Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт машиностроения, материалов и транспорта

Высшая школа автоматизации и робототехники

**ОТЧЁТ ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**Разработка системы управления для пятизвенного манипулятора c ременными передачами на шарниры**

Выполнил

студент гр. 3331506/60401 <*подпись*> Д.Д. Сидоренко

Руководитель

старший преподаватель <*подпись*> А.С. Габриель

Научный консультант <*подпись*> И.А. Васильев

доцент, к.т.н.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Санкт-Петербург

2012

**Реферат**

На 33 с., 9 рисунков, 3 таблицы, 3 приложения

РОБОТОТЕХНИКА, МАНИПУЛЯТОР, ОБРАТНАЯ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ. БОРТОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ, ФОРМАЛИЗМ ДЕНАВИТА – ХАРТЕНБЕРГА, ОБОБЩЕННЫЕ КООРДИНАТЫ.

.

**Содержание**

[Введение 5](#_Toc30411698)

[1 Постановка задачи 6](#_Toc30411699)

[1.1 Кинематическая схема манипулятора 7](#_Toc30411700)

[2 Обзор готовых решений 9](#_Toc30411701)

[2.1 Matlab Robotic System Toolbox 9](#_Toc30411702)

[2.2 ROS MoveIt 10](#_Toc30411703)

[3 Разработка алгоритма управления 11](#_Toc30411704)

[3.1 Решение через ДХ представление 12](#_Toc30411705)

[3.2 ОЗК методом ДХ 16](#_Toc30411706)

[3.3 Геометрический метод решения ОЗК 19](#_Toc30411707)

[3.4 Защита от столкновений 21](#_Toc30411708)

[4 Расчет углов шаговых двигателей и сервоприводов 24](#_Toc30411709)

[4.1 Сравнение решений 27](#_Toc30411710)

[Вывод 28](#_Toc30411711)

[Список литературы 29](#_Toc30411712)

[Приложение 1 31](#_Toc30411713)

[Приложение 2 32](#_Toc30411714)

[Приложение 3 33](#_Toc30411715)

**Перечень сокращений и условных обозначений**

В настоящем отчете по НИР применяются следующие обозначения и сокращения.

ЗУ – Захватное устройство

ДХ – Денавита – Хартенберга

ПЗК – прямая задача кинематики

ОЗК – обратная задача кинематики

ШД – шаговый двигатель

МР – мотор-редуктор

ЗР – задающие рукоятки

ШД – шаговый двигатель

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор

Введение

# Постановка задачи

## Кинематическая схема манипулятора

На рисунке 1 приведена кинематическая схема манипулятора. [10]



Рисунок 1

На валу мотор-редуктора [8, 7] 1 (МР1) установлен шкив 1. С обратной стороны установлен инкрементальный энкодер. МР1 приводит в движение ось колонны манипулятора. к корпусу колонны присоединены мотор-редуктора 2, 3 и 4.

МР4 через неразъемную муфту со шпоночным пазом передает вращение на вал IV. На валу IV жестко закреплены шкив 5 и подвижная головка инкрементального энкодера. Корпус энкодера в свою очередь жестко соединен с корпусом колонны. Так же вал IV соединён с корпусом колонны через шариковый опорный подшипник. Вращение со шкива 5 передается на шкив 6, который в свою очередь жестко закреплен на валу V с помощью шпоночного соединения. Вал V жестко соединен с корпусом плеча. Вышеописанная кинематическая цепь приводит в движение плече манипулятора.

Конструкция вала II, соединенного с МР2, аналогична валу VI. Вращательное движение со шкива 3 передается на шкив ступичный 7, который закреплен на валу V через пару шариковых опорных подшипников. Далее вращательное движение со ступичного шкива 7 передается на шкив 10, который жестко соединен с валом VI с помощью шпоночного соединения. Вал VI в свою очередь жестко соединен с корпусом предплечья. Вышеописанная кинематическая цепь приводит в движение предплечье манипулятора. Особенность поворота шарнира предплечья состоит в том, что обобщенные координаты поворота предплечья зависят не только от координат МР2, но и от обобщенных координат плеча.

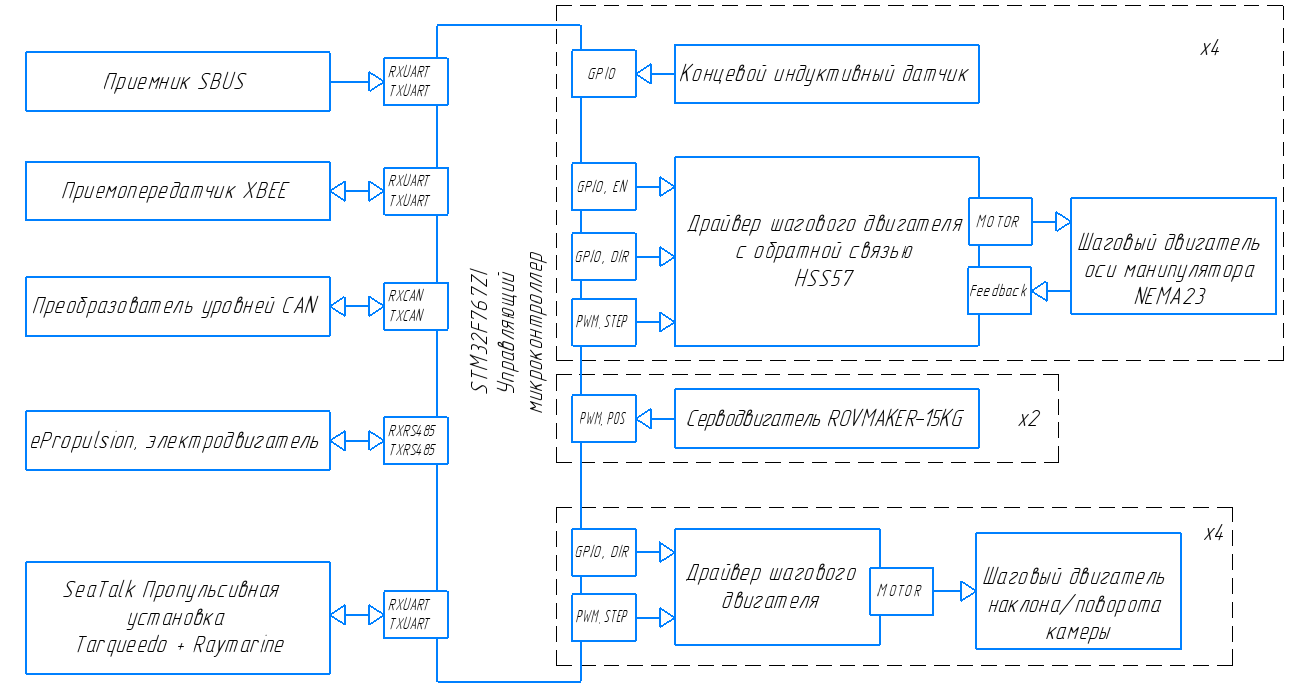
Конструкция вала III аналогична ранее рассмотренным. Передача момента на кисть манипулятора осуществляется аналогично с передачей момента на предплечье, за одним исключение, обобщенные координаты крена кисти зависят не от одной родительской координаты, а от двух.

Согласованное изменением координат МР1, МР2, МР3 обеспечивают изменение декартовых координат рабочего инструмента, а изменение координат МР4 и Д1 изменение ориентации устройства.

Данная кинематическая схема создает особенности расчета управляющих сигналов мотор-редукторов в зависимости от положения ременных приводов в пространстве. Обобщенные координаты углов между плечом и предплечьем, а также между предплечьем и кистью зависят не только от координат управляющих приводов, но и то обобщенных координат родительских звеньев. Для корректного расчета управляющих сигналов МР3 и МР4 необходимо добавить блок расчета новых управляющих сигналов.

# Электрическая функциональная схема манипулятора

Для понимания особенностей проектирования системы управления манипулятором на рисунке 123 приведена электрическая функциональная схема управляющего контроллера манипулятора. На схеме опущены преобразователи уровней управляющих сигналов приводов и датчиков. Так же на схеме опущены преобразователи уровней UART и RS485. Для удобочитаемости схема питание узлов и гальванические развязки также не показаны.



В данной работе подробно рассматривается управление шаговыми двигателями осей манипулятора и серводвигателями, обеспечивающими крен ЗУ манипулятора и рабочее движение ЗУ манипулятора.

Как видно из рисунка 123 для управления шаговым двигателем необходимо использовать 2 пина ввода-вывода для задания направления вращения и активации драйвера. А также для установки скорости вращения используется аппаратная генерация ШИМ сигнала и отдельный вывод таймера микроконтроллера для каждого двигателя. Требуется использовать отдельный таймер для каждого ШД, так как управление происходит благодаря изменению частоты ШИМ сигнала. Каждый передний фронт ШИМ сигнала сообщает драйверу, что необходимо повернуть ротор ШД на один микрошаг в сторону, соответствующую направлению, заданному пином DIR. При этом для корректной работы микроконтроллера драйвера производитель рекомендует поддерживать скважность сигнала близкой к 50 процентам. Драйвер шагового двигателя HSS57 осуществляет обратную связь с шаговым двигателем с помощью инкрементального энкодера, установленного на оси двигателя. Данная функция драйвера обеспечивает отработку команд управления и дает защиту от пропуска шагов.

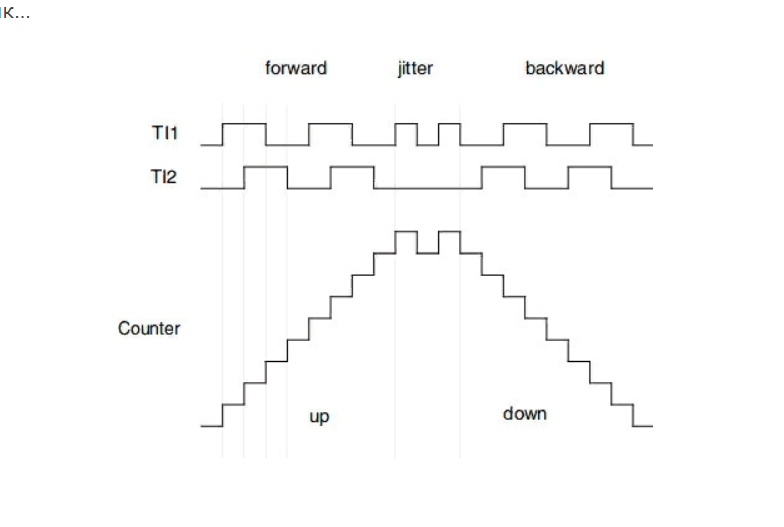
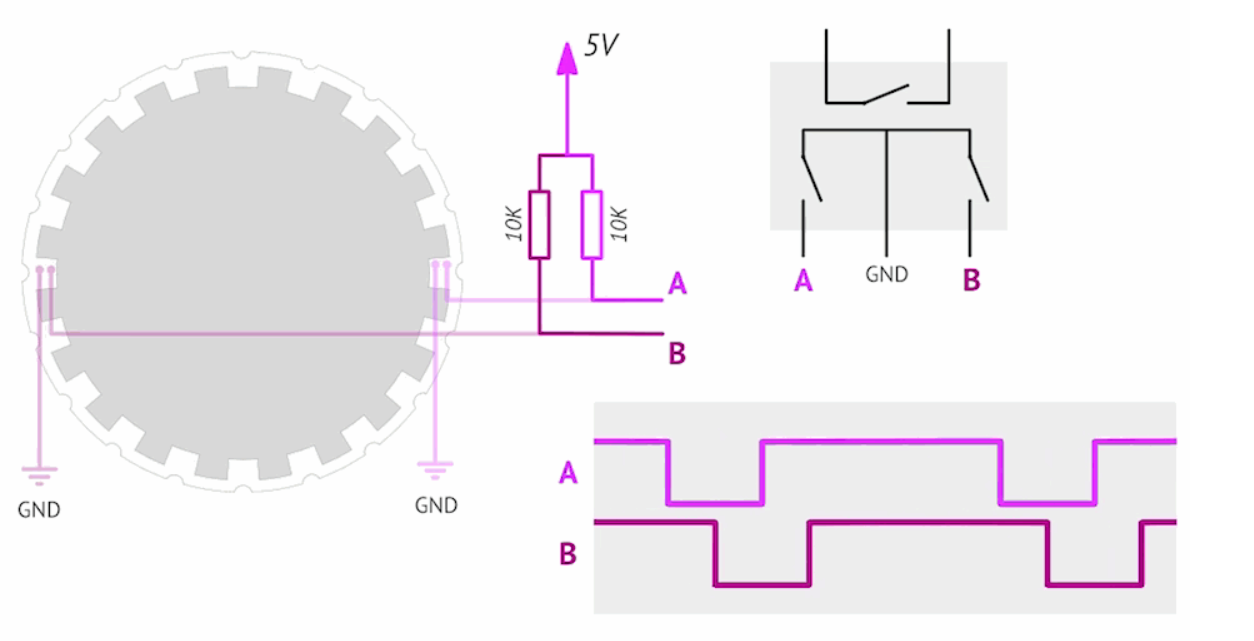
Для управления серводвигателем необходим один управляющий сигнал, задающий положение ротора привода. В корпусе серводвигателя установлен абсолютный энкодер, обеспечивающий обратную связь по положению. Управляющий сигнал представляет из себя ШИМ сигнал с частотой 600Гц. Положение ротора задается путем изменения скважности ШИМ сигнала, которая может меняться от 100мкс до 300мкс. Угол поворота серводвигателя ограничен 120 градусами, что соответствует скважности в 300мкс. Так как управление серводвигателя построено на изменении скважности ШИМ сигнала, то целесообразно будет выделить один таймер с двумя внешними каналами для генерации управляющих сигналов.

# Отслеживание положения

Для управления каждым шаговым двигателем используются два сигнала микроконтроллера STEP и DIR. Сигнал STEP задает скорость вращения, каждый передний фронт сигнала сообщает драйверу, что необходимо повернуть вал двигателя на один шаг, полушаг или микро-шаг. Сигнал DIR задает направление вращения, при положительном уровне сигнала двигатель вращается во часовой стрелке, при отрицательном против. Для задания сигнала STEP используются аппаратные таймеры, для каждого двигателя используется отдельный таймер. Сигнал DIR задается GPIO выводом.

Шаговые двигатели оснащены инкрементальными энкодрами, подключаемыми к драйверу шаговых двигателей, что позволяет драйверу отслеживать пропуски шагов двигателя и корректировать положение.

Для осуществления обратной связи по положению между микроконтроллером и шаговым двигателей применяются различные методы. Самый простой и надежный метод, это отслеживание сигналов энкодеров, подключенных к драйверу шаговых двигателей. Для реализации данного метода в микроконтроллерах STM32 предусмотрена опция таймеров для аппаратной обработки сигналов инкрементальных энкодеров. Для реализации данной опции необходимо для каждого двигателя выделить таймер, способный работать в энкодерном режиме, и дополнительно два вывода микроконтроллера, связанные с двумя каналами таймера. Обрабатывать сигнал энкодеров способны таймеры 1-5 и 8.



//описать принцип работы энкодера и схему с фотодиодом

Второй метод отслеживания положения представляет из себя уже не прямую, а косвенную обратную связь двигателя с микроконтроллером. Так как драйвер шагового двигателя обеспечивает своевременное коммутирование обмоток, и зачёт обратной связи драйвера и двигателя с энкодером обеспечивается отсутствие пропуска шагов и обработка управляющих команд в реальном времени, можно разделить линию обратной связи. Таким образом драйвер обрабатывает информацию, поступающую с энкодеров, а микроконтроллер обрабатывает ШИМ сигнал, генерируемы им же. Таймеры в микроконтроллерах STM32 могут работать не только в режиме генерации ШИМ сигнала, но и в режиме захвата сигнала. Таким образом можно отслеживать какое количество импульсов было послано на драйвер двигателя, соответственно на какое количество шагов повернулся вал двигателя. Для данного метода так же необходимо при каждом срабатывании прерывания на следящем таймере учитывать какой уровень задан на управляющем пине DIR, и в зависимости от него инкрементировать, либо декрементировать текущее положение двигателя. Для реализации представленного метода так же необходимо задействовать дополнительный таймер и дополнительный вход микроконтроллера. Стоит отметить, что некоторые таймеры 1-5 и 8 могут работать в подчинённом режиме, что позволяет назначить одному таймеру роль ведущего, а второму ведомого. Данная опция позволяет отслеживать сигналы внутри микроконтроллера не соединяя выводы.

Описанные выше два метода подразумевают использование дополнительного таймера для каждого шагового двигателя. Ниже в таблице 123 приведены возможности таймеров микроконтроллера STM32F767ZI.

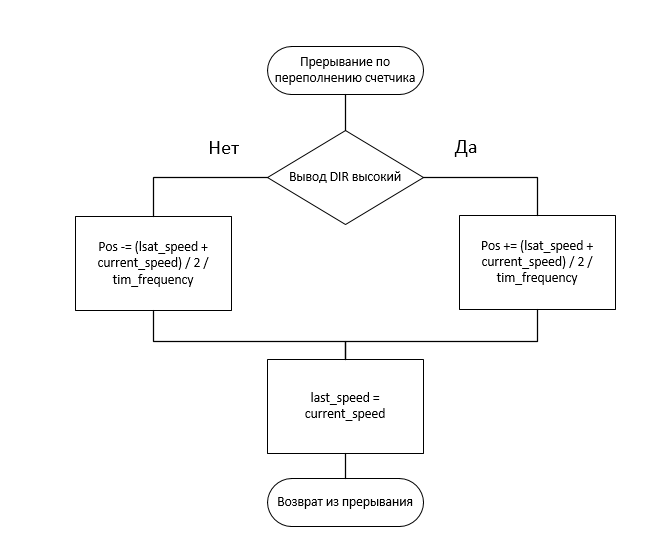
|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер таймера | Энкодерный режим работы | Возможность работать в режиме ведущего/ведомого | Возможность захвата внешнего ШИМ | Количество внешних ШИМ каналов |
| 1 | + | + | + | 6 |
| 2 | + | + | + | 4 |
| 3 | + | + | + | 4 |
| 4 | + | + | + | 4 |
| 5 | + | + | + | 4 |
| 6 | - | - | - | 0 |
| 7 | - | - | - | 0 |
| 8 | + | + | + | 2 |
| 9 | - | - | + | 1 |
| 10 | - | - | - | 1 |
| 11 | - | - | - | 1 |
| 12 | - | - | - | 1 |
| 13 | - | - | - | 1 |
| 14 | - | - | - | 1 |

Как видно из таблицы 123, при использовании энкодерного метода для манипулятора, имеющего 6 степеней свободы, соответственно 6 шаговых двигателей необходимо будет задействовать все таймеры, имеющие внешние каналы, 1-5 и 8 для обработки энкодеров и 9-14 для генерации ШИМ сигнала. Что делает невозможным, так как необходимо также управлять захватным устройством.

//как-то обосновать почему нельзя использовать все

Использование ведущих и ведомых таймеров невозможно, потому что только 6 таймеров обладают данной опцией, что дает возможность управления только тремя двигателями. Использование режима захвата приводит к тому же, что и энкодерный режим – необходимо задействовать все таймеры, имеющие внешние каналы.

Вышеописанное приводит к необходимости использовать меньшее количество таймеров для отслеживания положения вала шагового двигателя. Предлагается применить один таймер, который по периодическому прерыванию будет вычислять текущее положение ротора двигателя путем дискретного интегрирования текущей скорости. Для реализации данного метода можно использовать один таймер, который даже может не иметь внешних выводов, что позволит значительно сократить использованную периферию. Схема алгоритма работы интегрального метода представлена на рисунке 123, программная реализация алгоритма на микроконтроллере STM32F767ZI представлена в приложении 1.



На рисунке 123 Pos – позиция ротора, last\_speed – скорость на прошлом срабатывании прерывания, current\_speed – текущая скорость, tim\_frequency – частота таймера, использующегося для вычисления положения. Вычисление положения ротора осуществляется по методу трапеций.

Точность определения положения ротора шагового двигателя интегрального метода зависит от частоты вызова интегрального прерывания, а также от характера изменения скорости. Для компенсации ухода расчетных значений от реальных в конструкции рассматриваемого манипулятора присутствую концевые датчики.

Управление серводвигателями происходит путем задания скважности ШИМ сигнала. Период ШИМ для всех серводвигателей должен быть одинаковым, а скважность задает угол поворота вала двигателя. Таким образом для управления серводвигателями используется один аппаратный таймер с двумя каналами, позволяющий задавать разную скважность на двух выводах, при одинаковом периоде сигнала.

Система управления расположена на микроконтроллере STM32F767ZI. Управляющие сигналы для шаговых двигателей задаются ШИМ сигналом и направлением вращения.

# Сравнение методов вычисления положения

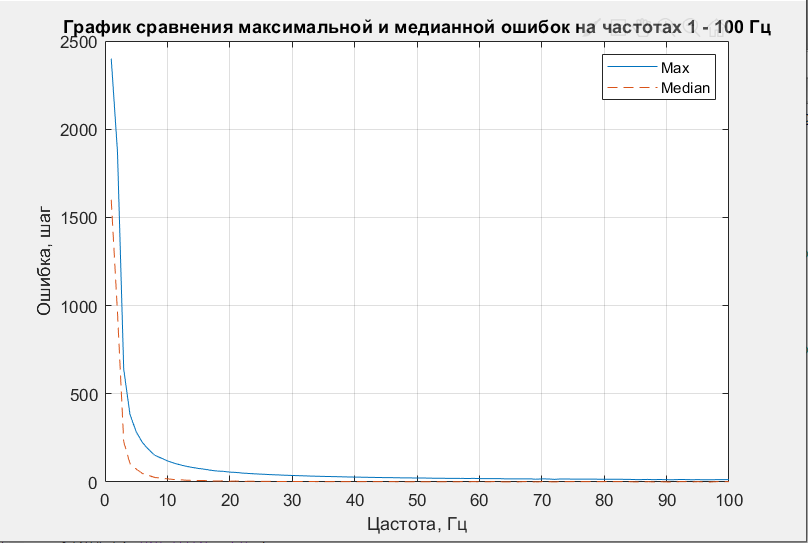
В рамках проделанной работы был проведен эксперимент для сравнения трех методов определения положения ротора шагового двигателя. Во время эксперимента движение ротора двигателя имело равномерный и ускоренный характер, что позволяет оценить погрешность вычисления положения по интегральному методу. В рамках эксперимента драйвер двигателя настроен на 2000 микрошагов на оборот ротора, что соответствует количеству шагов энкодера, считываемых таймером микроконтроллера за один оборот. Из-за особенностей аппаратной обработки энкодеров на STM32 каждый импульс считается 2 раза, соответственно дискретизация (d) положения ротора, считанная с энкодера, также составляет 2 шага, или 0,36 градуса, что видно из формулы 123

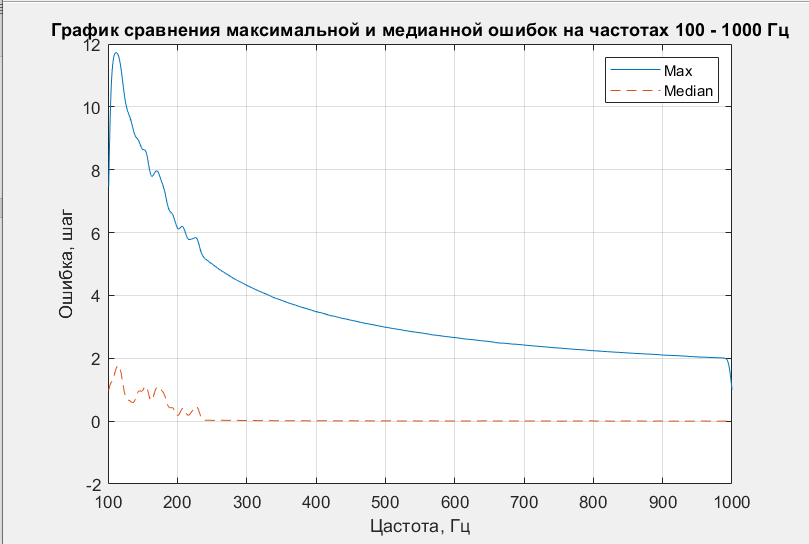
|  |  |
| --- | --- |
|  | (54) |

Для оценки необходимой частоты срабатывания прерывания для вычисления положения по интегральному методу необходимо сравнить вычисленное значение положения ротора со значением, полученным путем обработки энекдеров, при разных частотах срабатывания прерывания.

Для оценки точности определения положения ротора на разных скоростных режимах, заданная скорость во время проведения эксперимента изменялась по закону синуса, так как исходя из общего решения обратной задачи кинематики для манипуляторов с шарнирными сочленениями при прямолинейном движении ЗУ скорость сочленения меняется также по закону синуса. Полученные в ходе эксперимента зависимости максимальной и медианной ошибки положения ротора от частоты срабатывания прерываний позволяют оценить необходимую частоту таймера, для генерации прерываний интегрального метода вычисления положения ротора шагового двигателя.

На рисунках 123 представлены график зависимости максимальной и медианной ошибок положения ротора от частоты срабатывания прерывания.





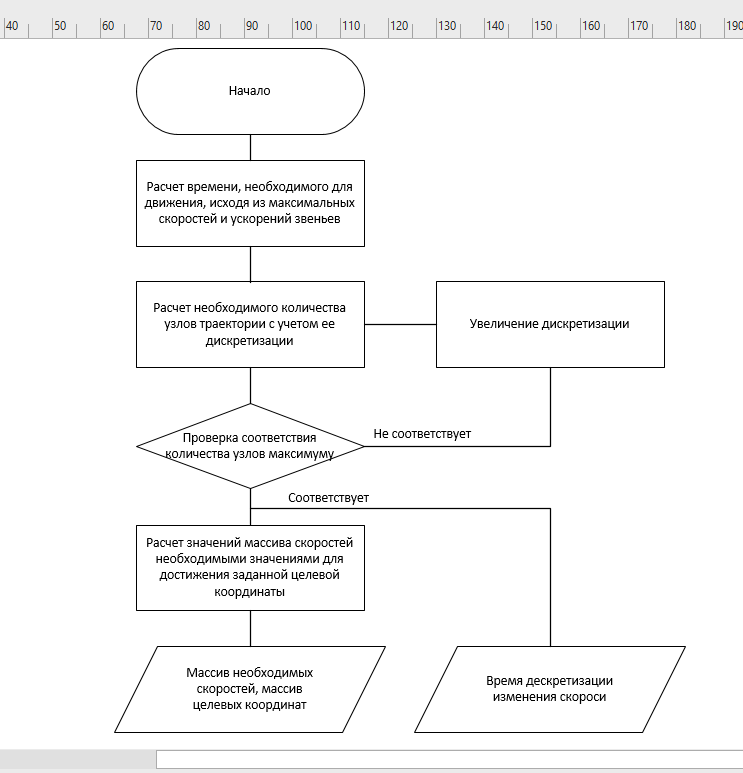
Как видно из рисунка 123 при частоте 100 Гц медианная ошибка падает ниже размера дискретизации положения, а при частоте около 1000 Гц максимальна ошибка положения ротора также падает ниже размера дискретизации. Из чего можно сделать вывод, что минимально необходимая частота срабатывания прерывания составляет 100 Гц, но при такой частоте необходимо применять фильтры сглаживания выбросов, такие как. При использовании частоты в 1000 Гц полученные значения положения ротора будут максимально соответствовать реальным и необходимость в фильтрации пропадает.

Так же для оценки необходимой частоты срабатывания прерываний необходимо учесть время обработки одного прерывания, так как оно имеет наибольший приоритет, значит другие прерывания от других событий не смогут вступить в работу, до тех пор, пока не завершится интегральное прерывание. Так же стоит учесть, что микроконтроллер с системой управления манипулятором на борте помимо вычисления положения должен выполнять большое число действий, таких как отправка и прием сообщений по UART и CAN, расчет целевых координат, предупреждение столкновений, изменение скорости вращения звеньев и так далее, что также требует задействовать ресурсы ядра микроконтроллера. Следовательно, если время обработки одного прерывания интегрального таймера будет велико, то для остальных задач у микроконтроллера не останется свободного вычислительного времени ядра. Согласно проведенным измерением время, необходимое на выполнение одного прерывания для интегрального таймера для расчёта положения четырех двигателей составляет 64мкс, при системной частоте ядра равной 96 МГц. Значит при частоте прерывания 1000 Гц время, затрачиваемое на выполнения интегрального прерывания, составляет 6,4% от общего вычислительного времени микроконтроллера. При необходимости частоту срабатывания интегральных прерываний допустимо снижать со 300 Гц, тогда медианная ошибка останется близкой к нулю, а выбросы текущей ошибки положения ротора до 4х шагов необходимо фильтровать применяя фильтр высоких частот, так как исходя из результатов эксперимента значение ошибки положения ротора, при низких частотах срабатывания прерывания, имеют высокочастотных характер изменения, причем на частотах более 40 Гц частота резкого изменения ошибки положения ротора совпадает с частотой срабатывания интегрального прерывания.

Регулятор положения ротора шагового двигателя.

Для перемещения ЗУ между точками в рабочей области манипулятора применим метод задания скоростей, основанный на массиве требуемых скоростей, последовательное применение которых, позволяет достичь заданного положения. Суть метода заключается в разбиении траектории между двумя точками на множество точек в пространстве и дальнейшее вычисление необходимых скоростей для достижения последующей точки в минимально возможное время. Чаще всего траектория между текущей точкой ЗУ и целевой является отрезок прямой. Возможны два варианта заполнения массива скоростей. Первый вариант применяется, когда выделенный размер массива больше либо равен требуемому объему скоростей, согласно степени дискретизации изменения скорости. Тогда каждое следующее значение из массива скоростей будет применяться через равные промежутки времени. Второй вариант применяется, когда выделенный размер массива скоростей недостаточен для хранения всего объема необходимых данный, тогда применяется метод увеличения дискретизации изменения скорости в режимах малого ускорения звеньев, либо его отсутствия. Так же следует рассмотреть вариант, когда звенья не успевают выйти на максимальную скорость, что приводит к треугольной диаграмме скоростей, в отличии от трапециевидной в предыдущем случае.

Схема работы метода с участком движения ЗУ с постоянной скоростью представлена на рисунке 123.



Из рисунка 123 видно, что применение данного метода создает необходимость хранения большого количества данных. Так же при необходимости перемещать ЗУ на большие расстояния появляется необходимость увеличение размеров массивов доя хранения скоростей и положений ЗУ, либо уменьшение дискретизации изменение скорости, а, следовательно, увеличение частоты процедуры изменения скорости, что неизбежно приведет к более резкому движению звеньев манипулятора и ЗУ.

Данный метод применяется в случаях, когда невозможно обеспечить расчет новой целевой координаты, а соответственно и текущих скоростей в реальном времени. Используемый в данной работе микроконтроллер STM32F767ZI обладает аппаратной поддержкой плавающей точки, что позволяет совершать операции над дробными и целыми со сравнимыми скоростями. Согласно проведенному эксперименту время расчета координат двигателей для достижения целевой координаты составляет 4 мc, что позволяет изменять значение скорости 250 раз в секунду, но такая большая дискретизация не требуется, достаточно менять скорость с частотой 10 Гц для плавного движения звеньев. Для применения данного метода необходимо реализовать алгоритм изменения скоростей звеньев не с постоянной частотой, так как для удобства реализации дискретизация изменения скорости измеряется относительно расстояния, а не времени, как в прошлом методе. Траектория разбивается на точки, расстояние между которых характеризует плавность работы манипулятора. Важно заметить, что расстояние между точками траектории не является равным, так в начале и в конце траектории точки находятся ближе друг к другу, это позволяет реализовать плавное ускорение и замедление ЗУ. Таймер, используемый для интегрального расчета положения также способен генерировать события, при достижении заданного положения звена. Данное событие запускает расчет следующих скоростей и положений звеньев, а также их обновление в регистрах таймеров. Диаграмма алгоритма движения манипулятора без использования массива скоростей представлена на рисунке 123.

Вывод

Список литературы

1. Guo, D., Ju, H., Yao, Y., Ling, F., & Li, T. (2009). Efficient Algorithms for the Kinematics and Path Planning of Manipulator. 2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence.
2. Kondak, K., Huber, F., Schwarzbach, M., Laiacker, M., Sommer, D., Bejar, M., & Ollero, A. (2014). Aerial manipulation robot composed of an autonomous helicopter and a 7 degrees of freedom industrial manipulator. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
3. From, P. J., Duindam, V., Pettersen, K. Y., Gravdahl, J. T., & Sastry, S. (2010). Singularity-free dynamic equations of vehicle–manipulator systems. Simulation Modelling Practice and Theory, 18(6), 712–731.
4. Wuthier, D., Kominiak, D., Kanellakis, C., Andrikopoulos, G., Fumagalli, M., Schipper, G., & Nikolakopoulos, G. (2016). On the design, modeling and control of a novel compact aerial manipulator. 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED).
5. Love, L. J., Jansen, J. F., & Pin, F. G. (2004). On the modeling of robots operating on ships. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA ’04. 2004.
6. A revert of the clone armdroid 1 / Derek F. Stubbs. <http://www.theoldrobots.com/Teachmover.html> (20.11.2019)
7. AR2 Robot Documentation / Chris Annin. <https://www.anninrobotics.com> (20.11.2019)
8. <https://www.bcn3d.com/bcn3d-moveo-the-future-of-learning/> , 20.11.2019
9. Шахинпур М. Курс робототехники / Шахинпур М. Пер с англ – М. Мир, 1990 – 572 с, ил.
10. Иванов М.Н. Детали машин / Иванов М.Н., Финогенов В.А. – Высшая школа, 2008 – 480 с, ил
11. Matlab Robotic System Toolbox User`s Guide, 2019 – 294 с.
12. https://github.com/auralius/my-matlab-robotics-toolbox / 20.11.2019

Приложение 1

Приложение 2

Приложение 3