

## Содержание

Введение .....	5
1 Обзор существующих решений .....	7
1.1 Общая концепция силомоментного оцувствления .....	7
1.2 Типовые решения .....	7
2 Постановка задачи .....	12
3 Описание имеющегося оборудования .....	12
3.1 Kawasaki fs06n .....	12
3.2 ATI F/T IP60 Delta .....	13
4 Разработка программного обеспечения .....	16
4.1 Формирование алгоритма управления .....	16
4.2 Структура посылки .....	17
4.3 Управление Кавасаки .....	17
4.4 Внешние управляющие программы. ....	18
4.5 Работа Force Feedback .....	19
5 Синтез управления .....	21
5.1 Идентификация .....	21
5.2 Обработка Сил .....	24
5.3 Обработка Моментов .....	25
5.4 Обработка Сил .....	27
5.5 Обработка моментов .....	28
5.6 Построение регуляторов .....	29
6 Экспериментальные исследования .....	31
6.1 Управление по силам .....	31
6.2 Управление по моментам .....	32
6.3 Результаты экспериментов .....	34
Заключение .....	35
Список использованных источников .....	36
Приложение А. Рабочая зона робота-манипулятора Kawasaki .....	38

КСУИ.112.Р3440.001 ПЗ				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>
<i>Разраб.</i>		Клюнин А.О.		
<i>Пров.</i>		Пыркин А.А.		
<i>Н.контр.</i>		Николаев Н.А.		
<i>Утв.</i>		Бобцов А.А.		
Управление манипуляционным роботом с заданными силами взаимодействия Пояснительная записка				
		<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
		Д	4	38
Университет ИТМО Кафедра СУИ				

## Введение

В многозвенных манипуляторах точность энкодеров, установленных на исполнительных приводах, а также люфты в сочленениях, возникающие в процессе функционирования манипуляторов, не обеспечивают требуемой точности позиционирования рабочего органа робота.

Целью данной преддипломной практики является интеграция управления с использованием датчика ATI F/T IP60 Delta для силомоментного очувствления робота-манипулятора. Силомоментный датчик в сочетании программного обеспечения даёт роботу своего рода тактильную чувствительность. Благодаря этому робот может чутко реагировать на воздействие внешних сил и моментов и, в зависимости от этого, оказывать на деталь целевые силовые воздействия и моменты.

Во множестве современных систем управления задействованы датчики сил и моментов для компенсации возмущающих воздействий, негативно влияющих на точность позиционирования рабочего инструмента. Применение данного типа измерительных средств обеспечивает точную и гибкую отработку технических процессов при существенном сокращении производственных и трудовых затрат. В качестве примеров практических задач, в которых данная технология востребована на практике можно привести следующие:

- Гладкая полировка поверхностей сложной геометрической формы
- Безотрывный рисунок «мягким» инструментом
- Предотвращение аварий из-за непредвиденных перемещений робота в пространстве

Помимо перечисленных выше задач, зачастую в техническом процессе перемещение рабочего инструмента предполагается за счёт не только программного управления, но и непосредственно физического воздействия оператора. В случае большого веса как самого инструмента, так и манипулятора, такого рода управление оказывается не под силу человеку без обработки сил и моментов и усиления исполнительными приводами приложенных физических воздействий. При помощи выбранного типа датчиков можно выделить силы и моменты, которые создаёт инструмент и реагировать только на дополнительные усилия, создаваемые оператором. В этом случае изменение положения, а также ориентации

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

инструмента не будет требовать большой физической силы, что упростит технический процесс.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

## 1 Обзор существующих решений

### 1.1 Общая концепция силомоментного оцувствления

Зачастую управление роботом требует числа каналов, большего чем число степеней свободы, в этих случаях и стоит применять, так называемое оцувствление робота. [1]

В самом общем виде сигнал с силомоментного датчика имеет шесть компонент: три проекции вектора силы и три проекции вектора результирующего момента. В предельно простом случае оцувствление может быть произведено только по одному линейному усилию или моменту. Такое оцувствление применимо в случае, когда необходимо зачистить плоские поверхности или внутренние поверхности цилиндров.

Функциональная схема соответствующей системы оцувствления имеет типовую структуру, включающую собственно датчики силы (момента), предусилитель и блок обработки информации, где осуществляется необходимое преобразование выходного сигнала датчика.

Конечно, главным элементом системы силового оцувствления являются датчики силы, выдающие первичную информацию о силе (моменте). Принцип действия большинства этих датчиков основан на использовании упругого элемента, деформирующегося под действием усилия, и определении величины этой деформации как его меры [2] [3].

Величина деформации в свою очередь определяется с помощью различных датчиков, преобразующих перемещение в электрический сигнал, чаще всего фотоэлектрических, пьезоэлектрических, тензорезистивных.

### 1.2 Типовые решения

#### 1.2.1 Фотоэлектрические преобразователи

Одними из наиболее точных и чувствительных преобразователей являются фотоэлектрические [4]. На Рисунке 1 показан такой датчик. В качестве источника света используется лазерный светодиод. Лазерный луч проецируется на деформируемый упругий элемент и, отражаясь, по-

падает на поверхность фотодиодного преобразователя. Положением светового пятна на поверхности определяется значение выходного сигнала.

### 1.2.2 Пьезопреобразователи

Пьезоэлектрические преобразователи — это устройства, построенные на пьезоэлектрическом эффекте, возникающем в кристаллах, керамике [5] или плёнках и преобразующие механическую энергию в электрическую. Все пьезопреобразователи по принципу работы делятся на три группы:

- а) Преобразователи основанные на прямом пьезоэффекте применяются в приборах для измерения параметров механических процессов, таких как: сила, давление, ускорение, вибрация и удары.
- б) Преобразователи основанные на обратном пьезоэффекте применяются в качестве излучателей ультразвука в гидроакустике, а также служат преобразователями напряжения в перемещение на малые расстояния.
- в) Пьезоэлектрические резонаторы используют одновременно прямой и обратный пьезоэффекты. Они применяются в полосовых фильтрах, линиях задержки.

В нашем случае подходит только первая группа датчиков. Достоинствами пьезоэлектрических преобразователей являются высокая линейность характеристик, широкие динамические и частотные диапазоны, простота конструкции и высокая надежность при эксплуатации. На Рисунке 2 показаны датчики силы на пьезопреобразователях.

### 1.2.3 Тензорезистивные датчики

Тензометрический датчик — датчик, преобразующий величину деформации в удобный для измерения сигнал. Существует множество способов измерения деформаций.

Тензорезистивный датчик обычно представляет собой упругую систему с закреплённым на ней тензорезистором и другими деталями [6]. По изменению сопротивления тензорезистора можно вычислить степень

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

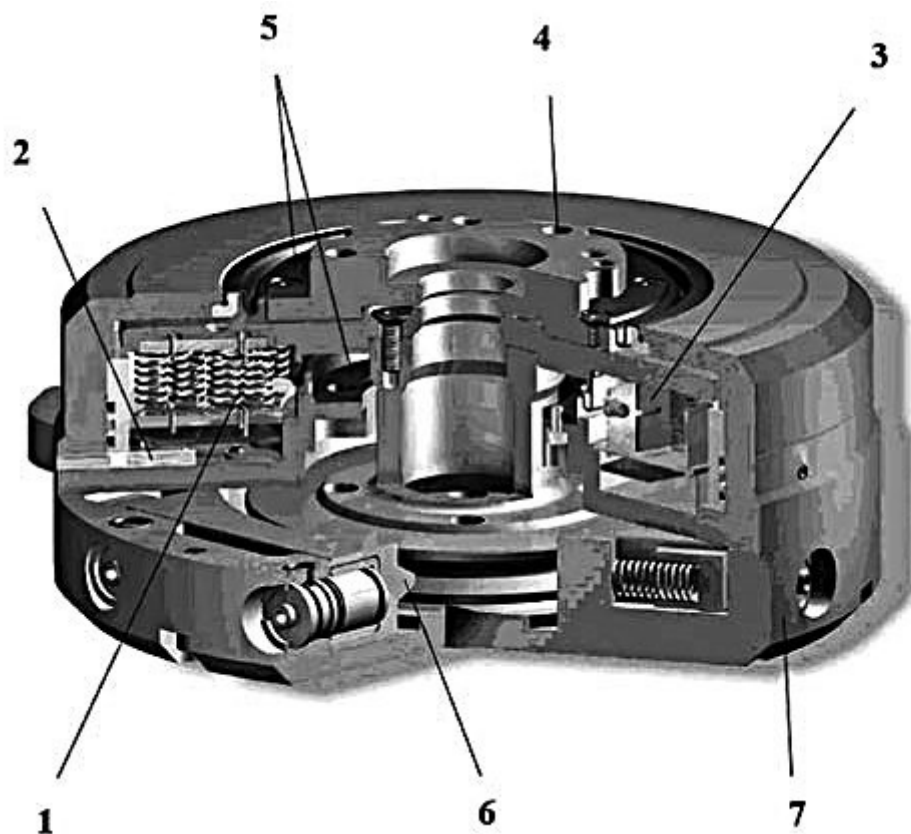


Рисунок 1 – Шести компонентный силомоментный датчик FTC-L-50-40 (фирма SCHUNK, США): 1 — упругий элемент; 2 — волоконно-оптический интерфейс; 3 — фотодиодный преобразователь; 4 — узел крепления датчика; 5 — сильфонные уплотнения для защиты от пыли; 6 — блокиратор (защита от перегрузок); 7 — алюминиевый корпус

деформации. На Рисунке 3 показан пример получивших широкое распространение тензорезистивных датчиков силы.

#### 1.2.4 Наблюдатели

Наряду с устройствами непосредственного определения силы существуют так же различные косвенные способы оценки силы с помощью вычислительных устройств, так называемых наблюдателей.

Например, развиваемый электрическим двигателем момент можно оценить по величине тока питания. По этим данным с помощью математической модели механической системы манипулятора может быть

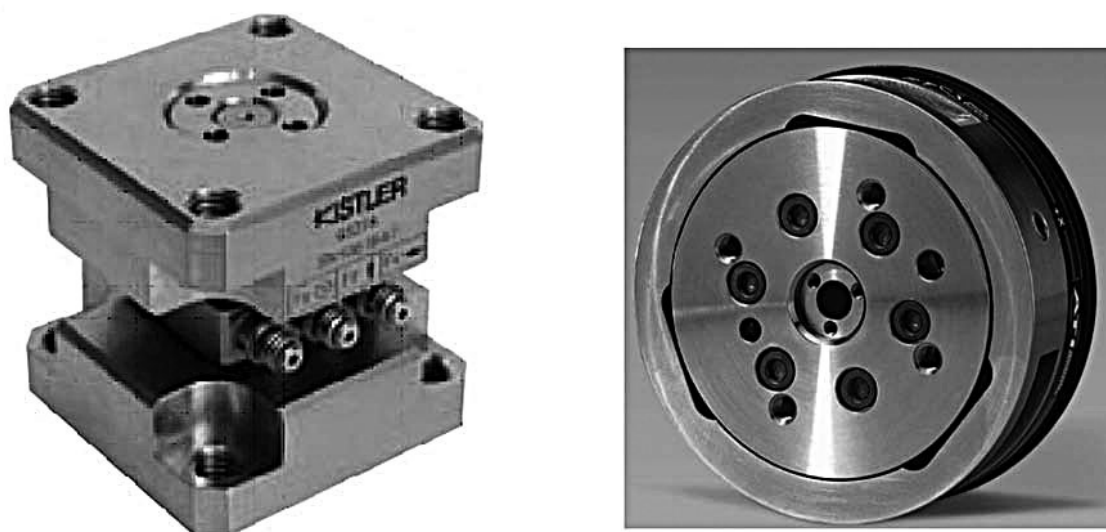


Рисунок 2 – Силовые датчики на пьезопреобразователях: а — трех компонентный датчик силы 9328А (фирма Kistler, Германия); б — шести компонентный силомоментный датчик Gamma(фирма ATI, США)

рассчитано результирующее усилие в рабочем органе манипулятора. Предложены различные алгоритмы и схемы наблюдателей, которые дают оценку этого усилия.

При невысоких требованиях к точности определения усилия такие устройства могут быть предпочтительнее датчиков силы, т. к.с они существенно дешевле и проще, не требуют вмешательства в конструкцию манипулятора. Наблюдатели могут также применяться в комбинации с силомоментными датчиками. Применение наблюдателей силы — сравнительно новое направление в робототехнике.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат



Рисунок 3 – Шести компонентный силомоментный датчик на тензорезисторах СМД (ЦНИИМаш, Россия). Справа — датчик со снятым кожухом

### 1.2.5 Обоснование выбора

Т.к. мы ставим перед собой задачу обработки моментов и сил, то нам подойдёт только тензорезистивный датчик, построенный на кремниевых кристаллах. Наш выбор пал на ATI F/T IP60 Delta в силу качества производства и простоты использования датчика. В качестве робота-манипулятора был выбран Kawasaki fs06n, в качестве контроллера управления - Kawasaki D71.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат



## 2 Постановка задачи

Требуется разработать систему управления роботом манипулятором, применив метод очувствления при помощи силомоментного датчика. Также необходимо разработать протокол связи и управления роботом на основе сетевого протокола TCP IP и их интерпретатор на язык Kawasaki Robotic AS. Идентифицировать кинематическую модель, а также конвенцию углов Эйлера, в которой получается информация о текущем положении робота.. Создать и реализовать гомогенную среду для управления робототехническим комплексом на основе промышленного манипулятора Kawasaki FS06N с контроллером Kawasaki D71+ и подключенного силомоментного датчика ATI F/T Sensor IP60 Delta Tranducer. Произвести апробацию полученных теоретических результатов алгоритмов управления роботом-манипулятором в ходе эксперимента.

## 3 Описание имеющегося оборудования

### 3.1 Kawasaki fs06n

В качестве робота-манипулятора был выбран Kawasaki fs06n, в качестве контроллера - Kawasaki D71. Основные характеристики представлены в Таблицах 1-3 [7]. Чертёж робота представлен в приложении А.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

Таблица 1 – Основные характеристики робота

Параметр	Значение
Радиус действия	1000 мм
Грузоподъёмность	6 кг
Число степеней подвижности	6
Точность позиционирования:	$\pm 0,1$ мм
Установка	напольный, потолочный, настенный
Уровень защиты	IP65 (ось JT5, JT6), IP7
Контроллеры	D42, D40, D70, D71

Таблица 2 – Технические характеристики

Параметр	Значение
Максимальная линейная скорость	8000 мм/с
Номинальный крутящий момент запястного сочленения (оси 4,5,6)	12, 12, 6 Нм
Номинальный момент инерции запястного сочленения (оси 4,5,6)	0,24, 0,24, 0,07 <sup>2</sup>

### 3.2 ATI F/T IP60 Delta

Силомоментный датчик F/T IP60 Delta измеряет 6 значений в режиме реального времени и передаёт их по сети. Предельные измеряемые значения, а также точностные характеристики представлены в Таблице 5.

Таблица 3 – Параметры движения осей

№ Оси	Угол поворота осей	Скорость поворота осей
1	от $-160^{\circ}$ до $160^{\circ}$	$240^{\circ}/с$
2	от $-105^{\circ}$ до $140^{\circ}$	$200^{\circ}/с$
3	от $-155^{\circ}$ до $120^{\circ}$	$250^{\circ}/с$
4	от $-270^{\circ}$ до $270^{\circ}$	$430^{\circ}/с$
5	от $-145^{\circ}$ до $145^{\circ}$	$430^{\circ}/с$
6	от $-360^{\circ}$ до $360^{\circ}$	$720^{\circ}/с$

Таблица 4 – Классификация технических характеристик

Техническая характеристика	Классификация	Значение
Грузоподъемность	легкие	6 кг
Число степеней подвижности	средняя	6
Величина и скорость перемещения рабочего органа	средняя	650 мм
Быстродействие	высокое	8 м/с
Объем рабочей зоны	средняя	2 м <sup>3</sup>
Погрешность позиционирования	1 класс точности	0,05%
Мобильность	подвижные	напольный, потолочный, настенный
Тип привода	пр. электрическая	
Система координат	ангулярная	

Таблица 5 – Классификация по техническим характеристикам

Направление измерений	Максимальное Значение	Точность
$F_x, F_y$	660 N	1/8 N
$F_z$	1980 N	1/4 N
$T_x, T_y$	60 Nm	10/1333 Nm
$T_z$	60 Nm	10/1333 Nm

## 4 Разработка программного обеспечения

### 4.1 Формирование алгоритма управления

Сетевая архитектура представлена на Рисунке 4.

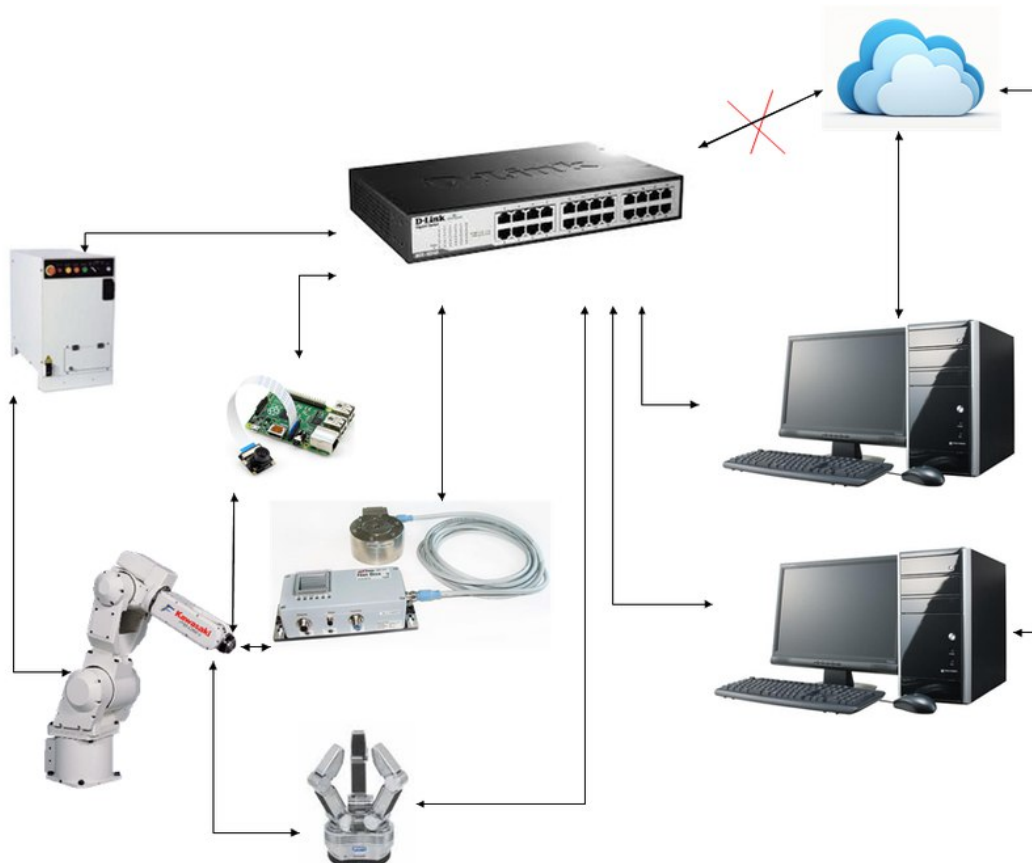


Рисунок 4 – Сетевая архитектура

У робота есть всего две группы параметров позиционирования:

- углы поворотов шести джоинтов
- Положение фланца, заданное в  $x, y, z$  координатах, и его ориентация, заданная в  $\alpha, \beta, \gamma$  углах Эйлера в  $zyz$  конвенции.

Т.к. робот получает управляющие команды по протоколу tcp ip, и контроль безошибочности передачи заложен в самом протоколе [8], то нам остаётся разработать собственный формат посылки.

## 4.2 Структура посылки

Т.к. при позиционировании робот использует 6 величин, то необходимо реализовать посылку следующим образом.

В силу функциональных особенностей внутреннего языка программирования контроллеров RoboticAS [9], самым оптимальным способом передачи данных по протоколу TCP IP является отправка символьных строк, содержащих в себе данные, разделённых пробелом (разделительным символом). Единственное требование к такому представлению: каждое число должно быть представлено шестью символами. В случае, если число меньше  $10^5$ , то недостающие разряды должны быть заполнены цифрой 0. Например, число 123 должно быть представлено в выходной строке, как 000123. Минимальная единица посылки, называемая кадром, является целым числом.

Т.к. при использовании протокола tcp ip все символы строки гарантированно будут доставлены от передатчика к приёмнику, то механизм обработки принятых сообщений можно построить следующим образом: все входящие символы добавляются в буфер с конца, как только длина буфера превышает число  $n = k * w$ , где  $k$  - кол-во кадров в посылке,  $w$  - размер кадра в символах, то из буфера берутся первые  $n$  символов и переводятся в  $k$  целых чисел.

Т.к. параметров позиционирования у робота-манипулятора шесть, то в размер посылки требуется заложить в девять кадров.

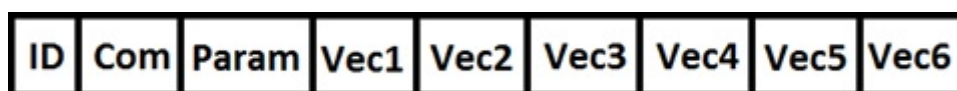


Рисунок 5 – Структура посылки: ID- уникальный номер управляющей команды(id); Com - номер управляющей команды; Param- параметр управляющей команды(запасной); Vec1...Vec6 - вектор параметров управляющей команды

## 4.3 Управление Кавасаки

Всего есть три основных группы управления:

а) По положению. Вектор параметров имеет следующую структу-

ру:

- 1) Vec1 – X координата фланца;
  - 2) Vec2 – Y координата фланца;
  - 3) Vec3 – Z координата фланца;
  - 4) Vec4 – O угол Эйлера;
  - 5) Vec5 – A угол Эйлера;
  - 6) Vec6 – T угол Эйлера;
- б) По абсолютным углам поворота джоинтов. *i*-ая координата отвечает углу поворота *i*-го джоинта.
- в) По относительным углам поворота джоинтов. *i*-ая координата отвечает за относительный поворот *i*-го джоинта.

Внутренняя программа контролера построена следующим образом: запущено 3 параллельных процесса: первый в бесконечном цикле отправляет данные о положении фланца, его ориентации и углах поворота шести джоинтов. Второй процесс в бесконечном цикле проверяет, не пришло ли новых символов и по каналу связи и добавляет их к буферу. Третий процесс в бесконечном цикле обрабатывает входящие управляющие команды и запускает вспомогательные программы внутреннего управления, если такое управление было запущено.

#### 4.4 Внешние управляющие программы.

- а) Вывод робота в заданную точку по координатам (X,Y,Z,O,A,T). В вектор параметров передаются соответствующие координаты.
- б) Вывод робота в заданную конфигурацию поворотов джоинтов. В вектор параметров передаются соответствующие углы поворота джоинтов.
- в) Поворот джоинтов робота на заданные углы В вектор параметров передаются соответствующие углы поворотов джоинтов. При получении любой из первых трёх команд робот сразу же запускает внутреннюю команду перемещения. Поле Param остаётся нулевым.
- г) Передача значений показаний силомоментного датчика в базовой системе координат (преобразование реальных показаний датчиков производится на стороне РС). Поле Param остаётся нулевым.

- д) Задание скоростей и ускорений. Поле  $Param$  остаётся нулевым, значения  $Ves1-Ves4$  следующие: ускорение в процентах, замедление в процентах, модульная скорость в процентах, механическая скорость в мм/с. Реальная скорость робота является произведением механической на модульную скорости.
- е) Задание коэффициентов регулирования. При поле  $Param$ , равном нулю задаются пропорциональные коэффициенты  $kx, ky, kz, ktx, kty, ktz$ , при поле  $Param$ , равном 1 задаются интегральные коэффициенты  $ix, iy, iz, itx, ity, Itz$ .
- ж) Запуск программы force feedback. При  $Param$ , равном 0 – запускает "Force feedback position" режим стабилизации показаний  $x, y, z$  компонент силомоментного датчика в нулевых значениях за счёт смещений по  $x, y, z$  осям. При  $Param$  равном 1 – запускается "Force feedback orientation" режим стабилизации  $tx, ty, tz$  показаний силомоментного датчика в нулевых значениях. При  $Param$  равном 2 останавливается выполнение force feedback.

#### 4.5 Работа Force Feedback

Из-за низкой производительности контроллера Kawasaki все математические вычисления производятся на ПК. Контроллер получает уже преобразованные значения  $x, y, z$  компонент силы в базисе базовой системы координат.  $M_x, M_y$  и  $M_z$  – моменты, возникающие вдоль осей  $x, y$  и  $z$  базовой системы координат. Режим "Force feedback position" реализуется при помощи ПИ регулятора, где за ошибку берётся значения  $x, y, z$  компонент силомоментного датчика. Выходом регулятора является новое положение робота на следующей итерации главного цикла программы.

Режим "Force feedback orientation" реализуется более сложным способом. Также строится ПИ регулятор, за ошибку берутся показания моментов  $M_x, M_y, M_z$ , Выходом регулятора являются углы поворотов с третьего по шестой джоинтов.

Итого, можно сформировать три задачи:

- а) Преобразование значения силы из системы координат датчика в базовую систему координат и компенсация силы тяжести инструмента.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат



- б) Преобразование значений моментов из системы координат датчика в базовую систему координат и компенсация момента силы тяжести инструмента.
- в) Непосредственная реализация режимов force feedback.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

## 5 Синтез управления

### 5.1 Идентификация

#### 5.1.1 Системы координат

Всего у нас будет 3 системы координат:

- а) Связанная с основанием робота - базовая система координат. Центр системы координат выберем следующим образом: он будет находиться на пересечении оси вращения первого джоинта и горизонтальной плоскости, проходящей через ось вращения второго. Такое начало координат заложено производителем.
- б) Связанная с центром фланца рабочего инструмента.
- в) Связанная с силомоментным датчиком.

Датчик закреплён на фланце робота таким образом, что оси  $z$  у них совпадают, систему координат, связанную с датчиком можно получить, повернув систему координат, связанную с фланцем, на угол  $\frac{\pi}{2}$ . В итоге для реализации управления нам необходимо составить матрицы перехода из первой системы координат во вторую и из второй - в третью [11]. Обозначим матрицу перехода из первой системы во вторую  $M_{p12}$ , из второй в третью -  $M_{p23}$ .

#### 5.1.2 Нахождение матрицы перехода 1-2

Для нахождения матрицы перехода из первой системы во вторую можно воспользоваться одним из двух способов:

- а) Углы Эйлера в  $zyz$  конвенции
- б) Прямая задача кинематики

#### 5.1.3 Углы Эйлера

От контроллера Kawasaki можно получить в режиме реального времени координаты  $X, Y, Z$  и углы Эйлера  $O, A, T$  в  $zyz$  конвенции (Рисунок 6). По этим координатам мы можем построить матрицу перехода из первой системы координат во вторую [10] [12] [13] [14]:

$$M_{p12} = \begin{bmatrix} cOcAcT - sOsT & -cOcAcT - sOcT & cOsA & X \\ sOcAcT + cOsT & -sOcAsT + cOcT & sOsA & Y \\ -sAsT & sAsT & cA & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

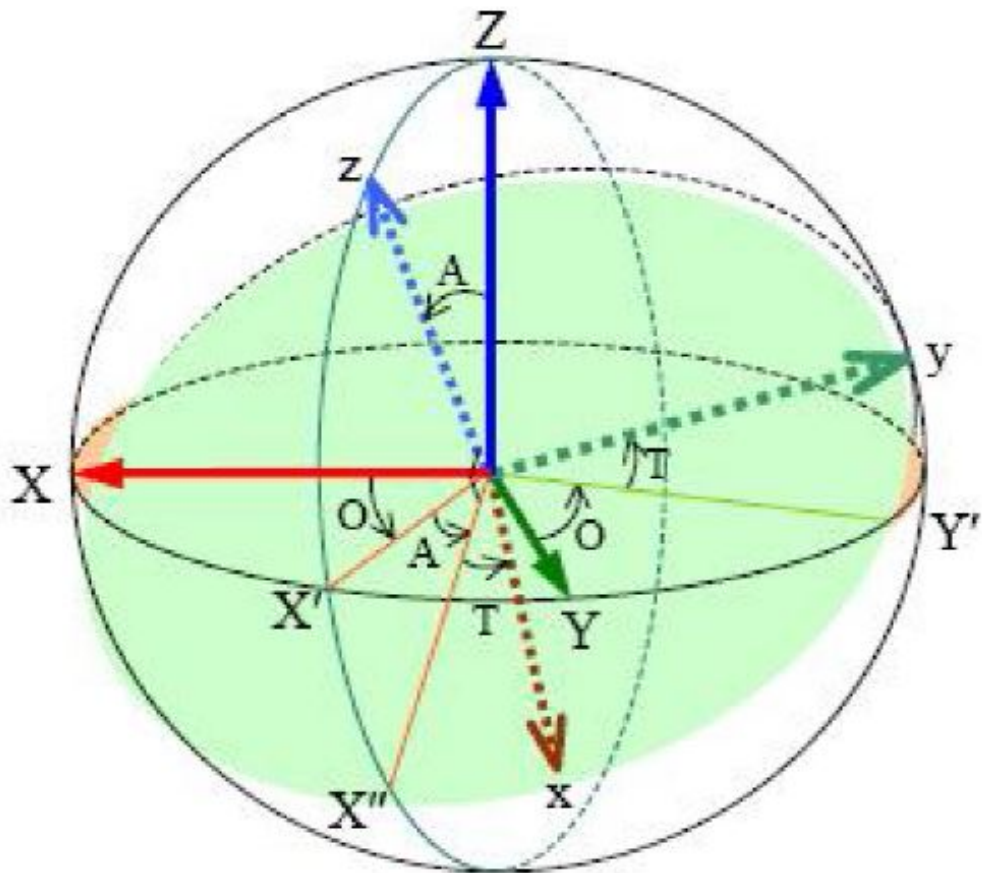


Рисунок 6 – ZYZ конвенция углов Эйлера

#### 5.1.4 Прямая задача кинематики

Методом Денавита-Хартенберга [15] [16] [17] [18] [19] определяют кинематические параметры каждого звена манипулятора. Значения параметров представлены в Таблице 6, кинематическая схема на Рисунке 7.

Обобщённую координату  $i$ -го джоинта обозначим как  $\theta_i$ . Т.к. ось вращения первого джоинта направлена вертикально вниз, а  $z$  в базовой системе координат направлена вертикально вверх, было введено дополнительное преобразование из базовой системы координат в систему отсчёта первого джоинта.

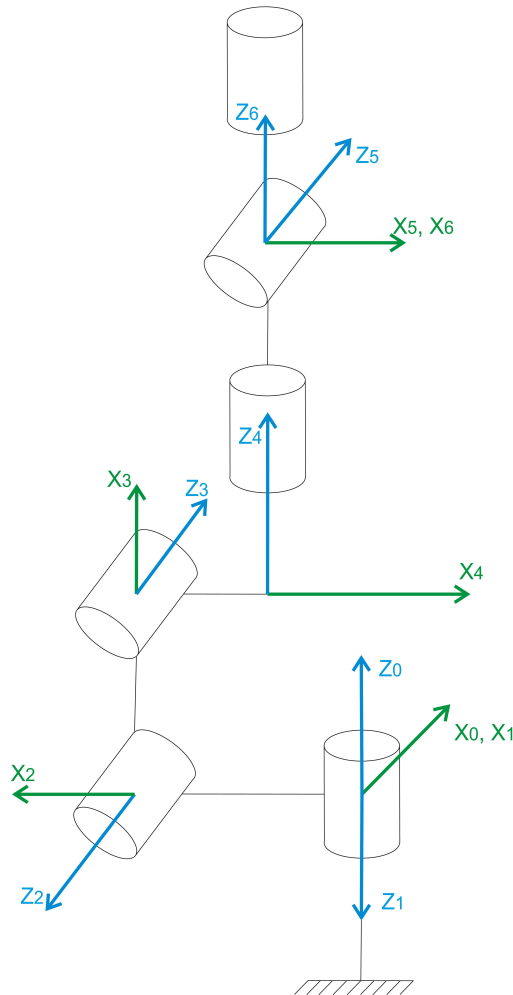


Рисунок 7 – Кинематическая схема

Для  $i$ -го кинематического звена матрица перехода имеет вид:

$$A_i = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta c\alpha & s\theta s\alpha & c\theta a \\ s\theta & c\theta c\alpha & -c\theta s\alpha & s\theta a \\ 0 & s\alpha & c\alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Тогда  $M_{p12} = A_0 A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6$

Таблица 6 – Кинематические звенья

№ Звена	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
0	0	0	0	$pi$
1	$\theta_1 - pi/2$	0	0.1	$pi/2$
2	$\theta_2 - pi/2$	0	0.45	$pi$
3	$\theta_3 + pi/2$	0	0.04	$pi/2$
4	$\theta_4$	0.45	0	$-pi/2$
5	$\theta_5$	0	0	$pi/2$
6	$\theta_6 + pi/2$	0.1	0	0

### 5.1.5 Нахождение матрицы перехода 2-3

Т.к. матрица перехода 2-3 постоянна и имеет тривиальную форму,

она была объявлена как константа:  $M_{p23} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

## 5.2 Обработка Сил

### 5.2.1 Компенсация внутренних силовых напряжений

Т.к. монтаж датчика на фланец осуществлён совместно со схватом за счёт жёсткой фиксации, то возникают внутреннее давление которое порождает паразитные показания силы [20] [21]. Для определения паразитных сил зафиксируем фланец робота в двух положениях: вертикально вверх и вертикально вниз. Получены следующие значения:

$$\begin{pmatrix} -12.5 \\ 0 \\ -50 \end{pmatrix} - \text{для ориентации вертикально вверх}$$

$$\begin{pmatrix} -12.5 \\ 0 \\ 10 \end{pmatrix} - \text{для ориентации вертикально вниз.}$$

Отсюда получается, что внутреннее напряжение равно по оси  $x$  12.5Н, а по оси  $z$  -20Н. Учитывая, что инструмент и монтажные элементы весят примерно 3кг, можно сделать вывод о правильных расчётах.

В результате получен вектор внутренних напряжений:

$$F_v = \begin{pmatrix} -12.5 \\ 0 \\ -20 \end{pmatrix}$$

### 5.2.2 Компенсация силы тяжести

Пусть матрица перехода из системы координат датчика в базовую систему координат  $M_{p13} = M_{p12}M_{p23}$ . Т.к. сила тяжести направлена всегда вертикально вниз, то вектор силы тяжести в базовой системе координат однозначно определён. Т.о. необходимо перевести вектор силы тяжести из базовой системы координат в систему координат датчика.

$$F_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -30 \end{pmatrix}, \text{ тогда в системе координат датчика } F_g = M_{13}^{-1}F_1.$$

### 5.2.3 Перевод измерений датчика в базовую систему координат

Пусть  $F_0$  - вектор сил, полученный с датчика. Тогда вектор показаний  $F_r$ , в котором уже скомпенсированны внутренние напряжения и сила тяжести:  $F_r = F_0 - F_v - F_g$ .

Тогда показания датчика в базовой системе координат будут следующими:  $F_r^* = M_{13}F_r$

## 5.3 Обработка Моментов

### 5.3.1 Компенсация внутренних напряжений

По причинам, описанным выше в системе при ориентации вертикально вверх (все моменты, порождённые внешними силами, должны

быть равны 0) мы получаем ненулевые значения. Пусть вектор внутренних моментов  $M_v$ , тогда  $M_v = \begin{pmatrix} -0.34 \\ -0.18 \\ 0.52 \end{pmatrix}$

### 5.3.2 Компенсация момента силы тяжести

Для того, чтобы скомпенсировать момент силы тяжести, был введён вектор, соединяющий центр фланца и центр тяжести инструмента при ориентированном вертикально вверх инструменте:

$$r_{c_0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.07 \end{pmatrix}$$

тогда вектор соединяющий центр фланца и центр тяжести в произвольной конфигурации робота  $r_c$  будет равен  $M_{13}r_{c_0}$ .

Тогда момент силы тяжести в произвольном конфигурации в базовой системе координат равен в базовой системе координат

$$M_{g_0} = r_c \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -30 \end{pmatrix}$$

В системе координат датчика тогда момент будет:

$$M_g = M_{13}^{-1} M_{g_0}$$

### 5.3.3 Перевод измерений датчика в систему обобщённых координат

Пусть  $M_0$  - вектор моментов, полученный с датчика. Тогда вектор показаний  $M_r$ , в котором уже скомпенсированны внутренние напряжения и сила тяжести:  $M_r = M_0 - M_v - M_g$ .

Управление будет построено следующим образом: необходимо взять первые четыре джоинта, после чего последовательно переходить от системы координат шестого джоинта к системе координат третьего джоинта.

Перед каждым переходом  $z$  координату вектора моментов необходимо сохранить в качестве приведённого момента  $m_i$ . После чего следует обнулить  $z$  - координату вектора моментов и умножить полученный век-

тор на обратную матрицу поворота из  $(i - 1)$ -ой системы координат в  $i$ -ю.

$$\begin{pmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \end{pmatrix} M_{i(i-1)3x3}^{-1}$$

## 5.4 Обработка Сил

### 5.4.1 Компенсация внутренних силовых напряжений

Т.к. монтаж датчика на фланец осуществлён совместно со схватом за счёт жёсткой фиксации, то возникают внутренние давление которое порождает паразитные показания силы. Для определения паразитных сил зафиксируем фланец робота в двух положениях: вертикально вверх и вертикально вниз. Получены следующие значения:

$$\begin{pmatrix} -12.5 \\ 0 \\ -50 \end{pmatrix} - \text{для ориентации вертикально вверх}$$

$$\begin{pmatrix} -12.5 \\ 0 \\ 10 \end{pmatrix} - \text{для ориентации вертикально вниз.}$$

Отсюда получается, что внутреннее напряжение равно по оси  $x$  12.5Н, а по оси  $z$  -20Н. Учитывая, что инструмент и монтажные элементы весят примерно 3кг, можно сделать вывод о правильных расчётах.

В результате получен вектор внутренних напряжений:

$$F_v = \begin{pmatrix} -12.5 \\ 0 \\ -20 \end{pmatrix}$$

### 5.4.2 Компенсация силы тяжести

Пусть матрица перехода из системы координат датчика в базовую систему координат  $M_{p13} = M_{p12}M_{p23}$ . Т.к. сила тяжести направлена всегда вертикально вниз, то вектор силы тяжести в базовой системе координат однозначно определён. Т.о. необходимо перевести вектор силы тяжести из базовой системы координат в систему координат датчика.



$$F_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -30 \end{pmatrix}, \text{ тогда в системе координат датчика } F_g = M_{13}^{-1} F_1.$$

### 5.4.3 Перевод измерений датчика в базовую систему координат

Пусть  $F_0$  - вектор сил, полученный с датчика. Тогда вектор показаний  $F_r$ , в котором уже скомпенсированы внутренние напряжения и сила тяжести:  $F_r = F_0 - F_v - F_g$ .

Тогда показания датчика в базовой системе координат будут следующими:  $F_r^* = M_{13} F_r$

## 5.5 Обработка моментов

### 5.5.1 Компенсация внутренних напряжений

По причинам, описанным выше в системе при ориентации вертикально вверх (все моменты, порождённые внешними силами, должны быть равны 0) мы получаем ненулевые значения. Пусть вектор внутренних моментов  $M_v$ , тогда  $M_v = \begin{pmatrix} -0.34 \\ -0.18 \\ 0.52 \end{pmatrix}$

### 5.5.2 Компенсация момента силы тяжести

Для того, чтобы скомпенсировать момент силы тяжести, был введён вектор, соединяющий центр фланца и центр тяжести инструмента при ориентированном вертикально вверх инструменте:

$$r_{c_0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.07 \end{pmatrix}$$

тогда вектор соединяющий центр фланца и центр тяжести в произвольной конфигурации робота  $r_c$  будет равен

$$M_{13} r_{c_0}.$$

Тогда момент силы тяжести в произвольном конфигурации в базовой системе координат равен в базовой системе координат  $M_{g_0} =$

$$rc \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -30 \end{pmatrix}$$

В системе координат датчика тогда момент будет:

$$M_g = M_{13}^{-1} M_{g_0}$$

### 5.5.3 Перевод измерений датчика в систему обобщённых координат

Пусть  $M_0$  - вектор моментов, полученный с датчика. Тогда вектор показаний  $M_r$ , в котором уже скомпенсированы внутренние напряжения и сила тяжести:  $M_r = M_0 - M_v - M_g$ .

Управление будет построено следующим образом: необходимо взять первые четыре джоинта, после чего последовательно переходить от системы координат шестого джоинта к системе координат третьего джоинта.

Перед каждым переходом  $z$  координату вектора моментов необходимо сохранить в качестве приведённого момента  $m_i$ . После чего следует обнулить  $z$  - координату вектора моментов и умножить полученный вектор на обратную матрицу поворота из  $(i - 1)$ -ой системы координат в  $i$ -ю.

$$\begin{pmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \end{pmatrix} M_{i(i-1)3x3}^{-1}$$

## 5.6 Построение регуляторов

### 5.6.1 Определение формы задающих воздействий

Т.к. единственный способ управления роботом представляет из себя формирование задания по относительному смещению рабочего инструмента или относительному повороту джоинта, выход регулятора будет представлять собой вектор смещения [22]

в случае управления по силе и вектор поворотов

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta\theta_3 \\ \Delta\theta_4 \\ \Delta\theta_5 \\ \Delta\theta_6 \end{pmatrix} \text{ в случае управления по моментам}$$

Для реализации управления используется трёх-канальный ПИ-регулятор в случае управления по силам, принимающий на вход вектор сил и четырёх-канальный в случае управления по моментам, принимающий на вход вектор приведённых моментов.

### 5.6.2 Вычисление интегральной ошибки

Т.к. в распоряжении имеется дискретная система, то для подсчёта интегральной компоненты реализована FIFO структура, иными словами, очередь фиксированной длины. Значение интегральной компоненты равно сумме всех элементов очереди.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

## 6 Экспериментальные исследования

Для проверки математических расчётов было организовано 2 эксперимента: управление по моментам и управление по силам.

### 6.1 Управление по силам

На Рисунках 10-15 показаны графики, иллюстрирующие реализованное управление в режиме "force feedback position"

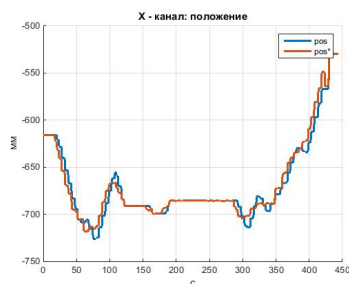


Рисунок 8 – X - канал: положения

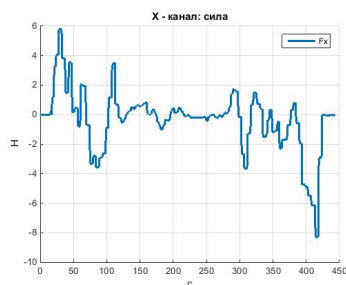


Рисунок 9 – X - канал: силы

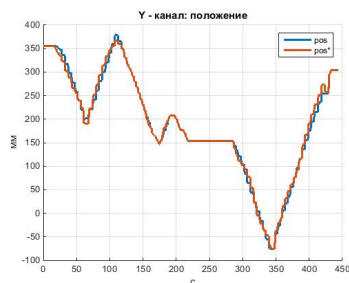


Рисунок 10 – Y - канал: положения

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

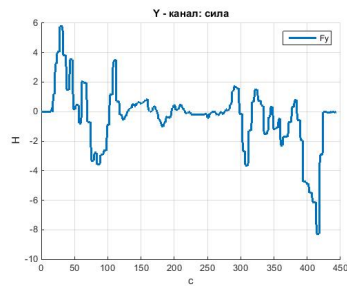


Рисунок 11 – Y - канал: силы

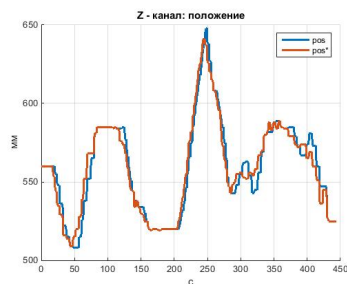


Рисунок 12 – Z - канал: положения

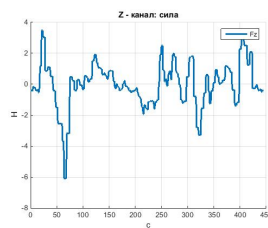


Рисунок 13 – Z - канал: силы

## 6.2 Управление по моментам

На Рисунках 16-21 показаны графики, иллюстрирующие реализованное управление в режиме "force feedback orientation"

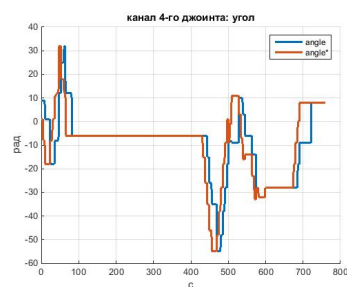


Рисунок 14 – канал четвертого джоинта: угол

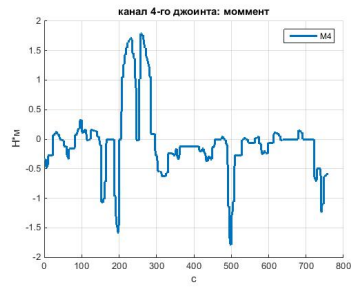


Рисунок 15 – канал четвертого джоинта: момент

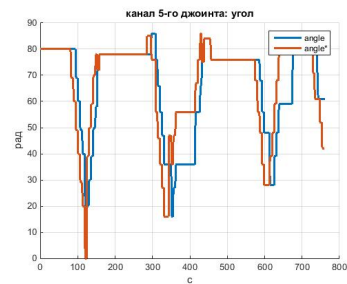


Рисунок 16 – канал пятого джоинта: угол

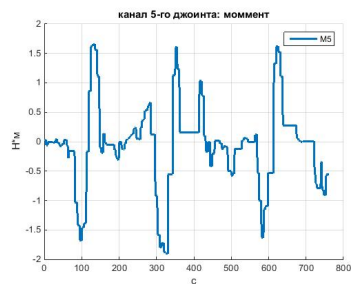


Рисунок 17 – канал пятого джоинта: момент

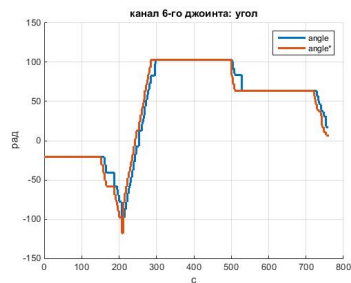


Рисунок 18 – канал шестого джоинта: угол

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

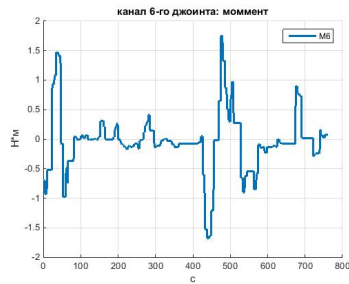


Рисунок 19 – канал шестого джойнта: момент

### 6.3 Результаты экспериментов

Из графиков наглядно видно, что система имеет серьёзное запаздывание, что вызвано «шаговостью» работа-манипулятора. Тем не менее система корректно обрабатывает задание, следовательно, поставленная задача выполнена.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

## Заключение

Промышленность стремится к сокращению расходов при повышении качества и объема выпускаемой продукции, поэтому все чаще и чаще принимаются на вооружение современные достижения в области автоматизации процессов с применением роботов-манипуляторов. Современный мир робототехники стремится не только к созданию абсолютно новых робототехнических комплексов, но и к извлечению максимальной выгоды от использования существующих. Для этого применяются различного рода периферийное оборудование, представленное в том числе различными средствами оучувствления.

В дипломном проекте произведен анализ существующих способов силомоментного оучувствления, рассмотрены достоинства и недостатки каждого из способов измерения воздействий данного типа.

Основное внимание уделено понятиям и методам силомоментного оучувствления, применяемым в управлении промышленными роботами. В силу отсутствия универсальных решений, на этапе рассмотрения поставленной проблематики управления была проведена программная интеграция силомоментного датчика Delta IP 60 в систему управления роботом-манипулятором Kawasaki Fs06N. В рамках выполнения выпускной квалификационной работы было синтезировано отдельное управление робототехническим комплексом по моментам и по силам, воздействующих извне на рабочий инструмент.

Полученное управление было практически апробировано. Результаты эксперимента содержатся в главе V, где наглядно продемонстрированы итоги реализации разработанных алгоритмов управления. Несмотря на высокую «шаговость» самого робота-манипулятора результаты имеют исключительно положительный характер. В дальнейшем работа будет продолжена, алгоритмы управления с применением силомоментного оучувствления робота-манипулятора планируется усовершенствовать до достижения приемлемых результатов для практического применения на реальном производстве.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат



## Список используемых источников

- 1 Василенко, Н.В. Основы робототехники / Василенко, Н.В., Никитин, К.Д., Пономарёв, В.П., Смолин, А.Ю. — Томск : МГП РАСКО, 1993 — 474 с.
- 2 Юревич, Е. И. Сенсорные системы в робототехнике : учебное пособие, Юревич, Е. И. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 100 с.
- 3 Troch, I., Robot Control, Troch, I., Desoyer, K., Kopates, P., - Oxford : Pergamon press, 1991. - 565 с.
- 4 Преснухин, Л. Фотоэлектрические преобразователи информации, Преснухин Л., Воробьев Н., Шишкевич, А., - Машиностроение, 1974 - 376 с.
- 5 Пугачев, С.И. Пьезокерамические преобразователи. Справочник, Пугачев, С.И., - Судостроение, 1984 - 256 с.
- 6 Makeev, A. I., The Inclusion of Tensosensitive Lattice of an Attached Sensor During the Deformation of an Element Under Investigation Makeev, A. I., - Defense Technical Information Center, 1968 - 13 с.
- 7 F series Kawasaki Robot Installation and Connection Manual <http://platforma.astor.com.pl/files/getfile/id/8042>
- 8 Parziale, L. TCP/IP Tutorial and Technical Overview, Parziale, L., Britt D. T., Davis, C., Forrester, J., Liu, W., Matthews, C., Rosselot, N, IBM, 2006 - 1004 с.
- 9 AS язык программирования. Руководство по программированию. Kawasaki Heavy Industries, Ltd, 2002. — 335с.
- 10 Spong, M. W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M.: Robot Modeling and Control; Edit. John Wiley and Sons, 2006 BIBL
- 11 Основы робототехники, Е. И. Юревич, БХВ-Петербург, 2005 г., 408 стр
- 12 Landau, L.D., Mechanics (3rd ed.), Landau, L.D., Lifshitz, E. M., Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996 - 165 с.
- 13 Берёзкин, Е. Н., Курс теоретической механики — 2-е изд., пер. — М.: Изд-во МГУ. 1974. — 641 с.
- 14 Журавлев В. Ф. Основы теоретической механики — 2-е изд. — М.: Физматлит, 2001. С. 23.
- 15 Hartenberg, R. S., Kinematic Synthesis of Linkages, Denavit, J., New York: McGraw-Hill - 1964

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

- 16 Рыбак, Л., Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры, Рыбак, Л. Ержуков, В., Чичварин, А. 2011
- 17 Marcello Restelli. Презентация «Robot Kinematics». Politecnico di Milano, 2008
- 18 Sami Haddadin. Презентация «Robotics: Inverse kinematics». Institute of Robotics and Mechatronics, German Aerospace Center (DLR), Germany, 2009.
- 19 Jorge Angeles. Fundamentals of robotic mechanical systems: theory, methods, and algorithms. Springer-Velag New York, 2003. — 545с.
- 20 Малов, А. Н. Автоматические загрузочные устройства. Справочник металлиста. Т.5. - М. : Машиностроение, 1978. - 673 с.
- 21 Бобров, В. П. Проектирование загрузочно-транспортных устройств к станкам и автоматическим линиям, - М. : Машиностроение, 1964. - 291 с.
- 22 Амосов А.А, Дубинский Ю. А, Копченова Н. В. Вычислительные методы для инженеров: Учеб. пособие. – М.: Высш. Шк., 1994, С.105-113, 201-207.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

Приложение А  
(справочное)

Рабочая зона работа-манипулятора Kawasaki

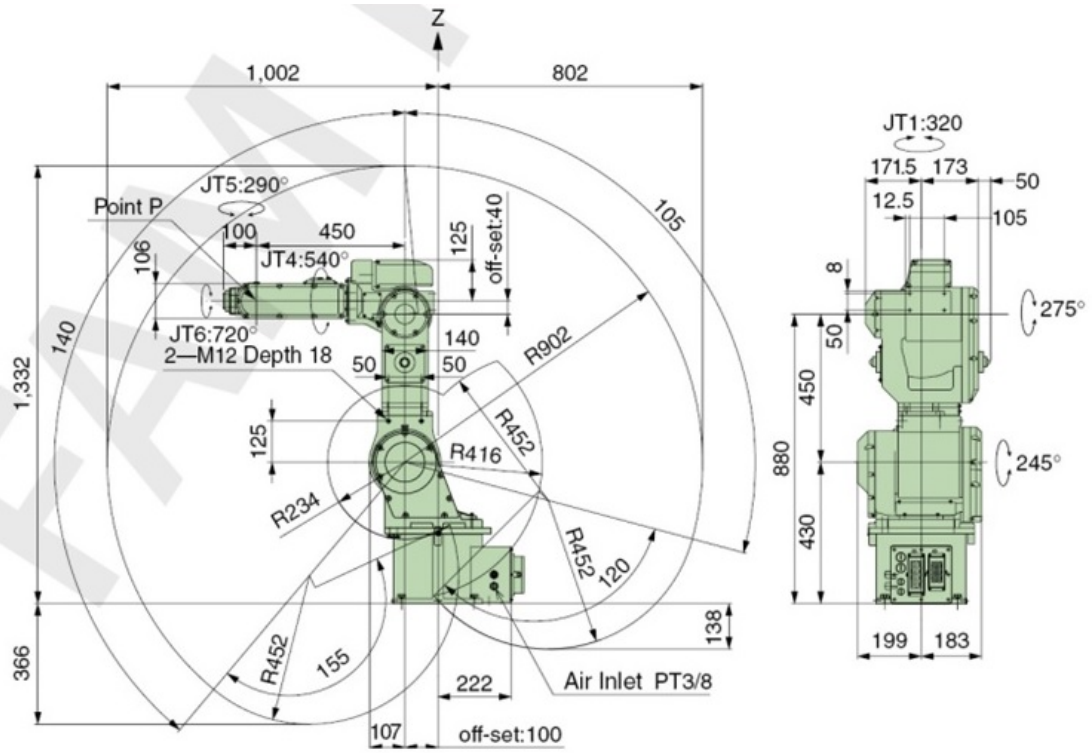


Рисунок 20 – Рабочая зона работа-манипулятора Kawasaki

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат