**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»)**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Факультет |  | И |  | «Информационные и управляющие системы» |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Кафедра |  | И9 |  | «Систем управления и компьютерных технологий» |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Дисциплина |  | Научно-исследовательская работа | | |

КУРСОВАЯ РАБОТА

на тему

|  |
| --- |
| Исследование методов синхронизации агентов |
|  |
|  |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы | | | |  | | И9М31 |
| Масленников В.М. | | | | | | |
| Фамилия И.О. | | | | | | |
| **РУКОВОДИТЕЛЬ** | | | | | | |
| Попов А.М. | |  |  | | | |
| Фамилия И.О. Подпись | | | | | | |
| Оценка |  | | | |  | |
| «\_\_\_\_\_» |  | | | | 2018 г. | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2018г.

**Реферат**

Курсовая работа содержит: 28 страниц, 7 иллюстраций, 48 формул, 10 использованных источников.

СИНХРОНИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЕ, МНОГОАГЕНТНЫЙ, ОБЗОР, АНАЛИЗ, ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ, МЕТОДИКА.

Целью работы являются:

Подробное исследование актуальных способов синхронизации агентов, управления синхронизацией в системе из нескольких агентов.

Объектом работы являются:

Управление и координация многоагентной системы.

Предметом работы являются:

Управление системой из двух манипуляторов.

Результатами работы являются результаты проверки методики управления системы из двух манипуляторов методом управления синхронизацией по перекрестным связям.

Оглавление

Введение3

1. Методика синхронизации агентов4
   1. Понятие синхронизации4
   2. Основная задача управления синхронизацией5
   3. Пример определения задачи синхронизации7
   4. Ошибка синхронизации8
   5. Метод перекрестного управления синхронизацией осей движения 11
   6. Метод адаптивного управления синхронизацией13
2. Решение прямой и обратной задачи кинематики для двухзвенного манипулятора15
   1. Прямая задача кинематики15
   2. Обратная задача кинематики16
   3. Прямая задача кинематики для линейных скоростей17
   4. Обратная задача кинематики для линейных скоростей17
3. Динамическая модель двухзвенного манипулятора18
4. Алгоритм управления20
   1. Классическое управление с помощью ПД-регулятора21
   2. Добавление контура синхронизации к ПД-регулятору 21
5. Проверка методики управления21

Заключение 24

Список использованных источников25

Приложение А26

Приложение Б27

**Введение**

Стремительное развитие сенсорных, вычислительных и коммуникационных технологий привело к появлению автономных устройств, функционирующих индивидуально в различных условиях и средах. Теории, заложенные в основу работы этих устройств, служат основой для дальнейших открытий и разработок в частности в области многоагентных систем. Такие системы помогают выполнить задачи, которые не могут быть решены индивидуально (одним агентом, действующим в одиночку).

Существует множество примеров многоагентных систем: взаимодействие нескольких роботов, решающих одну задачу, многоосевое числовое программное управление (например, в станках с ЧПУ), управление роем миниатюрных робототехнических устройств. Высокий уровень надежности и производительности при выполнении операций может быть достигнут, если несколько агентов наделены возможностью коммуникации и синхронизации друг с другом. Используя концепцию перекрестной связи, создаются системы управления синхронизацией движения. В них каждый агент выполняет собственную индивидуальную задачу, одновременно синхронизируя движение с остальными узлами системы таким образом, чтобы удовлетворить поставленным задачей ограничениям и особенностям кинематики движения. Управление синхронизацией в многоагентной системе позволяет ее узлам работать как единое целое. Одним из важных свойств многоагентной системы является ее масштабируемость, способность работать со сколь угодно большим количеством узлов. Имея высокий уровень организации, многоагентные системы обладают высокой надежностью.

Целью данной работы является обзор и проверка современных методик управления многоагентными системами, использования полученных знаний в диссертационном исследовании.

1. **Методика синхронизации агентов**

В настоящее время исследование многоагентных систем и способов управления ими, стало популярной областью науки. Управление многоагентными системами несет в себе массу сложных задач и проблем, связанных с необходимостью обеспечить взаимодействие между агентами таким образом, чтобы суммарная ошибка системы стремилась к нулю (проблема обеспечения синхронизации).

* 1. **Понятие синхронизации**

Синхронизация – это процесс приведения к одному значению одного или нескольких разных объектов. Синхронизация необходима для согласования обработки событий происходящих в системе, состоящей из множества агентов[1]. Синхронизация помогает решить следующие проблемы:

* безопасность: многоагентные системы требуют обеспечить координацию агентов без возникновения конфликтов между агентами;
* точность: точность работы каждого агента зависит от актуальности информации полученной от других агентов; синхронизация играет важную роль при обеспечении точности работы системы;
* эффективность: синхронизация обеспечивает координацию между агентами, выполняющими специфические функции, что позволяет каждому агенту работать наиболее эффективно;
* коммуникация: при взаимодействии агентов, необходимо обеспечить правила и порядок общения;

В большинстве традиционных методов управления движением в многоагентных системах, контур управления каждым агентом получает сигнал обратной связи только от одного агента, без учета влияния остальных агентов. В результате, возникающая ошибка управления одним агентом, не может быть нивелирована остальными агентами. Это ухудшает эффективность координации и управления агентами. В качестве решения этой проблемы, была предложена концепция управления с помощью перекрестных связей. В результате контур управления получает сигнал ошибки не только от того непосредственно управляемого агента, но и от его «соседей». Рисунок 1 иллюстрирует архитектуру многоагентной системы, которая реализует концепцию перекрестной связи.

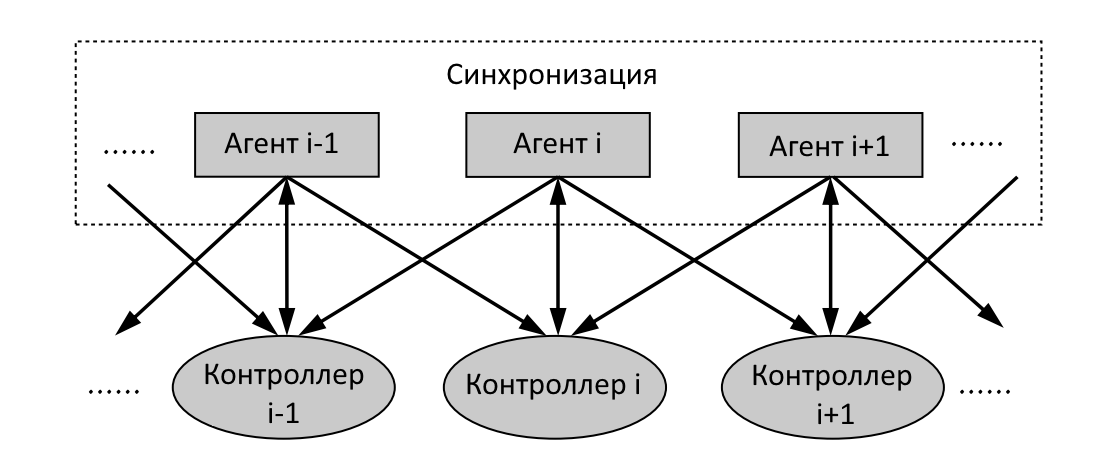


Рисунок 1. Схема многоагентной системы, реализующая концепцию перекрестной связи.

* 1. **Основная задача управления синхронизацией**

Управление синхронизацией направлено на обеспечение координцации движения всех агентов, а значит, агенты должны поддерживать определенные кинематические отношения и связи. Задача управления множеством агентов, с соблюдением требуемых кинематических отношений может быть сформулирована как способность движения каждого агента вдоль некоторой кривой , где – вектор состояний, – время. Обозначим параметризацию кривой .

Пусть – обобщенная координата состояния и – желаемое значение этой координаты для i-го агента ( должна быть определена так чтобы можно было найти соответствующую кривую ). Ошибку состояния i-го агента можно представить как:

(1)

Задача управления - свести состояние каждого агента к желаемому состоянию , то есть чтобы при и движении агента по траектории с сохранением ограничения . Первое условие представляет собой традиционную задачу управления движением отельного агента. Второе условие представляет собой задачу управления синхронизацией, решение которой позволяет согласовывать движение множества агентов с соблюдением требуемых кинематических отношений. Оба условия должны выполняться одновременно.

Чтобы выполнить второе условие, все агенты должны подвергаться общему ограничению, представленному как . Для разных задач синхронизации, встречаются разные конкретные формулировки этого ограничения. Необходимо найти общий характер ограничения, который смог бы объединить все формулировки в одном выражении.

Ограничение можно выразить через координату :

(2)

где – матрица ограничений, сформулированная на основе желаемого ограничения и зависящая от характеристик i-го агента; – общий вектор для всех агентов; – смещение i-го агента;

Все агенты могут быть связаны с помощью общего вектора , при этом должно существовать линейное отображение из в . Чтобы обеспечить единственное линейное отображение из в должна существовать обратная матрица . Что ведет к следующим допущениям:

1. Желаемое ограничение сформулировано таким образом, чтобы существоваа обратная матрица .

То есть из (2):

(3)

Уравнение (3) создает связь между координатой и общим для всех агентов вектором . Применительно ко всем агентам, получим:

(4)

Уравнение (4) показывает, что с помощью общего вектора , между всеми агентами может быть установлена взаимосвязь. Уравнение (4) справедливо и для желаемой, искомой координаты:

(5)

Вычитая (4) из (5) и подставив (1) получим:

(6)

Обозначив как параметр связи i-го агента, получим:

(7)

Уравнение (7) связывает ошибки положения всех агентов и поиск его решения является основной задачей управления синхронизацией.

* 1. **Пример определения задачи синхронизации**

Рассмотрим систему из двух манипуляторов, перемещающих жесткую балку (рисунок 2).

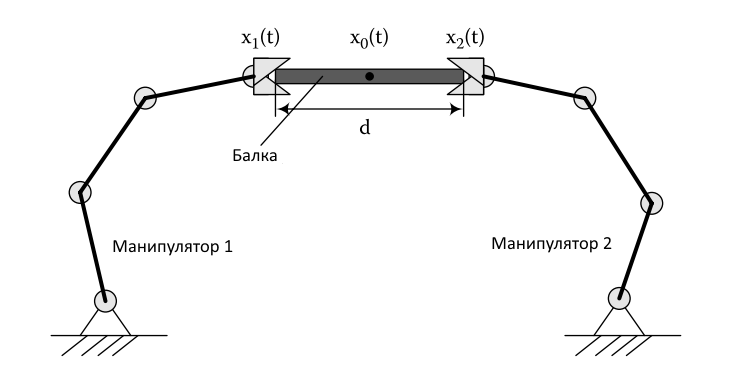


Рисунок 2. Манипуляторы, перемещающие жесткую балку.

Необходимо перемещать балку по заданной траектории таким образом, чтобы не деформировать балку или механизмы манипуляторов, то есть чтобы расстояние между инструментами манипулятора оставалось одинаковым на всем пути движения. На координаты и накладываются следующие ограничения:

(8)

(9)

где – координата геометрического центра перемещаемой балки, – расстояние между концами балки (длина). Определим ограничения в виде уравнения (2):

(10)

(11)

(12)

(13)

где – единичная матрица. Обозначив . Соответствующая задача синхронизации будет иметь вид:

(14)

* 1. **Ошибка синхронизации**

После определения задачи синхронизации, необходимо создать контроллер, решающий эту задачу. Возникает вопрос, как измерить степень синхронизации агентов. Необходимо найти критерий оценки качества синхронизации. В литературе, в которой описывается концепция управления с помощью перекрестных связей, используется метод управления ошибками состояния, возникающими между агентами. Например, ошибка скорости перемещения по двум осям, обозначаемая должна стремиться к нулю, где – скорость по i-й оси [2].

Таким образом, ошибка синхронизации может быть определена аналогично ошибке состояния, в концепции перекрестных связей. Ошибка синхронизации для конкретной задачи может быть сформулирована исходя из следующих правил:

1. Ошибка синхронизации должна формулироваться на основании уравнения (7).
2. Идея определения ошибки как разности состояний, при управлении методом перекрестных связей, может быть применена при формулировании ошибки синхронизации.
3. Определение ошибки синхронизации не должно зависеть от количества агентов в системе.
4. Определение ошибки синхронизации должно включать в себя все возможные состояния агентов, в том числе факторы, ограничивающие возможности синхронизации.

Далее рассмотрим результаты, к которым ведет следование этим правилам. Когда задача синхронизации определена, то есть найдено решение уравнения (7), следующие условия выполняются автоматически:

Что может быть представлено графически как на рисунке 2.

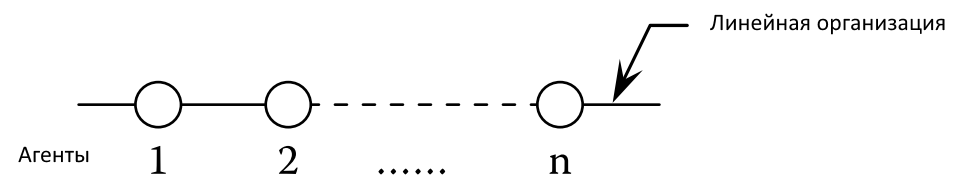


Рисунок 3. Множество агентов, организованные в линию.

Уравнение (15), обозначает, что для любой пары агентов - i и i+1, разница ошибок их состояния, описываемая уравнением:

(16)

стремится к нулю, при решении задачи синхронизации. То есть можно использовать уравнение (16) для измерения степени синхронности агентов.

Следовательно, ошибка синхронизации системы может быть определена как набор уравнений описывающих степени синхронизации двух соседних агентов:

– ошибка синхронизации i-го агента, – параметр перекрестной связи, позволяющий создать взаимосвязь между двумя агентами. Таким образом, задача синхронизации будет решена, если ошибка синхронизации , для всех i = 1,…, *n*.

Стоит отметить, что ошибка синхронизации позволяет определить только степень синхронизации между агентами, и не эквивалентна ошибке состояния . Для систем, которые имеют замкнутый контур, использование ошибки синхронизации позволяет каждому агенту иметь представление о движении соседних агентов и применять ее для корректировки своего движения.

Агенты, формирующие команду агентов, могут быть представлены информацией об их положении в пространстве, при выполнении совместной задачи координации. Тогда основной принцип, которому можно следовать при решении задачи, это объединение двух соседних агентов, например близкорасположенных друг к другу, в подсистему и соединение подсистем между собой, а значит все агенты в системе будут объединены между собой напрямую или косвенно.

Таким образом, задача управления – свести ошибку состояния агента и ошибку синхронизации агента к нулю. При этом не обязательно синхронизироваться со всем агентами, а достаточно синхронизации со своими соседями.

В некоторых случаях, два соседних агента, могут быть расположены достаточно далеко и не иметь прямой связи друг с другом. Обычно это случается когда целевая траектория не является замкнутой. На рисунке 2 изображен такой случай. Здесь первый и последний агенты находятся далеко друг от друга, не могут быть соединены напрямую между собой и, следовательно, не могут являться соседями. Но это не составляет большой проблемы, так как эти два крайних агента соединены со своими ближайшими соседями и это позволяет им оставаться работоспособными в единой системе.

* 1. **Метод перекрестного управления синхронизацией осей движения**

Рассмотрим систему, способную осуществлять движение по n осям. Динамика движения i-й оси может быть описана уравнением:

(18)

где обозначает координату движения i-й оси, и отражают внутренние и нелинейные эффекты, – описывает управляющий момент.

Сигнал управления для каждой оси, формируется таким образом, чтобы стабилизировать позицию этой оси в пространстве, одновременно с синхронизацией движения с соседними осями. Синхронизация происходит не со всеми осями, а только с соседними, так как это упрощает реализацию контроллера, при увеличении количества осей.

Для того чтобы одновременно обеспечить сходимость к нулю ошибки позиционирования и ошибки синхронизации определим общую ошибку позиционирования как:

(19)

Данное уравнение объединяет обе ошибки. Здесь положительная матрица коэффициентов усиления, – ошибка синхронизации (зависит от времени). Из уравнений (17) и (18) видно, что общая ошибка позиционирования состоит из ошибки позиционирования по своей оси и ошибки возникающей при синхронизации двух соседних осей.

Дифференцируя по времени, получим:

(20)

Для того чтобы выполнялись условия и определим вектор управления как:

(21)

где положительная матрица. Из данного вектора можно составить вектор , учитывающий ошибки позиционирования и скорости:

(22)

Контроллер должен обеспечить т.е. чтобы общая ошибка позиционирования и . Для обеспечения простоты реализации, синхронизация достигается только между двумя соседними осями.

Сигнал управления (крутящий момент) можно представить как:

(23)

где и – положительные матрицы коэффициентов усиления. Последнее слагаемое в уравнении (22) необходимо для компенсации эффекта, возникающего при добавлении дополнительного перекрестного управления к общей динамике системы.

Подставив (23) в уравнение динамики системы (18) получим уравнение динамики замкнутой системы для i-й оси:

(24)

Параметр управления в уравнении (19) и матрица в уравнении (23) играют важную роль при управлении ошибкой синхронизации. Значение определяет степень влияния ошибки синхронизации в общей ошибке позиционирования . С увеличением коэффициента усиливается синхронизация между осями. Коэффициент следует выбирать таким, чтобы соблюдался баланс между степенью влияния управления позиционированием и степенью влияния управлением синхронизацией. Параметр обеспечивает стабильность системы при добавлении перекрестного управления .

Рассмотренный метод синхронизации имеет следующие преимущества[2]:

1. Гарантирует асимптотическую устойчивость системы.
2. Параметр может меняться во времени, что определяет возможность широкого применения данного метода при решении задач синхронизации.
3. Отсутствуют ограничения на выбор коэффициентов управляющего усиления.

Тем не менее, не смотря на свои преимущества, система управления на основе уравнения (24) не может корректно использоваться, если динамическая модель системы неизвестна или не определена.

* 1. **Метод адаптивного управления синхронизацией**

Так как система управления н основе уравнения (24) не подходит для управления системой с неизвестной динамической моделью, как в большинстве практических задач, необходим управляющий алгоритм, нечувствительный к неопределенностям. Кроме того, поскольку внешние возмущения также могут влиять на систему, желательно чтобы система управления также была робастной по отношению к этим возмущениям. Рассмотрим объединение подхода перекрестного управления и адаптивного управления для решения проблемы робастности при синхронизации движения по нескольким осям.

Динамическая модель i-й оси может быть представлена уравнением (18) с добавлением внешних возмущений:

(25)

где обозначает эффект от воздействия силы трения и некоторыми другими, неопределенными возмущениями.

Определим как вектор, содержащий неизвестные параметры моделирования в уравнении (25). Тогда динамика системы может быть представлена как:

(26)

где – регрессионная матрица. Так как значение динамического параметра на практике трудно определить, определим оценку этого параметра, как . Определим также оценку параметров и как и соответственно. Тогда на основании уравнений (19) и (23), адаптивный контроллер для i-й оси может быть представлен как:

(27)

Оценочный параметр подчиняется закону:

(28)

где – диагональная положительная матрица коэффициентов усиления. Обозначив:

(29)

как оценочную ошибку. Тогда закон адаптации (28) может быть представлен как:

Подставляя (27) в (26) получим уравнение динамики замкнутой системы:

(30)

где , и .

Таким образом, подход перекрестного управления синхронизацией может быть применен к адаптивным системам управления для решения проблемы робастности при синхронизации движения, при наличии внешних неучтенных возмущениях. Кроме того, адаптивное управление синхронизацией гарантирует что ­ошибка позиционирования и ошибка синхронизации стремятся к нулю одновременно.

1. **Решение прямой и обратной задачи кинематики для двухзвенного манипулятора**

Для систематического и обобщённого подхода к описанию и представлению расположения звеньев манипулятора (исполнительных механизмов робота) относительно заданной абсолютной системы координат применяют матричную и векторную алгебру.

Звенья манипулятора могут совершать вращательное и/или поступательное движение относительно абсолютной системы координат, оси которой параллельны осям сочленений звеньев..

* 1. **Прямая задача кинематики**

Прямая задача кинематики заключается в нахождении координат конца кинематической цепи, при заданных длинах звеньев и углах между ними[1].

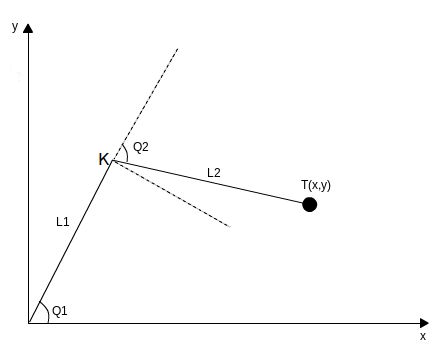


Рисунок 4. Простейшая двухзвенная кинематическая цепь.

В данном случае, заданы углы , а также длины звеньев , необходимо найти координаты *x, y* точки *T*. Для решения этой задачи введем вторую систему координат, которая имеет начало координат в точке *K*. Ось в ней является продолжением первого звена, а ось перпендикулярна ему.  
 Сначала необходимо найти смещение начала координат второй системы относительно первой (координаты точки *K* в первой системе координат):

(31)

Далее аналогичным образом можно найти координаты точки *Т* во второй системе координат.

(32)

По рисунку видно, что в общей координатной системе, звено повёрнуто относительно звена L1 на угол . Тогда в общей системе координат, координаты точки *T* можно найти как:

(33)

* 1. **Обратная задача кинематики**

Обратная задача кинематики состоит в нахождении углов между звеньями, при известных координатах конца кинематической цепи и длинах звеньев. Таким образом, с ее помощью можно найти углы, на которые нужно повернуть звенья для того, чтобы рабочий орган манипулятора, либо крайняя точка последнего звена любого другого устройства оказалась в заданной точке.

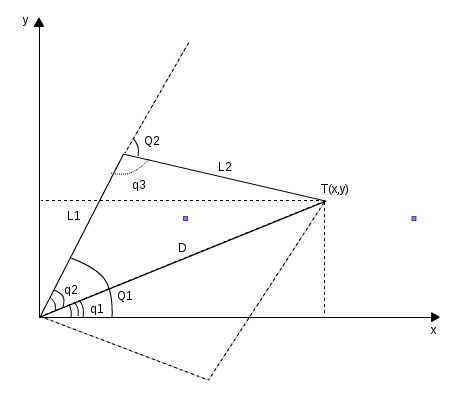


Рисунок 5. Дополнительные построения для решения обратной задачи кинематики.

Исходя из теоремы косинусов, для плоского треугольника, у которого стороны и угол , который противолежит стороне , справедливо соотношение:

(34)

Применяя к нашему случаю получим:

, где

(35)

Выразив получим:

(36)

(37)

Отсюда можно найти :

(38)

где знак в числителе обозначает положение плеча манипулятора: при положительном знаке, плечо направлено вверх, при отрицательном – вниз. Угол можно выразить через угол как:

(39)

* 1. **Прямая задача кинематики для линейных скоростей**

Для решения прямой задачи кинематики относительно линейной скорости инструмента манипулятора, необходимо найти производные по времени уравнений (33):

(40)

* 1. **Обратная задача кинематики для линейных скоростей**

Чтобы получить угловые скорости из линейной скорости инструмента манипулятора, можно использовать обратную матрицу Якоби:

(41)

Матрица Якоби для прямого преобразования имеет вид:

Последние четыре ряда матрицы можно опустить, так как они не влияют на наши преобразования. Тогда обратная матрица будет иметь вид:

1. **Динамическая модель двухзвенного манипулятора**

Для получения уравнений динамики, будем использовать метод Лагранжа-Эйлера, так как он наиболее полно описывает динамику манипулятора. В уравнении Лагранжа-Эйлера[1]:

(42)

*L –* функция Лагранжа которая определяется как разность полной кинетической и полной потенциальной энергии манипулятора, – обобщенная координата манипулятора, – первая производная по времени обобщенной координаты, – обобщенные силы, создаваемые в i-м сочленении для осуществления движения i-го звена. В качестве обобщенных координат будем использовать углы поворота манипулятора - и , так как они непосредственно доступны для измерения. Запишем уравнение динамики манипулятора в матричном виде:

(43)

здесь – вектор обобщенных сил - , - вектор обобщенных координат, – вектор обобщенных скоростей, – вектор обобщенных ускорений, – симметричная матрица размерностью , элементы которой задаются выражением:

(44)

– вектор кориолисовых и центробежных сил, – вектор гравитационных сил.

Составим матрицы преобразования однородных координат для двух звеньев. Данные матрицы преобразуют координаты произвольной точки относительно i-й системы координат в координаты этой же точки относительно (i-1)-й системы координат. Для первого и второго звена соответственно:

Матрицы являются производными матриц по обобщенным координатам

Матрицы псевдоинерции формируются в соответствии с предположением о том, что звенья представляют собой стержни длины и и массы и , масса груза представляется в виде точечной массы , закрепленной на конце второго звена:

Теперь можно найти элементы матрицы :

Составляющие вектора кориолисова ускорения :

Составляющие вектора гравитационных сил:

1. **Алгоритм управления**

Далее сравним две методики управления системой: управление без применения синхронизации и управление с учетом синхронизации.

* 1. **Классическое управление с помощью ПД-регулятора**

ПД-регулятор - это параллельно соединенные пропорциональное и идеальное дифференцирующее звенья. Выходной сигнал ПД-регулятора зависит от ошибки регулирования и от производной от этой ошибки (от скорости изменения ошибки):

(45)

где и коэффициенты усиления пропорциональной и дифференцирующей части. Подставим (45) в (43):

(46)

Таким образом, необходимо выбрать коэффициенты усиления таким образом, чтобы уравнение (46) выполнялось.

* 1. **Добавление контура синхронизации к ПД-регулятору**

Аналитические рассуждения для нашей задачи представлены в пункте 1.3. Определим ошибку синхронизации как:

(47)

Как из пункта 1.5, следует, что общая ошибка позиционирования:

где положительная матрица коэффициентов усиления, – ошибка синхронизации (зависит от времени). Тогда общий сигнал управления будет иметь вид:

(48)

где – положительная матрица, и – положительные коэффициенты.

1. **Проверка методики управления**

Чтобы проверить корректность предложенной методики управления синхронизацией, промоделируем систему и объект управления в среде моделирования Simulink. Объект управления представляет собой двухзвенный манипулятор. Длина каждого звена – 1 м, масса – 1 кг, центры тяжести сосредоточены в геометрических центрах звеньев.

Система состоит из пары двухзвенных манипуляторов. Задача контроллера управления траекторией движения – перемещать инструмент манипулятора по заданной траектории, задача контроллера синхронизации – сохранять постоянным расстояние d – 0,5 м. между инструментами (рисунок 2).

Модель системы представлена в приложении А. Результаты моделирования представлены на рисунках 5 и 6.

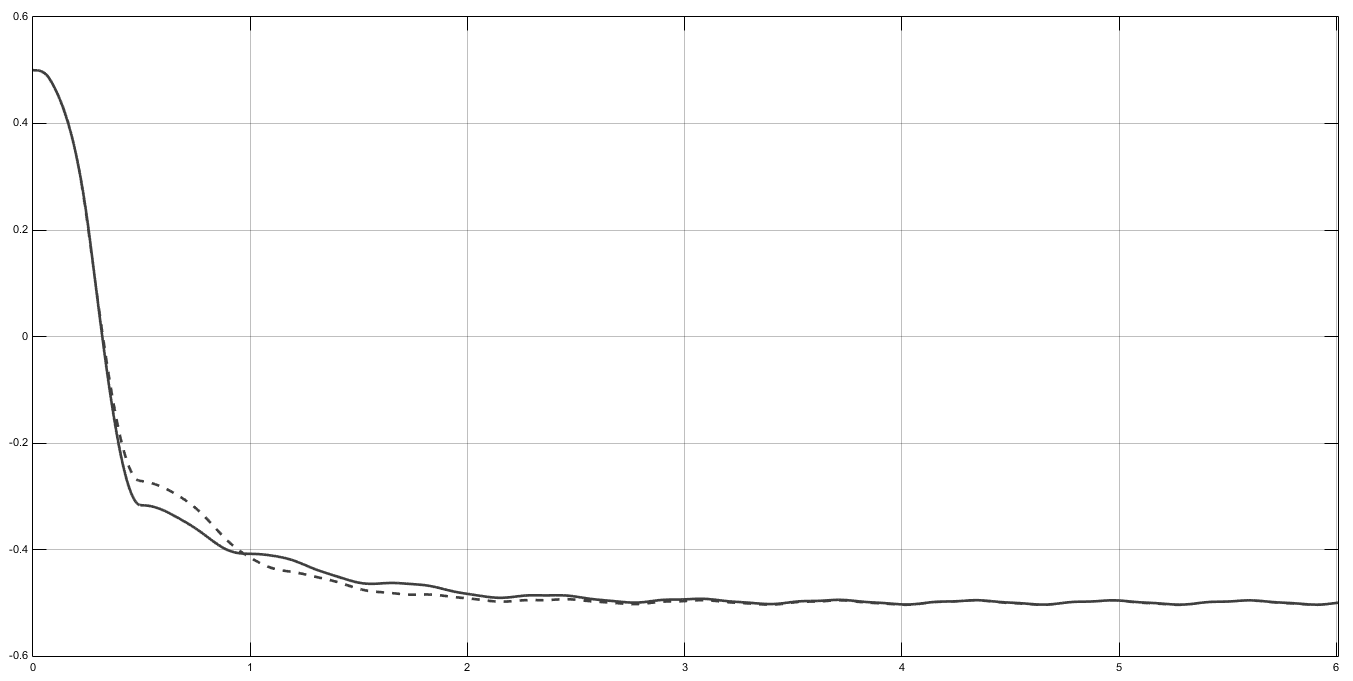


Рисунок 6. Ошибка между положениями инструментов манипуляторов по оси x. Пунктирной линией обозначена ошибка при применении дополнительного контура синхронизации

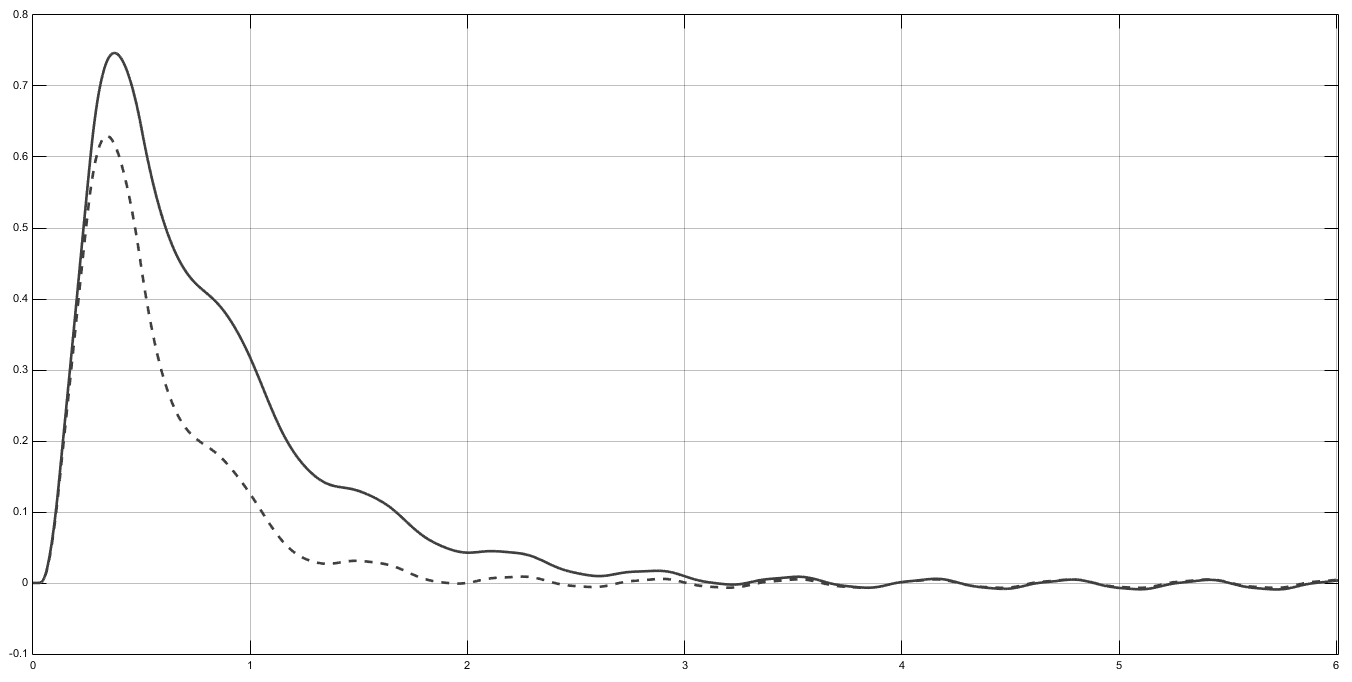


Рисунок 7. Ошибка между положениями инструментов манипуляторов по оси y

Пунктирной линией обозначена ошибка при применении дополнительного контура синхронизации

Видно, что при управлении с применением дополнительного контура синхронизации, ошибки быстрее сходятся к желаемым значениям. Особенно это заметно по оси y.

Таким образом, применение описанной методики позволяет улучшить качество управления системой.

**Заключение**

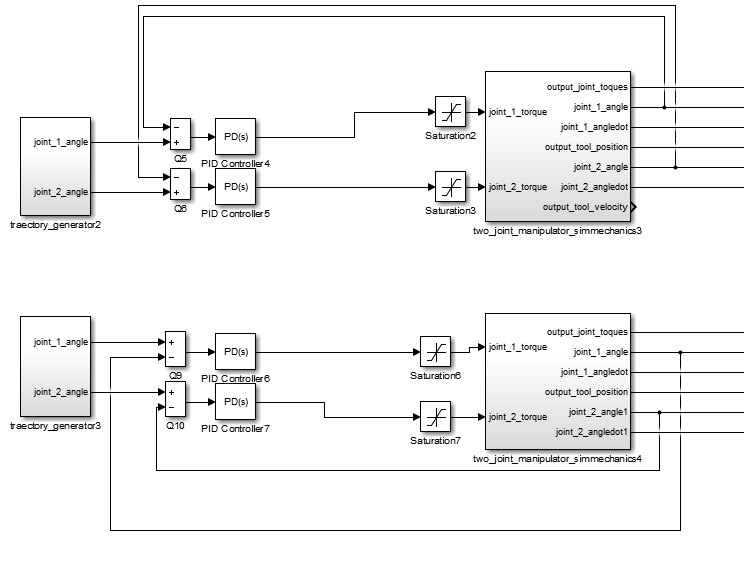
В данной работе было проведено исследование методов управления несколькими агентами, а именно метода управления по перекрестным связям. Была описана методика постановки задачи управления, составлена динамическая модель системы, а также проведено моделирование.

Результаты моделирования показали, что при введении дополнительного контура синхронизации к основному контуру управления, характеристики переходных процессов системы улучшаются.  **Список использованных источников**

1. Тертычный-Даури В.Ю. Динамика робототехнических систем. Учебное пособие. — СПб.: НИУ ИТМО, 2012. — 128 с.
2. Dong S. Synchronization and control of multiagent systems. New York, CRC Press, 2011.
3. Yoav S., Kevin L-B. Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations. New York, Shoham and Leyton-Brown, 2010.
4. L. Feng., Y. Koren., J. Borenstein. Cross-coupling motion controller for mobile robots, 1993.
5. Rachid ALAMI. Multi-robot cooperation: architectures and paradigms, 2009.
6. Slotine J.-J. E., Li W. On the adaptive control of robot manipulators // The international journal of robotics research. — 1987. — Vol. 6, no. 3. — Pp. 49–59.
7. Green A., Sasiadek J. Z. Dynamics and trajectory tracking control of a two-link robotmanipulator // Journal of Vibration and Control. — 2004. — Vol. 10, no. 10. — Pp. 1415–1440.
8. Wit C. C. de, Siciliano B., Bastin G. Theory of robot control. — Springer Science & Business Media, 2012.
9. A synchronization approach to trajectory tracking of multiple mobile robots while maintaining time-varying formations / D. Sun [et al.] // Robotics, IEEE Transactionson. — 2009. — Vol. 25, no. 5. — Pp. 1074–1086.
10. Sciavicco L., Siciliano B. Modelling and control of robot manipulators. — Springer Science & Business Media, 2012.

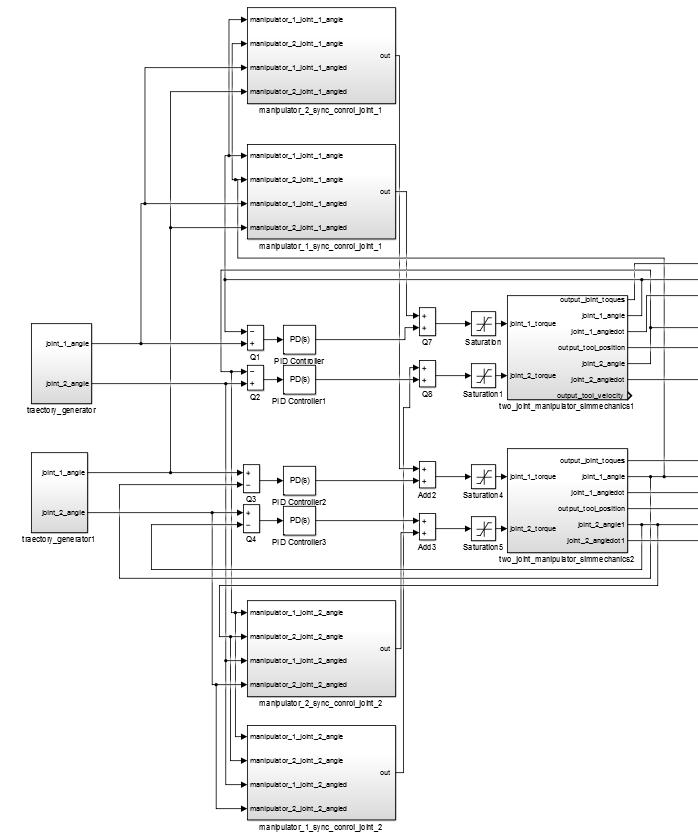
**Приложение А**

**Модель системы без использования контура синхронизации**

****

**Приложение Б**

**Модель системы c использованием контура синхронизации**

****