимации границы. Каждому подходу соответствуют различные сопряженные задачи. В методе кусочно-линейной аппроксимации для выбранного количества вершин многомерной фигуры, окаймляющей множество точек достижимости, через функции управления подбирается их расположение таким образом, чтобы максимизировать функционал оценивающий, в рассматриваемом случае, площадь фигуры и штрафующим самопересечения. В методе монотонной аппроксимации границы, который рассматривается для случая двумерных систем, предлагается строить границу множества через последовательный выбор начального состояния для сопряженных переменных. Последовательный выбор возможен, ввиду того, что начальные состояния обязаны лежать на сфере единичного радиуса. Подход дополнен процедурами поиска дополнительных точек и устранения петель.

В главе приведены так же методы оценивания множества достижимости эллипсоидами, их объединением и объединением шаров разного радиуса. Отдельно рассматриваются задачи оценки множества достижимости при малых длинах интервала управления, здесь предлагается ограничиться управлениями с одной точкой переключения, и для систем с разрывной правой частью, для которых применимость предлагаемых подходов возможна с использованием специальных алгоритмов численного интегрирования.

В третьей главе диссертации изложены аспекты, связанные с реализацией предлагаемых алгоритмов и программным решением. Приводятся основные функциональные возможности разработанного соискателем программного обеспечения на языке C, обусловленные спецификой задачи оценки множества достижимости предлагаемыми в предыдущей главе алгоритмами. Рассматриваются схемы применения различных алгоритмов с рекомендуемыми параметрами, в предположении о достижении желаемого результата. Здесь же приводится обоснование формирования набора тестовых задач и проводится вычислительный эксперимент, цель которого — оценить эффективность алгоритмов равномерной и квазиравномерной аппроксимации с различными параметрами при решении нескольких задач из предлагаемого набора. Так же приводится сравнение скорости расчета алгоритмов: для каждой из тестовых задач фиксируется максимальное время расчета. В завершении главы приводится предлагаемый автором алгоритм решения задач поиска глобального оптимума. Алгоритм является модификацией метода

мультистарта, в которой исключаются области - оваловиды для генерирования точек, если подтвердится гипотеза, что локальный спуск из рассматриваемой области приведет к уже найденному экстремуму.

В четвертой главе диссертации рассматривается решение прикладных задач. Первой рассматривается возможность применения предлагаемых алгоритмов к решению задачи оптимального управления с терминальным функционалом, приводится пример решения трех таких задач. Далее рассматривается задача оптимального быстрогодействия на примере навигационной задачи Цермелло. Рассматривается задача определения размеров управляющих воздействий, при которых состояние системы не выходит за установленные границы, приводится пример решения такой задачи. Исследовано множество достижимости климатическо-экономической модели, показана динамика изменения этого множества, исследованы влияния принимаемых мер на экологическую обстановку. Также исследована задача управления сферическим роботом и задача оценки параметров модели реакции окисления метана на поверхности никеля, при которых наблюдается автоколебательный режим.

В заключении диссертации приведены основные результаты работы.

Научная новизна полученных результатов

Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми для решения задачи оценки множества достижимости для нелинейных систем с параллелепипедными ограничениями на управление:

1. разработаны алгоритмы равномерного и квазиравномерного заполнения множества, результатом применения которых является сравнительно меньший набор точек, позволяющих описать форму множества;

2. для двумерных систем впервые предложен алгоритм аппроксимации границ множества достижимости, основанный на максимизации площади, ограничиваемой контуром, который применим и для аппроксимации контуров многомерных систем на двумерных проекциях по выходам системы;

3. для двумерных систем впервые предложен алгоритм аппроксимации границ множества достижимости, основанный на применении принципа максимума Понтрягина, поиска дополнительных точек и устранения петель;

4. разработан алгоритм, основанный на объединении эллипсов и шаров разных характеристик

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации

Выдвигаемые научные положения обоснованы с использованием методов теории оптимального управления, теории оптимизации, системного анализа и дифференциальных уравнений.

Обоснованность результатов обусловлена корректностью постановок задач и принятых допущений.

В ходе работы были исследованы как тестовые задачи аппроксимации множества достижимости и сопряженные прикладные задачи оптимального управления, так и реальные практические задачи исследования динамических систем. По результатам проведенных численных экспериментов, можно утверждать, что разработанные алгоритмы являются эффективным инструментом.

Результаты диссертационной работы прошли апробацию на российских и международных научных конференциях и на различных семинарах некоторых из ведущих научных институтов России в области управления и моделирования систем.

Значимость для науки и практики

Теоретическая значимость работы состоит в разработке, апробировании и исследовании алгоритмов решения задачи аппроксимации множества достижимости. Каждый из рассматриваемых алгоритмов позволяет получить лучшее, по ряду критериев, решение или, как для алгоритмов аппроксимации контура, впервые решать задачу. Совершенствование методов оценки множества достижимости для оценки контура особенно важны для решения задач управления, где важно получить точку касания целевой области состояния системы и области достижимости при заданном конечном времени. Так же значимость имеет и набор предложенных тестовых задач, который позволяет оценить эффективность алгоритмов и сравнивать их.

Практическая значимость работы заключается в том, что на основании проведенной научно-исследовательской работы было реализовано программное обеспечение для решения рассматриваемых задач. Предлагаемая программа прошла различные этапы тестирования, содержит в себе рекомендации по настройкам для достижения необходимого результата, и в то же время, у пользователя остается возможность самостоятельного выбора всех настроек алгоритмов. Так же возможно решение приведенных задач для систем, вводимых пользователем.

Замечания по работе

1. Приводится определение вычислительных технологий, которое представляется не совсем удачным. Вся совокупность предметов, понимаемых под вычислительными технологиями, должна быть объединена определенной целью, чего в предлагаемом определении не хватает. Далее, из контекста не понятно в чем разница между расчетной методикой и алгоритмом. Возможно, что следующее определение бы было более точным: под вычислительной технологией здесь понимается совокупность методов, алгоритмов, структур данных, математических моделей и их программных реализаций для решения определенной задачи.

2. В алгоритме равномерной аппроксимации и далее, возможно допущена ошибка в определении x^* , - переменной, которая по смыслу представляется как точка в пространстве состояний, а в некоторых выражениях – как аргумент, приносящий максимум функционалу, на множестве допустимых управлений U .

3. Алгоритмы равномерной и квазиравномерной аппроксимации имеют стохастическую природу – первая точка распределена случайно. В таком случае, следовало привести сравнение эффективности алгоритмов при различных параметрах по набранным статистикам за серию запусков. То же относится к подходам, в которых вспомогательная задача решается алгоритмом, приведенным в п. 3.9., который так же имеет стохастическую природу.

4. Не обоснована причина выбора алгоритма глобальной оптимизации из п. 3.9. Существует большое количество алгоритмов решения задачи о поиске множества локальных оптимумов, тестовый набор задач для оценки их эффективности, как и сами оценки.

5. На стр. 94 приводится задача минимизации, для которой не объясняется, почему целевая функция принимает именно такой вид: первые два слагаемых будут влиять на значение функционала, даже при удовлетворении условий ограничений по состоянию системы. Не приведено, что скрыто за обозначениями x^g и x^l .

6. Не приведены сравнения с другими алгоритмами оценки множества достижимости на предлагаемом наборе тестовых задач.

Указанные замечания не влияют на положительную оценку работы.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Подходы и алгоритмы рекомендованы к использованию в научно-исследовательских центрах и компаниях, в которых ведутся исследования и разработки, связанные с моделированием и управлением динамическими системами.

Предлагаемые тестовые задачи и программное решение рекомендовано к использованию научными институтами и организациями, ведущими исследования в области развития методов управления динамическими системами и аппроксимации множества достижимости.

Оценка диссертационной работы

В целом, можно заключить, что тема исследования является актуальной, а цель - достигнутой. Автор работы обладает глубокими знаниями в области аппроксимации множества достижимости для нелинейных динамических систем, о чем свидетельствуют не только предлагаемые алгоритмы, но и приведенные по каждой отдельной задаче литературный обзор и особенности предлагаемых или существующих решений.

Диссертационная работа Евгении Александровны Финкельштейн является завершённой, целостной и выполненной на достаточно высоком научном уровне. Работа имеет важное научное и практическое значение для системного анализа, управления, и теории динамических систем.

В автореферате представлены в достаточном объёме основные этапы работы, полученные результаты и сформулированные выводы. Автореферат и 20 публикаций автора (в том числе, 6 в журналах из списка ВАК) отражают основное содержание диссертации.

Основные результаты работы, помимо публикаций в открытой печати, докладывались на общероссийских и международных конференциях, обсуждались на научных семинарах одних из ведущих научных институтов России по тематике работы.

Оформление диссертации и автореферата удовлетворяет требованиям соответствующих нормативно-методических документов.

Диссертация полностью удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям по техническим наукам, а её автор Финкельштейн Евгения Александровна заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации».

Официальный оппонент

Кандидат технических наук,
Специалист по моделированию,
Офис численного моделирования,
Открытое акционерное общество
«Красноярский завод цветных металлов
имени В.Н. Гулидова»

Рыжиков И.С.

Открытое акционерное общество
«Красноярский завод цветных металлов
имени В.Н. Гулидова»,
Российская Федерация, 660027,
Красноярский край, г. Красноярск,
Транспортный проезд, дом 1,
I.Ryzhikov@krastsvetmet.ru

