

ՊԾՐԽՐԻՑՐՈՒԹԵՐՈՒԹԵՐԸ
ՊՅՊԶՐԻՌԵՐՈՒԹԵՐՈՒԹԵՐԸ
ՐԻՌԵՐՈՒԹԵՐԸ

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ МОДУЛЕЙ CMS ДЕТЕКТОРА БОЛЬШОГО АДРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА

by

Брикса Артём

РҮРЧР»РНР«РёР„РӨСС СГРӨРÇР«СТРӨ СР«РЧСРРӨСТРХРНС
СРСТРХР»РХР„РЧРФР»РХСЗРЧРӨРНРЧСРСТРӨ

PhPøPøCTøRњCÆCT PxCT  CT PøPyPqP «ChPqPqPqPøPq Pq
PøP «P P» CÆCHCT PxCT , СКСЖ С PxСЖР,, Р«РњР«РуРqРе
Р РøChPxРуCT Рø С PxРњPxРøР «Р Р CТР,, РqРøРøCЗРqРе Рq
РqР «CГР РøCЗРqР «Р,,Р „СКСЖ С PxСЖР,, Р«РњР«РуРqРе

11 июня 2017 г.

Р҃РХРНРоРгРhРfРfРЭРЧР€ РҮРоРgРhРҮРӨРgРfРhРjРÜРХРnРnРkР€
РhРnРЧРÜРХРgРfРЧРhРХРj

PθP,,P,,P«CTБPθC3PψCS

PhРөРёСТhРnСÆСТhРxСТh СГРөРүРчР«ChРqРчРqРёРq Рq
РэР«РёР»СÆСHСТhРxСГР,,СКСЖ СТhРxСЖР,,Р«РnР«РүРqР€
РЭРөChPxРүСГРө СТhРxРnРxРёР«РёРёСТhР,,РqРёРёСЗРqР€ Рq
РqР,,ChР«СГРёРёСЗРqР«Р,,Р,,СКСЖ СТhРxСЖР,,Р«РnР«РүРqР€

Брикса Артём

Трекер CMS детектора второй стадии модернизации состоит из двух типов модулей (PS и 2S), каждый состоящий из двух кремневых сенсоров, необходимой для их работы электроники и других элементов корпуса. В случае PS модуля, сенсоры должны быть собраны с относительной точностью около 40 мкм. Чтобы выполнить данные требования и сократить время на сборку, предлагается использовать систему автоматизированной сборки. Данная система основывается на высокоточной двигательной установке с интегрированной в ней камерой высокого разрешения, которая позволяет осуществлять распознавание образов, систему фиксации отрицательным давлением и специального программного обеспечения для контроля их работы.

Acknowledgements

Большое спасибо Джеймсу Кивени, Андреасу Муссгиллеру, Дорис Экштайн, Карстену Мул, Адаму Цуберу и всей CMS группе DESY за готовность помочь в любое время и ответить на все мои вопросы, в то время как у меня их было много.

Оглавление

Abstract	1
Acknowledgements	2
List of Figures	5
Abbreviations	7
1 Введение	1
1.1 Компактный мюонный соленоид	1
1.2 Вторая стадия модернизации CMS трекера	2
2 Сборка модулей	5
2.1 Ручная сборка с помощью механической фиксирующей платформы	5
2.2 Система автоматизированной сборки	6
2.3 Сборочная платформа	8
2.4 Быстросохнущее вещество склеивания.	10
2.5 Процесс автоматизированной сборки	12
3 Программное обеспечение контроля сборки	15
3.1 Общая структура приложения	15
3.1.1 Шаблон проектирования Модель-Представление-Контроллер	16
3.1.2 OpenCV library	18
3.2 Распознавание образов	19
3.2.1 Предварительная обработка изображения, полученного с камеры	20
3.2.2 Определение позиции и планарной ориентации маркера	21
3.2.3 Определение приблизительного положения следующего маркера и/или начальное вычисление планарной ориентации сенсора	23
3.3 Функционал приложения	23
4 Тестирование системы и сборка первого прототипа	27
4.1 Тест точность процедуры распознавания образов	28
4.1.1 Распознавание образов на угле стеклянного образца	28
4.1.2 Pattern recognition on the marker of the dummy sensor	31
4.2 Pickup precision tests	31
4.2.1 Pickup precision tests without assembly platform	31
4.2.2 Pickup precision tests with assembly platform	33

4.3 First assembled prototype	34
5 Conclusion	38
A Appendix	39
Литература	40

Список иллюстраций

1.1	Вид на слои CMS детектора в поперечном разрезе.	2
1.2	Пример разграничения высокого и низкого поперечного импульса. Частицы, которые пройдут в пределах двух соседних детектирующих полосок второго сенсора от соответствующий полоски первого сенсора, будут считаться как частицы с высоким поперечным импульсом.	3
1.3	PS модуль в разборном виде.	4
1.4	Требования точности к сборке PS и 2S модулей.	4
2.1	Прототип механической фиксирующей платформы.	5
2.2	Предлагаемая система автоматизированной сборки.	6
2.3	Устройства захвата системы автоматизированной сборки.	7
2.4	Эскиз сборочной платформы.	9
2.5	Алюминиевый прототип распорки для PS модуля.	10
2.6	Способ применение быстросохнущего вещества во время тестов. На практике достаточно капель намного меньших размеров для обеспечение необходимой прочности соединения.	11
2.7	Толщина слоя быстросохнущего клеящего вещества Loxeal 31-42 при высыхании под давлением $\approx 20 \text{ g/cm}^2$	12
3.1	Схематическое изображение интеграции подсистемами движения, наблюдения и отрицательного давления с помощью Qt приложение PSAuto.	15
3.2	Модель, Представление and Контроллер (MVC) относительно пользователя (классическая взаимодействие).	16
3.3	Модель, Представление and Контроллер (MVC) относительно пользователя (взаимодействие в приложении PSAuto).	17
3.4	Принятые за основу сравнения маркеры на углах сенсора PS модуля.	20
3.5	Применение операции Thresolding на изображении маркера	21
3.6	Методика сопоставления шаблонов проиллюстрирована на левом изображении. Красные стрелки указывают направления итеративного расчет метрики в каждой точке основного изображения. Результат работы алгоритма сопоставления шаблонов при использовании тестовых изображений показан на правом изображении. Наиболее вероятное расположение маркера в главном изображении обозначается красным прямоугольником.	22

3.7	На левом изображении схематично изображена оценка планарной ориентации сенсора. Красные стрелки указывают направление вращательного преобразования, применяемого к основному изображению. График зависимости минимального значения метрики от углового преобразования показан на правом изображении. Наблюдается явный минимум при ≈ 3.5 градусах	23
3.8	Скриншот вкладки Threshold приложения PSAuto.	24
3.9	Скриншот вкладки Assembly приложения PSAuto.	25
4.1	Образцы стекла с углами, покрашенными серебряной краской.	28
4.2	Распределение разности по координате X до и после премещения роборуки. $\Delta X \approx 1 \text{ um}$	29
4.3	Распределение разности по координате Y до и после премещения роборуки. $\Delta Y \approx 2 \text{ um}$	29
4.4	Распределение разности значения определённого угла поворота между исследуемым изображением относительно шаблонного изображения до и после перемещения роборуки. $\Delta\theta \approx 0.15 \text{ degree}$	30
4.5	The view of the corner after applying the Threshold.	30
4.6	Sensor marker after applying Threshold.	31
4.7	Screenshot of application during precision estimation test with dummy silicon sensor and marker on it.	32
4.8	X and Y movement trends with respect to iteration number in the touch test.	33
4.9	Distribution of the difference between detected X coordinate of the master image before and after moving the arm in each iteration. $\Delta X \approx 4 \text{ um}$. .	34
4.10	Schematic view of the first module prototype.	35
4.11	Photo of the first assembled prototype.	36
4.12	Microscope photo of the reference corner of the first prototype. Misalignment of the components is around 20 μm	37
A.1	Pattern recognition Flow Chart.	39

Abbreviations

AL-CF	Carbon-Fibre reinforced AL uminium
CF	Carbon- F ibre
CMS	Compact Muon Solenoid
HL-LHC	High Luminosity LHC
LHC	Large Hadron Collider
PS	Pixel Strip (module)
SSBA	Sensor-Spacer-Baseplate-Assembly
2S	2 Strip (module)

Глава 1

Введение

Большой адронный коллайдер (БАК) – крупнейший ускоритель частиц в мире. Во время его первого периода работы с 2010 по 2013 с его помощью были сделаны выдающиеся достижения. Возможно одно из наиболее известных – открытие теоретически предсказанного бозона Хиггса, за что Франсуа Энглер (François Englert) and Питер Хиггс (Peter Higgs) была присуждена Нобелевская премия по физике в 2013 году. Исследование явлений при столкновении частиц высоких энергий БАК происходит в четырёх позициях, расположенных вдоль основного кольца ускорителя и соответствующих четырём детекторам частиц – ATLAS, CMS, ALICE и LHCb [1].

1.1 Компактный мюонный соленоид

Компактный мюонных соленоид (Compact Muon Solenoid или CMS) – это цилиндрический детектор элементарных частиц, разработанный для измерения широкого спектра параметров различных элементарных частиц, производимых во время столкновений (коллизий) протонов и/или тяжёлых ионов БАК. Детектор имеет длину около 28 метров и диаметр около 15 метров. Он является самым тяжёлым детектором элементарных частиц в мире и весит приблизительно 14000 тонн. Своё имя CMS детектор получил благодаря его 3-м ключевым характеристикам: его относительно компактный размер, его исключительная способность в детектировании и измерении мюонов и третья, его основная особенность, – сверхпроводящий соленоид, способный создать магнитное поле до 3.8 Т.

CMS детектор состоит из нескольких слоёв, каждый из которых выполняет свою отдельную роль в детектировании и измерении пролетающих сквозь них элементарных частиц. Схематическое изображение поперечного сечения данных слоёв и их задачи в восстановлении пути элементарной частицы показаны на Рисунке 1.1.

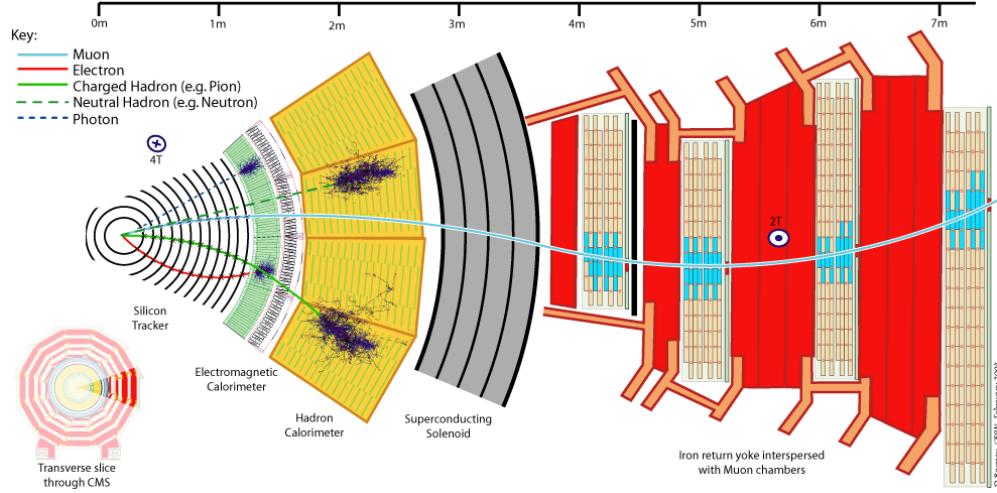


Рис. 1.1: Вид на слои CMS детектора в поперечном разрезе.

1.2 Вторая стадия модернизации CMS трекера

After Phase II Upgrade, the LHC will provide a much higher luminosity. This regime is known as the High Luminosity LHC (HL-LHC). A serious problem presented by these conditions is the enormous data readout rates that exceed far beyond the bandwidth foreseen for the readout electronics. However, the vast majority particles produced in the HL-LHC conditions are not of direct interest for new physics searches and are characterized by low transverse momentum. Thus rejecting tracker “hits” related to low transverse momentum particles can significantly reduce the amount of data to be readout. In order to provide momentum discrimination at the hardware level, a 2-layer module design was created. The central idea of the new modules is to provide fast discrimination between low and high transverse momentum particles by estimating the track curvature caused by the magnetic field within the volume of the module itself. For example, particle with high transverse momentum after hitting some pixel/strip at the first sensor layer would hit on of neighboring pixels/strips of the respective pixel/strip on the second layer. While a particle with low transverse momentum would have a more curved trajectory and hit pixel/strips at a displaced position from the first hit. By varying the distance between sensors and number of neighboring pixel/strips required to match hits in adjacent sensors, (2 neighboring strips in the Figure 1.2) it is possible to set the transverse momentum threshold for a hit [2].

После проведения второй стадии модернизации БАК будет обладать гораздо большей светимостью. Данный режим его работы получил название High Luminosity LHC (HL-LHC) (с англ. – БАК на большой светимости). Серьёзной сложностью условий работы данного режима БАК является является намного больший поток производимых данных, который многократно превосходит пропускную способность

электронных устройств ввода-вывода. Однако подавляющее большинство элементарных частиц, образованных в результате работы HL-LHC малоинтересны в текущих исследованиях физики высоких энергий и характеризуются низким поперечным импульса. Таким образом игнорируя попадания элементарных частиц с низким поперечным импульсом, можно значительно уменьшить объём считываемых данных. С целью обеспечения возможности распознавания момента импульса на уровне аппаратного обеспечения был создан проект двухслойных детектирующих модулей. Основная идея работы новых модулей состоит в разграничении проходящих частиц с низким и высоким поперечным импульсом основываясь на приближенном измерении кривизны траектории вызванной магнитным полем, в котором находится модуль. Например, частица с высоким поперечным импульсом после прохождения детектирующего пикселя/полоски первого сенсора пройдёт через соответствующий пиксель/полоску соседнего второго сенсора. В то время как частица с низким поперечным импульсом будет иметь большую кривизну траектории и пройдёт немного в стороне от соответствующего элемента первого сенсора на втором сенсоре. Варьируя расстояние между сенсорами и количество соседствующих детектирующих пикселей/полосок необходимых для сопоставления областей прохождения на смежных сенсорах модуля (2 соседних детектирующих полоски на Рисунке 1.2), возможно выставить пороговое значение поперечного импульса для проходящей частицы [2].

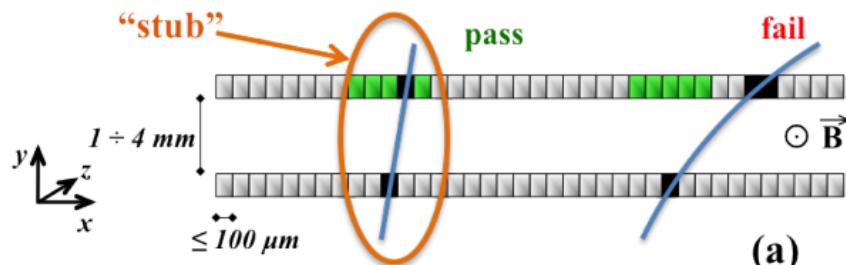


Рис. 1.2: Пример разграничения высокого и низкого поперечного импульса. Частицы, которые пройдут в пределах двух соседних детектирующих полосок второго сенсора от соответствующий полоски первого сенсора, будут считаться как частицы с высоким поперечным импульсом.

Двухслойный детектирующий модули

Трекер CMS детектора второй стадии модернизации будет использовать два типа детектирующих модулей – 2S модули и PS модули. Чтобы достигнуть эффективного распознавания частиц с низким поперечным импульсом по всему объёму трекера, в различных его частях сенсоры модулей будут располагаться на разном расстоянии друг от друга. Для 2S (PS) модулей расстояние будет варьироваться между 1.8 и 4 мм (1.6, 2.6 - 4 мм). PS модуль в разборном виде показан на Рисунке 1.3.

В PS модуле сенсоры приклейены к распоркам изготовленных из алюминия, усиленного углеродным волокном. Они обеспечивают необходимую теплопроводность,

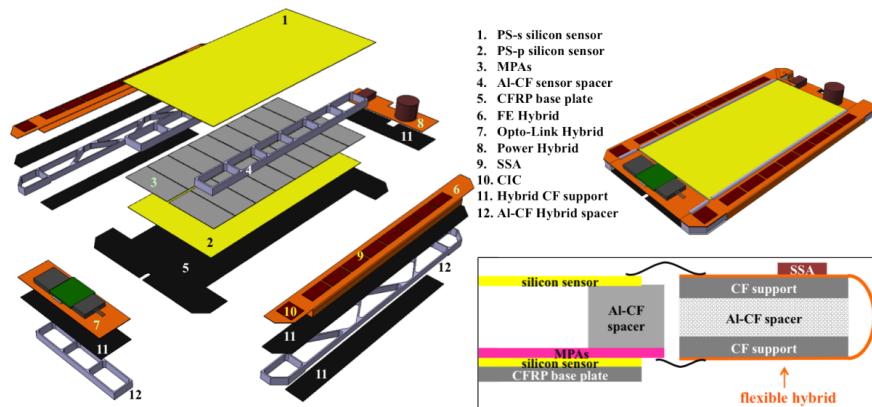


Рис. 1.3: PS модуль в разборном виде.

остро необходимую для охлаждения модуля. Два сенсора вместе с распорками в свою очередь приклеены к опорной пластине из углеродного волокна. Эта структура впоследствии будет называться Сенсор-Распорка-Сенсор-Опора (СРСО). Данная работа ориентирована исключительно на сборку СРСО. Требуемые допущения по точности сборки СРСО показаны на Рисунке 1.4. Для PS модуля сенсоры должны быть расположены с относительной точностью в 40 мкм измеряя с короткой стороны. Данная точность соответствует максимальной неточности в относительном вращении сенсоров на величину 0.8 мрад [3].

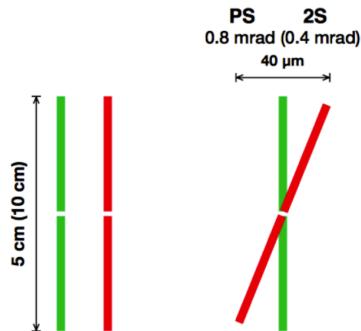


Рис. 1.4: Требования точности к сборке PS и 2S модулей.

Глава 2

Сборка модулей

Сборку высокоточных детектирующих модулей такого рода обычно проводят вручную используя изготовленные на заказ специальные механические фиксирующие платформы. В качестве альтернативы данному привычному методу предлагаются использовать систему автоматизированной сборки.

2.1 Ручная сборка с помощью механической фиксирующей платформы

Один из способов сборки модулей – ручная сборка с помощью изготовленной на заказ специальной механической фиксирующей платформы, прототип которой показан на Рисунке 2.1) [4].

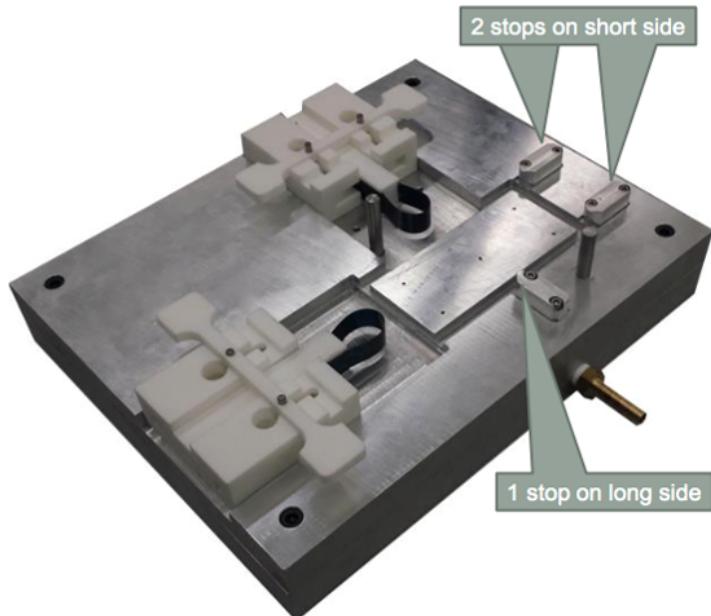


Рис. 2.1: Прототип механической фиксирующей платформы.

При таком способе сборке все составные части размещаются на платформе и собираются вручную. Для обеспечения необходимой точности сборки фиксирующая платформа имеет три опорных стопора: один на длинной стороне и два вдоль более короткой стороны. С противоположных сторонам собирайемый модуль аккуратно прижимается специальными пружинами. Вместе они обеспечивают необходимую точность позиционирования компонентов модуля перед и во время сборки/склеивания.

Однако, описанный выше способ сборки обладает рядом недостатков. Для сборки с его помощью необходимо много времени и данная механическая система плохо масштабируется на промышленные масштабы сборки. Также данный метод обладает относительно плохой повторяемостью собранных модулей, пусть и в пределах необходимой точности, и не предоставляет возможностей контроля процесса сборки. Более того, фиксирующая платформа выставляет высокие требования качества её изготовления (точность выточки деталей должна составлять несколько микрон), а также стопоры требуют регулярной калибровки из-за возможных сдвигов и/или стачиваний их поверхностей. Наконец, данная механическая система требует максимум участия человека в её работе. Несмотря на расчётную точность системы в теории, факт участия человека в сборке означает, что всегда будет существовать какой-то процент бракованных модулей, произведённых только по вине человека.

2.2 Система автоматизированной сборки

Предлагаемая система автоматизированной сборки состоит из трёх подсистем: двигательной подсистемы, подсистема наблюдения, подсистема отрицательного давления (Figure 2.2)[3].

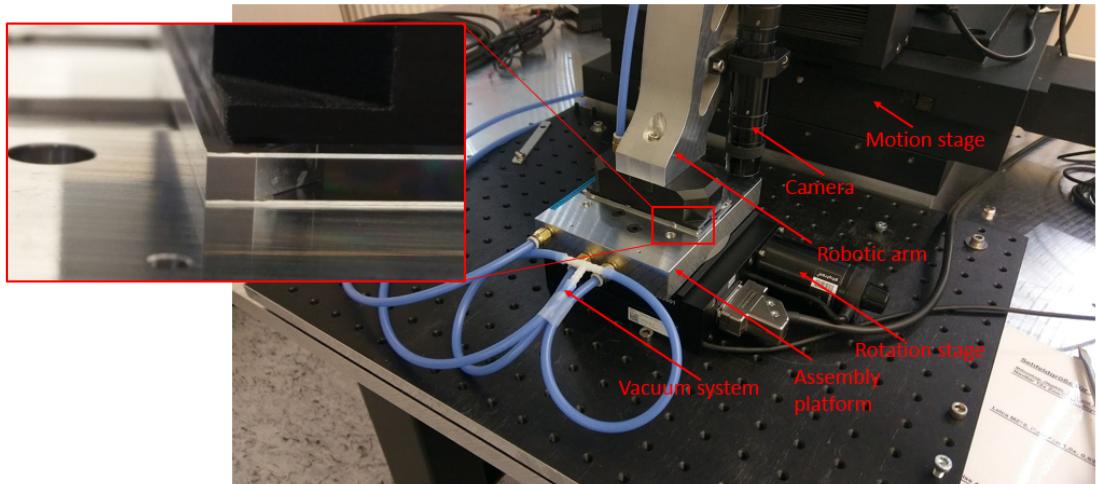


Рис. 2.2: Предлагаемая система автоматизированной сборки.

Двигательная подсистема обеспечивает точные передвижения необходимые для расположения компонентов, из которых состоит СРСП. Движение обеспечивается благодаря двум подвижным элементам двигательной подсистемы, обеспечивающим, первый, по трём координатам и, второй, вращение. Специально изготовленное приспособление из алюминия, далее именуемое "роборукой смонтированной на тот элемент двигательной подсистемы, который обеспечивает движение по трём координатам, таким образом позволяя перемещать компоненты модуля в прямоугольных координатах. Они размещаются на вращательной установке, осуществляющей вращение в плоскости xOy той же прямоугольной системы координат. Элементы двигательной подсистемы управляются специальным блоком управления. Вся аппаратная часть двигательной подсистемы произведена фирмой Lang, которая точность перемещений до 4 мкм и 2 мрад соответственно. *Подсистема отрицательного давления* позволяет закреплять компоненты собираемого модуля на роборуке и вращательной установке. Она состоит из одного насоса, подводящей отрицательное давление к четырём переключаемым клапанам, которые в свою очередь распределяют отрицательное давление по четырём независимым линиям. Переключение клапанов осуществляется путём приложения управляющих сигналов напряжением в 12 В (12 В – включенное состояние, 0 В – выключенное). Управляющие сигналы обеспечиваются специальной релейной картой. Одна линия отрицательного давления подведена к устройству захвата компонентов модуля, крепящегося на конце роборуки, другие – к сборочной платформе. Захватное устройство сделано из ESD пластика, в котором располагается внутренняя камера для распределения подключённого отрицательного давления по специальным направленным вниз присоскам, которые слегка выступают за нижнюю грань захватного устройства. Схематичное изображение устройства захвата отрицательным давлением показано на Рисунке 2.3.

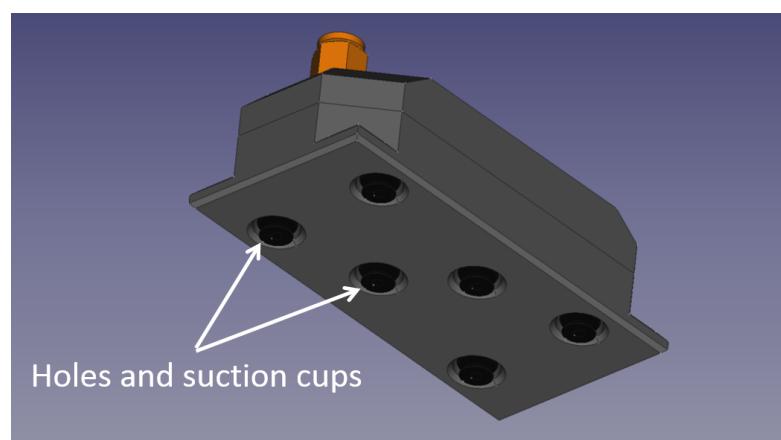


Рис. 2.3: Устройства захвата системы автоматизированной сборки.

Процедура захвата происходит путём касания присосками сенсора, включения подачи отрицательного давления устройству захвата и непосредственному перемещению роборуки вверх с захваченным сенсором. Процедура высвобождения сенсора

начинается с контакта нижней поверхности прикреплённого сенсора (или опорной пластины) поверхности на которую необходимо поместить прикреплённый компонент, выключения подачи отрицательного давления и отвода роборуки в сторону. С целью избежания нежелательных перемещений компонента модуля во время увода роборуки, на сборочной платформе компонент фиксируется специальными присосками снизу, принцип работы которых полностью схож с фиксацией на устройстве захвата.

Подсистема наблюдения делает снимки компонентов, проводит распознавание их расположения и ориентации в пространстве, что является особенно важным для осуществления точной сборки модуля. Она представлена камерой высокого разрешения фирмы IDS и крепится к роборуке. Она зафиксирована в положении, направленном вниз. Основной задачей камеры является делать снимки компонентов до и после их захвата и опускания вниз для последующей обработки этих снимков специализированным программным обеспечением, которое точно определяет положение компонента и его ориентацию.

2.3 Сборочная платформа

Одной из наиболее важных частей системы автоматизированной сборки является сборочная платформа. Её основной задачей является фиксация модулей во время сборки модуля.

Сборочная платформа должна выполнять следующие требования:

1. Фиксация всех необходимых компонентов с помощью отрицательного давления.
2. Обеспечивать возможность расположения двух распорок модуля строго параллельно и на определённом расстоянии.
3. Быть по-возможности лёгкой и иметь центр масс как можно ближе к оси вращения вращательной установки, на которой платформа будет установлена.

Чтобы выполнить упомянутые выше требования, следующий дизайн был предложен (Рисунок 2.4)

Сборочная платформа имеет два углубления, в каждом из которых находятся по три опорных стопора обеспечивающих точное позиционирование распорок модуля. В сравнении с механической фиксирующей платформой, стопоры данной сборочной платформы являются частью платформы, а не прикручиваются отдельно, таким образом они не нуждаются регулярной в калибровке. Однако, наличие данных углублений делает невозможным размещение других компонентов модуля (сенсоров опорной пластины) непосредственно поверх них, так как слишком большая часть их площади остаётся без поддержки под давлением устройства захвата сверху во время склеивания компонентов модуля. Данная проблема была решена путём размещением плоских компонентов модуля (сенсор, опорная пластина) перпендикулярно распоркам на платформе. В данном случае только небольшая часть

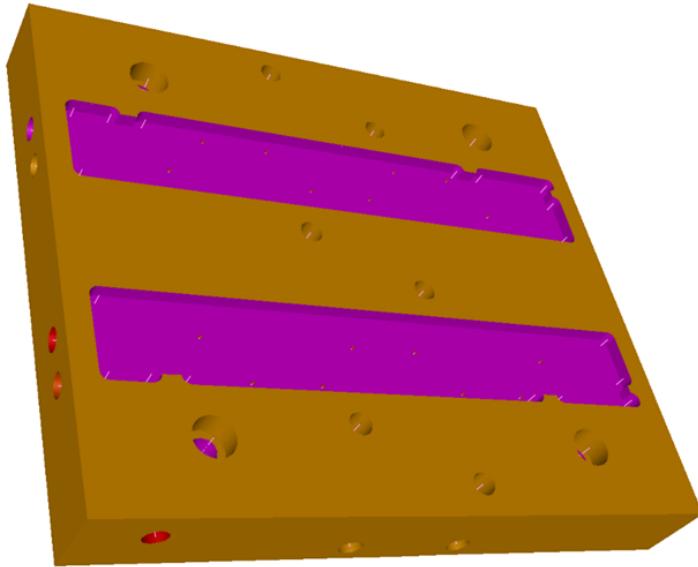


Рис. 2.4: Эскиз сборочной платформы.

данных компонентов не будет иметь поддержки снизу, что не является критичным. Перпендикулярное размещение некоторых компонентов собираемого модуля может быть с лёгкостью осуществлено вращательной платформой, на которой находится сборочная платформа. Центр масс спроектированной платформы находится очень близко к оси вращения – меньше 1 мм. В то время как её масса составляет около 1 кг, таким образом никаких нежелательных эффектов влияющих на точность работы вращательной платформы не ожидается.

Внутри сборочной платформы располагаются две независимые линии отрицательного давления: первая – для удержания распорок, вторая – для удержания сенсоров и опорной пластины. Линия распорок распределяет давление по ряду отверстий (0.7 мм в диаметре) на дне углублений для распорок. Размер и расположение данных отверстий определяется формой распорки (Рисунок 2.5). Эти отверстия не оборудованы присосками из-за своего очень малого размера. Присосок таких размеров попросту нету на рынке. Однако, соприкасающиеся поверхности (дно углублений платформы и соответствующая граня распорки) имеют достаточную плоскость, чтобы утечка "вакуума" была в допустимых пределах и распорки были зафиксированы достаточно плотно.

Вторая линия отрицательного давления распределяет его между присосками, удерживающими сенсоры или опорную пластину. В сборочной платформе используются присоски, абсолютно идентичные захватывающему устройству. Так же, как и в захватывающем устройстве, они слегка выступают за поверхность сборочной платформы. Однако, они не должны препятствовать процессу сборки, а именно этапу приклеивания сенсора к распоркам (этапы сборки будут подробно описаны позднее в данной Главе). Именно поэтому высота углублений меньше толщины распорок, что

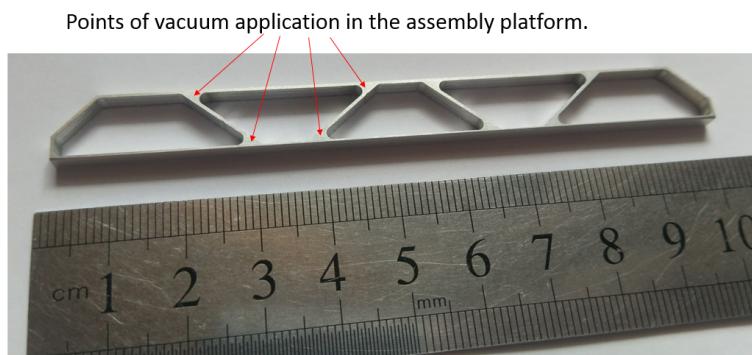


Рис. 2.5: Алюминиевый прототип распорки для PS модуля.

позволяет верней части распорок быть выше верхней части присоски. Другими словами, присоски не препятствуют этап сборки, в которых не участвуют, так как находятся ниже верхней части распорок.

2.4 Быстросохнущее вещество склеивания.

Другой важной частью системы автоматической сборки является склеивающее вещество, используемое во время сборки, говоря точнее – время его высыхания. Другими словами, мало смысла оставлять один модуль на длительное время зафиксированным в установке, просто ожидая пока высохнет склеивающее вещество. Например, основное клейкое вещество, используемое в сборке модуля, требует 24 часов для высыхания. Именно поэтому система автоматизированной сборки нуждается в технологии, которая позволит избежать длительного ожидания. Одно из предложенных решений – использование небольшого количества быстросохнущего клейкого вещества в дополнении к основному. Данное вещество должно удовлетворять следующим требованиям:

1. Обеспечивать необходимую прочность соединения спустя 15 минут применения.
2. Не вступать во взаимодействие с основным kleящим веществом.
3. Обеспечивать тонкий слой (до 30 мкм).

Более того, упомянутые выше требования должны быть выполнены с использованием как можно меньшего количества вещества. Для тестов использовались небольшие алюминиевые бруски формы прямоугольного параллелепипеда (в качестве приближения распорок и усиленного карбоновым волокном алюминия) и образцы стекла (в качестве приближения кремневых сенсоров). Достигение перечисленных требований в высокой степени зависит от двух факторов: первый – способ применения kleящего вещества, второй – непосредственный свойства вещества.

Возможны множество способов применения быстросохнущего kleящего вещества, среди них: несколько его капель внутри слоя основного kleящего вещества,

несколько его капель по краям соединения, заполнение скоса распорок быстросохнущим kleящим веществом, несколько его капель поверх края соединения и др. Для описываемой системы было принято проверить заполнение скоса стопоров быстросохнущим kleящим веществом и несколько его капель по краям соединения. Несмотря на то, что проклеивания по скосу может обеспечить необходимую прочность соединения после 15 минут, намного практичнее применять несколько капель вещества по краям соединения. Оно применялось способом, показанным на Рисунке 2.6.

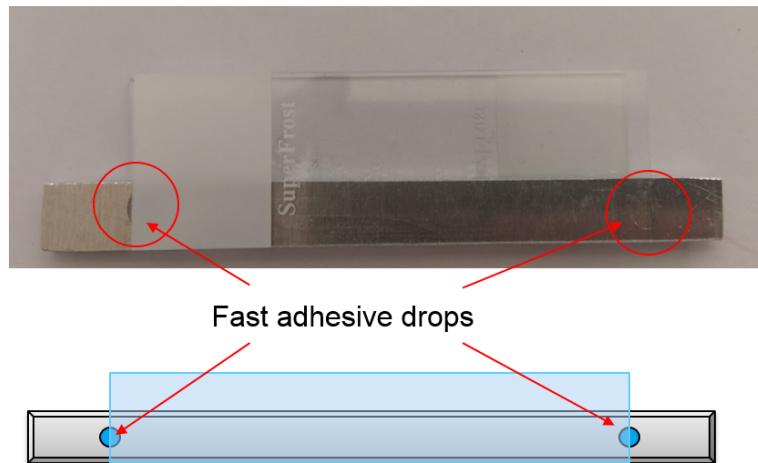


Рис. 2.6: Способ применения быстросохнущего вещества во время тестов. На практике достаточно капель намного меньших размеров для обеспечение необходимой прочности соединения.

Вторая часть вопроса – поиск подходящего быстросохнущего вещества на рынке. Основная сложность вопроса состоит в комбинации двух свойств: *быстрое высыхание и низкая вязкость*. Низкая вязкость есть неотъемлемой свойство kleящего вещества, если необходимо обеспечить тонкий слой вещества. Однако, быстрое высыхание означает, что вещество должно стать твёрдым быстро, чего в свою очередь намного проще достичь, если вещество изначально будет большей вязкости. Несмотря на данные сложности, были подобраны несколько кандидатов для тестирования:

1. *Polytec EP 660*. Согласно технической документации [5], время его высыхания составляет до 16 часов, что выходит далеко за рамки требований. Однако, производитель отметил, что необходимая прочность соединения может быть достигнута без полного высыхания. К сожалению, данное вещество, ожидаемо, не обеспечило необходимое соединение по прошествии 15 минут. Единственным его преимуществом является факт того, что основное kleящее вещество было изготовлено тем же производителем.
2. *Loxéal 31-42*. Согласно технической документации [5], время его полного высыхания составляет $\approx 20\text{--}30$ минут, в то время как время "схватывания" составляет около 3-8 минут. В результате после 15 минут данное вещество обеспечивает необходимую прочность соединения.

3. *Wekem WK5.* Согласно технической документации [6], время его высыхания составляет около пяти минут. Данный образец также обеспечивает необходимое качество соединения после 15 минут высыхания, но kleящее вещество от Loxeal имеет лучшее качество и удобнее в применении. Более того, Loxeal 31-42 обеспечивает более тонкий слой при высыхании под одинаковым давлением – < 20 – в то время как Wekem – $\approx 40 \text{ } \mu\text{m}$ (Рисунок 2.7).

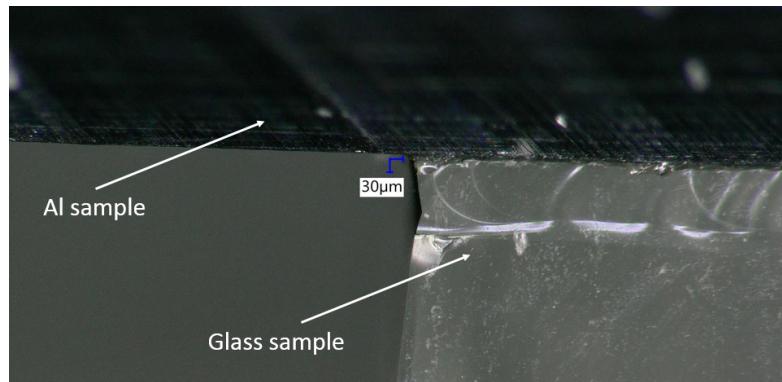


Рис. 2.7: Толщина слоя быстросохнущего kleящего вещества Loxeal 31-42 при высыхании под давлением $\approx 20 \text{ g/cm}^2$

Подводя итоги, Loxeal 31-42 показал лучшие результаты, удовлетворив все требования: он обеспечивает необходимую прочность соединения после 15 минут высыхания под небольшим давлением (around 20 g/cm^2), создавая при этом тонкий слой – < 20 , и демонстрирует отсутствие взаимодействия с основным kleящим веществом.

2.5 Процесс автоматизированной сборки

Процесс автоматизированной сборки СРСП для PS модуля состоит из следующих шагов:

1. *Подготовка верхнего сенсора.* Сперва необходимо поместить верхний сенсор на сборочную платформу и зафиксировать отрицательным давлением. После распознать его позицию и ориентацию в пространстве с помощью камеры и специального программного обеспечения и сохранить данную информацию. Затем захватить и поднять его с помощью устройства захвата и оставить прикреплённым. Начиная с самого первого шага подача отрицательного давления на устройство захвата не прекращается в течении всего процесса сборки.
2. *Подготовка распорок.* Как только верхний сенсор прикреплён к устройству захвата и поднят с платформы, сборочная платформа должна повернуться на 90 градусов таким образом, что распорки будут ложиться в специально отведённый для них углубления корректно ориентированными относительно верхнего сенсора. Далее их необходимо аккуратно прислонить к опорным стопорам и включить подачу отрицательного давления для их фиксации. После

система должна найти и определить положение опорного маркера на сборочной платформе, что позволит однозначно рассчитать положение распорок в пространстве. Отрегулировать их ориентацию с помощью вращательной установки таким образом, чтобы они были параллельны оси Ох двигательной установки, что означает быть сонаправленным верхнему сенсору.

3. *Склейивание верхнего сенсора с распорками.* Как только верхний сенсор и распорки готовы, их положения и ориентации определены, программное обеспечение может вычислить путь для устройства захвата с удерживаемым им верхним сенсором к распоркам. После необходимо поместить основное kleящее вещество на распорки и несколько капель быстросохнущего вещества на краях распорок и передвинуть устройство захвата в расчётную позицию для склеивания с распорками. Особое внимание стоит уделить движению устройства захвата по Z координате, так как это напрямую влияет на толщину слоя kleящего вещества.
4. *Подготовить нижеский сенсор.* По истечении 15 минут капли быстросохнущего вещества обеспечивают необходимое соединение для извлечение склеенных распорок и верхнего сенсора. Для этого необходимо сначала отключить подачу отрицательного давления, удерживающего распорки, и после просто поднять устройство захвата, которое уже будет удерживать не только верхний сенсор, но и приклеенные к нему распорки. После того, как платформа очищена её следует повернуть на 90 градусов так, что нижний сенсор может быть помещён на платформу и зафиксирован отрицательным давлением. Далее необходимо так же, как и для верхнего сенсора, определить его положение и ориентацию с помощью камеры и специального программного обеспечения и сохранить данную информацию. Отрегулировать ориентацию сенсора с помощью вращательной установки таким образом, чтобы он был параллелен оси Ох двигательной установки, что означает быть сонаправленным верхнему сенсору и распоркам.
5. *Склейивание нижеского сенсора с распорки + верхний сенсор.* Все необходимые для данного этапа компоненты зафиксированы и их расположение известно. Следовательно программное обеспечение способно рассчитать путь для устройства захвата и переместиться в позицию склеивания после нанесения главного и быстросохнущего kleящего вещества.
6. *Подготовка опорной пластины.* По прошествии 15 минут склеенная структура может быть поднята. Далее необходимо поместить опорную пластину на сборочную платформу согласно трём опорным штифтам и отверстий для них в самой пластине и зафиксировать её с помощью отрицательного давления. Данные штифты не представлены в текущей версии сборочной платформы.
7. *Склейивание сенсор-распорки-сенсор структуры с опорной пластиной.* Так как

программное обеспечение уже знает расположения опорного маркера на сборочной платформе, следовательно оно способно вычислить позицию склеивания для текущего этапа. Далее устройство захвата передвигается в эту позицию после нанесения основного и быстросохнущего клеящего вещества.

8. *Автоматическая сборка завершена.* По прошествии 15 минут быстросохнущее вещество обеспечивает необходимую прочность соединение и собранный СРСП может быть убран со сборочной платформы и оставлен в другом месте до полного высыхания склеивающих веществ на 24 часа. Однако опорные штифты опорной пластины очень плотно подходят самой пластине, следовательно ручное снятие СРСП может вероятно вызвать его разрушение. Поэтому лучше доверить и данный этап двигательной установке, которая может безопасно поднять собранный СРСП вертикально вверх, сняв его с опорных штифтов.

Глава 3

Программное обеспечение контроля сборки

С целью контроля всей системы автоматизированной сборки было разработано специальное программное обеспечение (Qt приложение) для ПК. Всё необходимое аппаратное обеспечение подключается по интерфейсу USB.

3.1 Общая структура приложения

Контроль подсистемами движения, наблюдения и отрицательного давления интегрированы в одно приложение, именуемого в дальнейшем PSAuto (от автоматизированной сборки PS модуля). Приложение написано на языке программирования C++ и использует Qt фреймворк версии 4.8.7. Схематическая интеграция трёх подсистем автоматизированной сборки изображена на Рисунке 3.1.

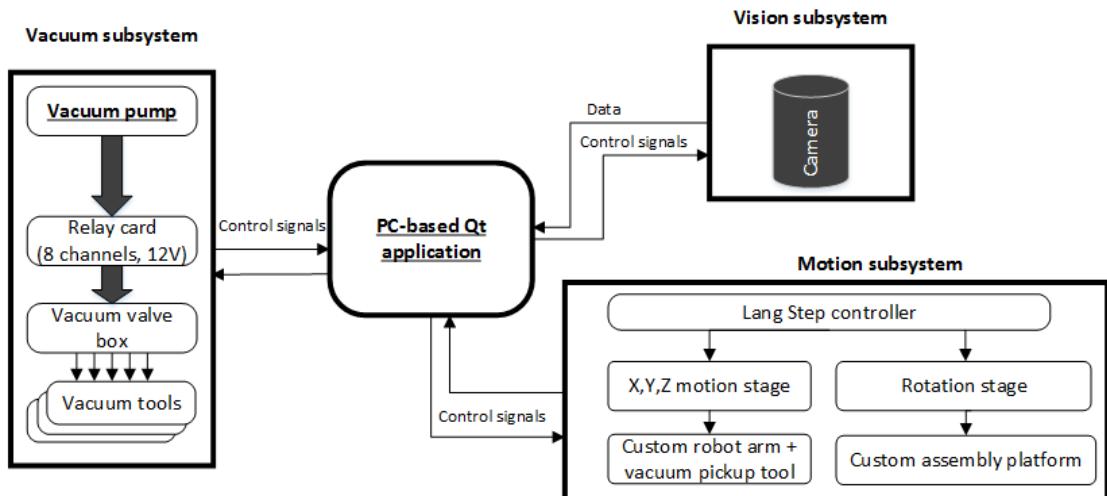


Рис. 3.1: Схематическое изображение интеграции подсистемами движения, наблюдения и отрицательного давления с помощью Qt приложение PSAuto.

3.1.1 Шаблон проектирования Модель-Представление-Контроллер

Структура приложения построено согласно шаблону проектирования Модель-Представление-Контроллер (Model-View-Controller (MVC)). В нём рассматриваются три основных типа объектов: объекты *модели*, объекты *представления* и объекты *контроллера*. При разработке приложения важным шагом является выбор или создание пользовательских классов для объектов, которые попадают в одну из этих трех групп. Каждый из трех типов объектов отделен от других абстрактными границами. Шаблон определяет не только объекты ролей в приложении, но также определяет способ взаимодействия объектов друг с другом [7]. Ключевым моментом MVC является то, что объекты Представления и Контроллера зависят от объектов Модели, однако объекты Модели в свою очередь не зависит от них. Взаимодействие данных типов объектов схематически показано на Рисунке 3.2.

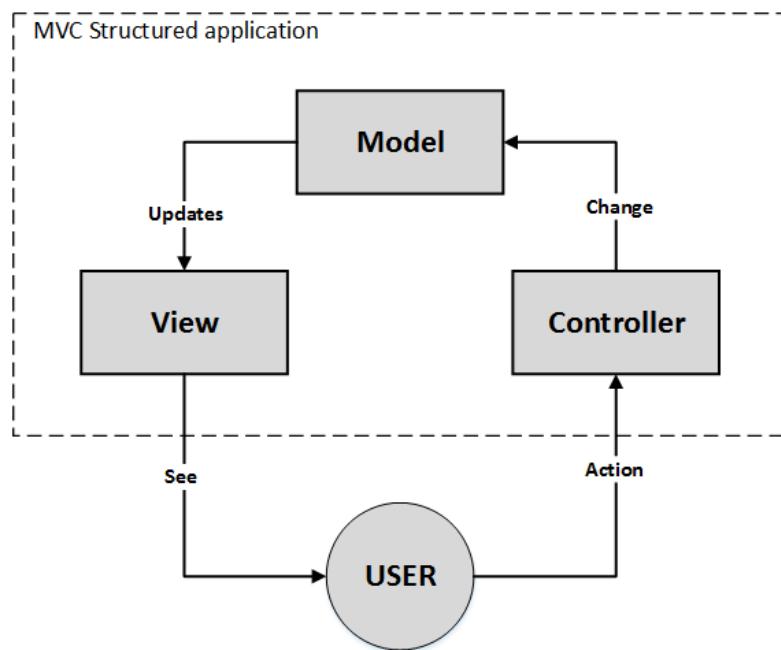


Рис. 3.2: Модель, Представление and Контроллер (MVC) относительно пользователя (классическая взаимодействие).

На Рисунке 3.2 показано взаимодействие объектов классической архитектуры MVC. Существует различные варианты данной диаграммы с точки зрения взаимодействия между объектами MVC. Это зависит от типа приложения и его реализации. Например, в приложении PSAuto данная диаграмма будет иметь вид как на Рисунке 3.3.

По сравнению с классической структурой MVC как на рисунке ??, Модель напрямую не информирует/обновляет Представление. Эта информация проходит через Контроллер, который действует как посредник между Моделью и Представлением. Контроллер часто отвечает за то, чтобы Представление имело доступ к объектам Модели, которые им нужно отображать, и выступает в качестве канала, через который объект Представления узнаёт об изменениях в Модели. Объекты

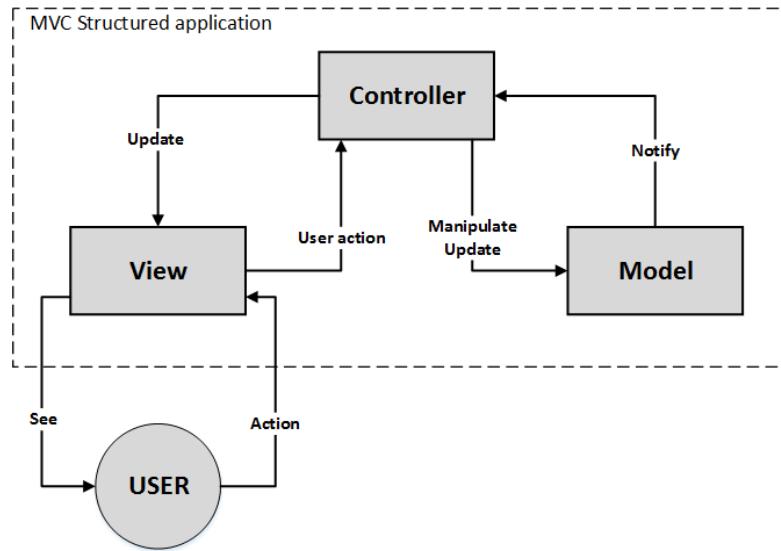


Рис. 3.3: Модель, Представление and Контроллер (MVC) относительно пользователя (взаимодействие в приложении PSAuto).

Контроллера также могут выполнять задачи настройки приложения и управлять рабочими процессами других объектов [7].

В зависимости от логики и требований приложения, Модель, Представление и Контроллер следуют определённым требованиям и обладают определёнными свойствами.

Модель является центральным компонентом системы. Она напрямую работает с данными, определяя логику и правила работы приложения. Более того, как в случае с PSAuto, Модель ещё и регулирует взаимодействие между программным и аппаратным обеспечением. Например, в приложении PSAuto есть объект Модели *ConradModel*, который отвечает за взаимодействие с релейной картой, контролирующей линии отрицательного давления системы. Данный объект полностью соглашается с шаблоном проектирования MVC как объект Модели, так как не зависит от других классов, однако другие классы зависят от него, используя его возможности для своего функционирования.

Представление объединяет все объекты, отвечающие за графический интерфейс приложения: окна, вкладки, формы, поля, кнопки и т.п. Объекты представления отвечают за отображение информации, предоставляемой объектами модели, а также предоставляет пользователю вносить изменения в работы приложения (осуществлять контроль процесса сборки). Например, в приложении PSAuto одна из задач объекта *AssemblyModuleAssembler* контролирует отображение информации о состоянии линий отрицательного давления в реальном времени, а также элементы их управления. Однако, он только отображает элементы контроля и передаёт действия пользователя объектам Контроллера, но сам не участвует в обработке этих действий.

Контроллер в основном ответственный за приём и обработку поступающих данных, генерацию команд для Модели и Представления. Например, в приложении PSAuto объект *ConradManager* предоставляет весь необходимый функционал для контроля линиями отрицательного давления и получения информации об их текущем статусе. Также стоит отметить, что очень часто не существует прямой связи между Моделью и Представлением, как показано на Рисунке 3.2. Вместо этого Контроллер выступает в качестве промежуточного звена, передающего информацию между Моделью и Представлением.

3.1.2 OpenCV library

Множество алгоритмов, обеспечивающий функционал приложения PSAuto, реализуется при помощи библиотеки с открытым кодом — OpenCV (*Open Source Computer Vision*). Это кроссплатформенная библиотека алгоритмов, в основном ориентированных на компьютерное зрение и обработку изображений в реальном времени (OpenCV – от англ. Computer Vision). Данная библиотека была разработана в исследовательском центре Intel в Нижнем Новгороде (Россия). Она распространяется на условиях лицензии BSD и может быть свободна использована в академических целях.

OpenCV была специально ориентирована на высокую вычислительную эффективность и, как уже упоминалось, ориентированность на работу в реальном времени. Она полностью реализована на языке программирования C++ и способна использовать преимущества многоядерных процессорных систем. Также она поддерживает возможность автоматической оптимизации под архитектуру продуктов Intel с помощью библиотек *Integrated Performance Primitives (IPP)*, которые состоят из низкоуровневых оптимизированных подпрограмм в различных алгоритмических областях [8].

Одна из основных задач библиотеки OpenCV – предоставить простую и понятную в использовании инфраструктуру для работы с приложениями компьютерного зрения, что оказывает серьёзную поддержку в разработке достаточно сложных приложений данной области. Библиотека насчитывает более 500 функций, охватывающих множество областей компьютерного зрения и обработки изображений. Ниже приведены основные функции библиотеки OpenCV:

- Ввод/вывод изображений и видео (открытие изображений из файла или непосредственное получение от камеры, вывод изображений/видеофайлов)
- Операции линейной алгебры над векторами и матрицами (умножение, определители, собственные значения, сингулярное разложение).
- Различные динамические структуры данных (списки, очереди, наборы, деревья, графики).
- Основы обработки изображений (фильтрация, обнаружение краев, определение угла, выборка и интерполяция, преобразование цвета, морфологические операции, гистограммы и т.д.).

- Структурный анализ (связанные компоненты, обработка контуров, дистанционное преобразование, совпадение шаблонов, преобразование Хафа, многоугольное приближение, линейная подгонка, эллиптическая подгонка, триангуляция Делоне).
- Калибровка камеры (поиск и отслеживание шаблонов калибровки, калибровка, оценка фундаментальной матрицы, оценка гомографии, стереозапись).
- Анализ движения (оптический поток, сегментация движения, отслеживание).
- Распознавание объектов (метод собственных значений, метод скрытой Марковской Модели).
- Основные элементы графического интерфейса (отображение изображения/видео, управление клавиатурой и мышью, полосы прокрутки).
- Маркировка изображений (линии и другие фигуры, текстовые подписи).

Применение функционала библиотеки будет описано в следующих параграфах.

3.2 Распознавание образов

Распознавание образов является важной функцией всей автоматизированной системы сборки, в частности - подсистемы наблюдения. Она обеспечивает программное обеспечение информацией расположении платформы и компонентов модуля в пространстве и их планарной ориентации. С помощью этой информации программное обеспечение способно вычислить, куда перемещать каждый компонент модуля во время сборки. По определению, планарная ориентация – это вращательная ориентация объекта в горизонтальной плоскости (XY в данном случае) [3].

Для системы автоматизированной сборки планарная ориентация проводится в два этапа: независимое определение *положения* и *ориентации* каждого из четырёх маркеров на углах сенсора и совокупность положений четырёх маркеров, из которой вычисляется конечная точная ориентация всего сенсора. Это делается путем обработки изображений *точных маркеров* в углах сенсоров (Рисунок 3.4), полученных подсистемой наблюдения. Маркеры точно расположены относительно полосок/пикселей сенсора, следовательно, узнав точное положение маркеров, точное позиционирование полосок/пикселей гарантировано. В качестве входных данных алгоритм берет необработанные изображения и возвращает значения положения и ориентации маркеров, расположенных в углах сенсорах PS модуля. Алгоритм распознавания образов использует пакет библиотеки *OpenCV*. Ниже перечислены этапы распознавания положения и ориентации сенсора:

1. Предварительная обработка изображения, полученного с камеры.
2. Определение позиции и планарной ориентации маркера.
3. Определение приблизительного положения следующего маркера и/или конечное вычисление планарной ориентации сенсора.

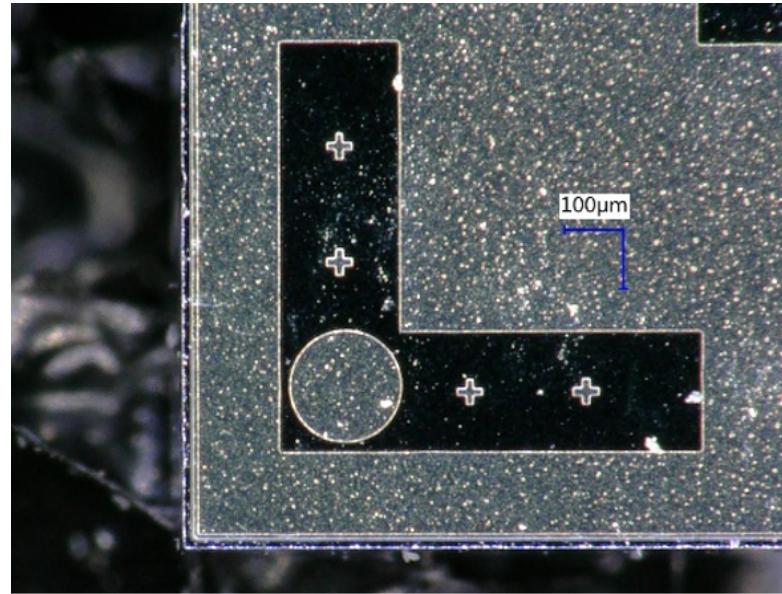


Рис. 3.4: Принятые за основу сравнения маркеры на углах сенсора PS модуля.

3.2.1 Предварительная обработка изображения, полученного с камеры

Необработанное изображение с камеры сперва преобразуется из цветного в изображение в оттенках серого, что известно как "*grayscale*" (от англ. *grayscale* – оттенки серого) в библиотеке OpenCV. Пиксели изображения в оттенках серого содержат информацию об интенсивности в виде одного числа от 0 до 255, характеризующего степень темноты оттенка серого, в отличие от информации об интенсивности и цвете, содержащейся в пикселях цветного изображения. Поскольку маркеры основаны не на цветах, а на простых формах (окружность, угол), то информация о цвете не является полезной и потому не учитывается. Вместо этого изображение в оттенках серого преобразуется в *бинарное* изображение, у которого каждый пиксель либо белый, либо чёрный. Данная процедура получила название "*Thresholding*", от англ. *threshold* – порог (пороговое значение). Операция *Thresholding* заключается в простом конвертировании каждого пикселя изображения в оттенках серого в белый (чёрный) пиксель, если его интенсивность выше(ниже) заданного порогового значения. Данная операция призвана уменьшить различие между изображениями маркеров идентичных сенсоров из-за случайного *шума*, вызванного пылью и случайными различиями на поверхностях маркеров сенсора. Примеры изображения маркера в оттенках серого и его бинарных изображений для различных пороговых значений показаны на Рисунке 3.5. Оптимальное значение порогового значения зависит от общего уровня освещённости вокруг места проведения сборки и контраста маркера на поверхности сенсора. На данный момент, типичное значение порогового значения составляет около 90, что приблизительно соответствует освещению лаборатории лампами дневного света.

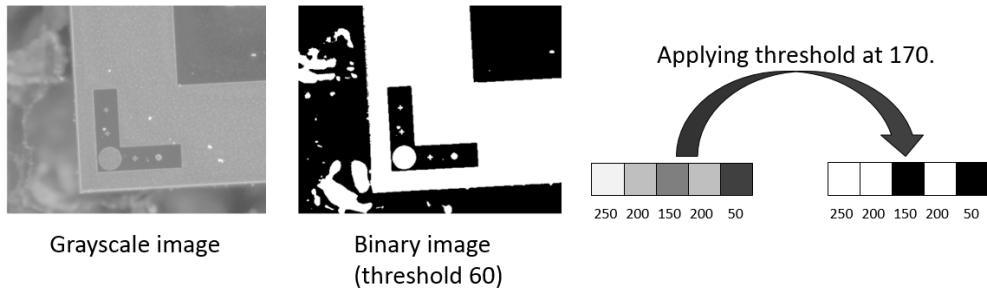


Рис. 3.5: Применение операции Thresholding на изображении маркера

3.2.2 Определение позиции и планарной ориентации маркера

Положение и ориентация маркера на бинарном изображении определяется с использованием стандартным для такой ситуации методом обработки изображений, известным как *сопоставление шаблонов*. Библиотека OpenCV предоставляет однотипную функцию для выполнения таких задач. Метод находит ту часть исследуемого изображения, которая больше всего походит на шаблонное изображение. В случае автоматизированной сборки исследуемым изображением является преобразованное в бинарное изображение полученное с камеры, а шаблонным – заранее подготовленное бинарное изображение маркера.

Сопоставление шаблонов начинает с итеративного сопоставления шаблонного изображения в каждой точке исследуемого изображения и высчитывает определённое числовое значение, или метрику, показывающее степень схожести шаблонного изображение с частью исследуемого изображения, которая соответствует данной точки. В приложении PSAuto эта точка является левой-верхней точкой данной части исследуемого изображения. Библиотека OpenCV предоставляет множество вариантов вычисления значения этой метрики. Аналогичные результаты наблюдаются для каждой из возможных метрик, поэтому была выбрана наиболее скоростная по вычислительной сложности – метрика, основанная на нормированной квадратичной разности интенсивностей налагающихся пикселей исследуемого изображения и шаблона:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x',y'}(T(x', y') - I(x + x', y + y'))^2}{\sum_{x',y'} \sqrt{\sum_{x',y'} T(x', y')^2 \cdot \sum_{x',y'} I(x + x', y + y')^2}}$$

где I означает исследуемое изображение, T – шаблонное изображение and R – результатирующая метрика.

Данная метрику можно найти под именем CV_TM_SQDIFF_NORMED в библиотеке OpenCV. Точка исследуемого изображения, в которой метрика достигнет минимального значения показывает наиболее вероятное положение шаблонного изображения, маркера в случае автоматизированной сборки. На Рисунке 3.6 изображен процесс определение положения маркера с помощью сопоставления шаблона и его результат с использованием маркера на пробном сенсоре. После нахождения наиболее вероятного положение маркера алгоритм выделяет его белым прямоугольником

на исследуемом изображении. Наблюдаемое на Рисунке 3.6 местоположение близко соответствует ожиданиям.

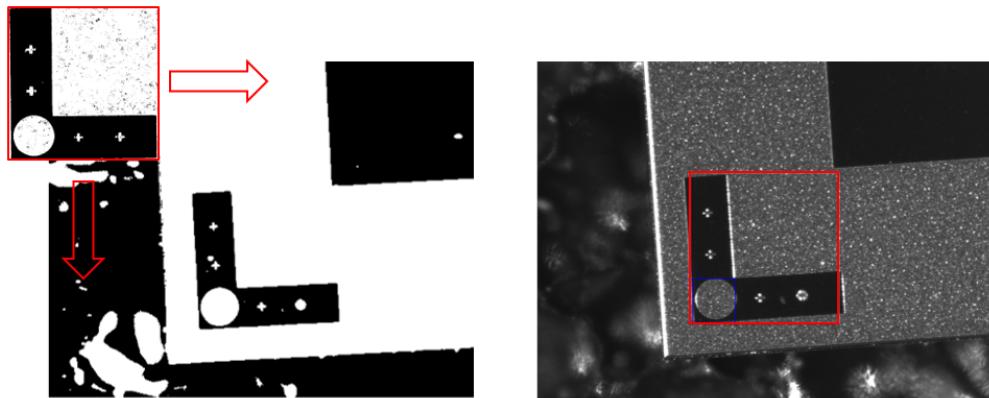


Рис. 3.6: Методика сопоставления шаблонов проиллюстрирована на левом изображении. Красные стрелки указывают направления итеративного расчета метрики в каждой точке основного изображения. Результат работы алгоритма сопоставления шаблонов при использовании тестовых изображений показан на правом изображении. Наиболее вероятное расположение маркера в главном изображении обозначается красным прямоугольником.

Чтобы вычислить ориентацию маркера в плоскости, перпендикулярной оптической оси камеры, процедура сопоставления шаблонов итеративно повторяется с различными вращательными преобразованиями для разных углов (в установленных пределах с определённым шагом), применяемыми к части исследуемого изображения, где предварительно маркер уже был найден без информации о его ориентации на плоскости. В каждой итерации сохраняется минимальное значение метрики, а по окончании цикла строится график зависимости значения метрики от угла поворота исследуемого изображения. В силу симметричности формы маркера, данный график напоминает параболу, ветви которой направлены вверх, с минимум в точке того угла поворота исследуемого изображения, при котором шаблонное изображение лучше всего накладывается на исследуемое изображение. На Рисунке 3.7 схематично изображено определение планарной ориентации маркера, в правой части которого изображён график, соответствующий тесту выполненному с изображением сенсора, где он имел планарную ориентацию около 3.5 градуса. Соответственно на графике чётко виден минимум при ≈ 3.5 градусах. Большая точность измерение ориентации сенсора может быть достигнута путём оптимизации таких факторов, как окружающее освещение, фокусировка изображения и форма маркера. Наилучшая точность, достигнутая во время тестов, составила 0.025 градуса, что более чем достаточно для целей проекта, так значение ориентации, полученное таким способом используется лишь для перепроверки конечной ориентации сенсора.

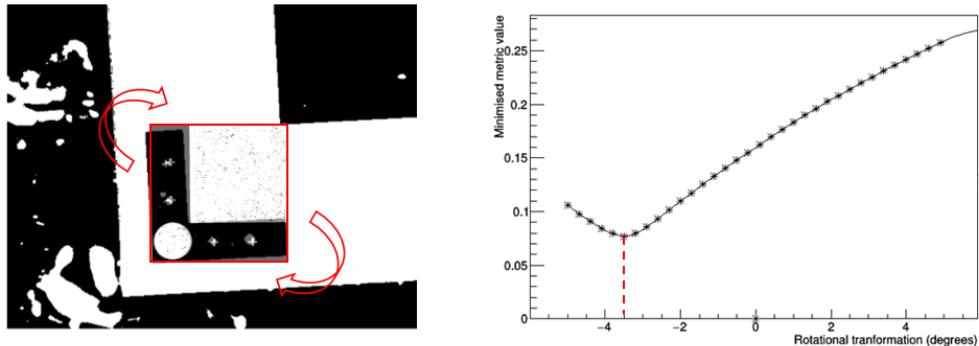


Рис. 3.7: На левом изображении схематично изображена оценка планарной ориентации сенсора. Красные стрелки указывают направление вращательного преобразования, применяемого к основному изображению. График зависимости минимального значения метрики от углового преобразования показан на правом изображении. Наблюдается явный минимум при ≈ 3.5 градусах

3.2.3 Определение приблизительного положения следующего маркера и/или конечное вычисление планарной ориентации сенсора

Процедура, описанная на шаге 2, повторяется для каждого угла сенсора. Значение планарной ориентации, определенные в каждом углу, используются для того, чтобы задать направление движения, необходимое для того, чтобы роборука автоматически переместилась к соседнему углу. Конечная позиция и ориентация датчика определяются с помощью критерия χ^2 для четырех точек (x, y). Полученное таким образом значение ориентации сенсора сверяется с приближенными значениями ориентации для маркера каждого из четырёх углов. Если они совпадают в пределах допустимой погрешности, то это значение ориентации сенсора может использоваться в дальнейшем.

Подробная UML диаграмма алгоритма распознавания образов в системе автоматизированной сборки продемонстрирована в Приложении ??.

3.3 Функционал приложения

The main window of the application has several buttons and check boxes on top of the window and a number of tabs including: Finder, Threshold, Assembly, Autofocus, Motion Manager and others.

Главное окно приложения PSAuto имеет несколько кнопок и флагов в верхней части и ряд вкладок ниже, включая следующие: Finder, Threshold, Assembly, Autofocus, Motion Manager и другие.

1. *Finder*. От англ. *finder* – искатель. Простая вкладка, единственной задачей которой является демонстрация последнего снятого снимка камерой. Также в этой вкладке это изображение можно сохранить.

2. *Threshold*. От англ. threshold – порог, граница. Результат операции Thresholding в высокой степени зависит от условий освещения, поэтому каждый новый тест требует калибровки значения применяемого порогового значения для максимально эффективной работы операции Thresholding. Данная вкладка специально создана для осуществления контроля над данным значением. С её помощью можно настраивать пороговое значение и получать мгновенный отклик в виде применение операции Thresholding к последнему снятому изображению с новым пороговым значением. Изображения до и после применения данной операции также демонстрируются в левой части вкладки. Скриншот вкладки Threshold показан на Рисунке 3.8.

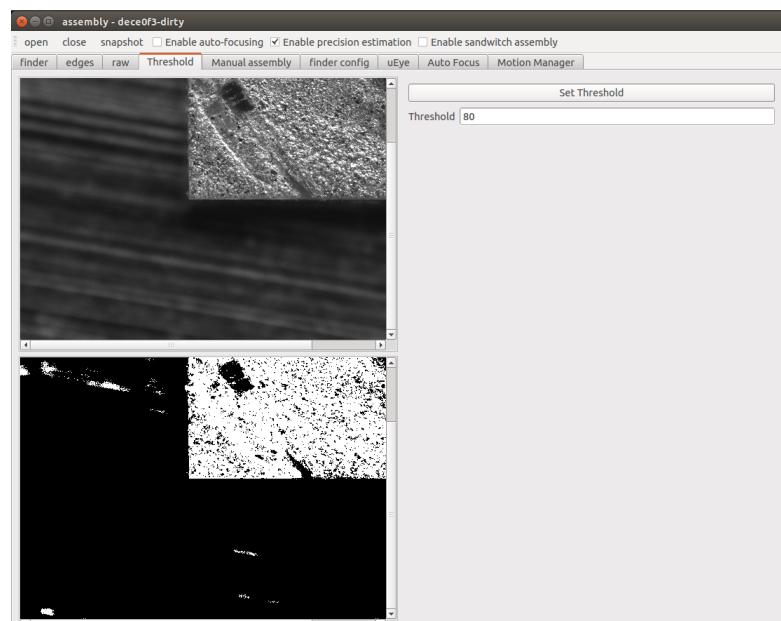


Рис. 3.8: Скриншот вкладки Threshold приложения PSAuto.

3. *Assembly*. От англ. assembly – сборка. Это основная вкладка приложения (Рисунок 3.9). Она включает в себя четыре окна с изображениями слева, средства управления справа и статус двигательной установки в реальном времени. Левое-верхнее окно содержит последнее снятое изображение. Левое-нижнее окно – бинарное изображение после применения операции Thresholding. Правое нижнее окно содержит шаблонное изображение маркера. Наконец, правое-верхнее окно содержит финальный график распределения метрики последней операции распознавания образов.

В правой части вкладки расположены набор средств управления (перечисляя сверху вниз):

- Две кнопки для перемещения устройства захвата в абсолютные или относительные координаты, которые записываются в поля справа от них, соответственно.

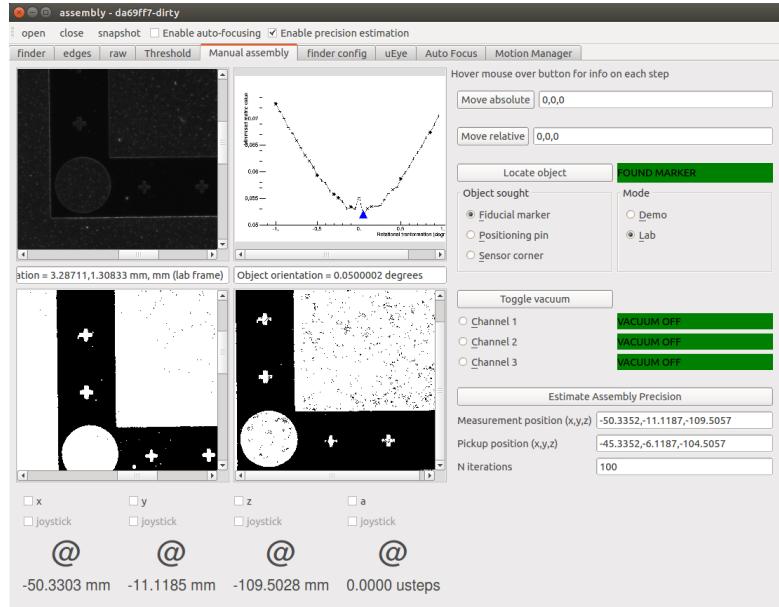


Рис. 3.9: Скриншот вкладки Assembly приложения PSAuto.

- Набор радио-кнопок для выбора типа шаблона маркера и режим работы распознавания образов.
- Набор радио-кнопок для контроля релейной картой линий отрицательного давления. Справа от каждой кнопки отображается текущий статус соответствующей линии.
- Последний инструмент позволяет проводить набор тестов системы. Он состоит из нескольких форм для исходной информации для теста и, ожидаемо, кнопку начала теста. Тесты выполняются в полностью автоматическом режиме и могут длиться неограниченно долго.

4. *Auto focus*. От англ. *auto focus* – автофокус. Ещё один полезный инструмент приложения – способность проводить автоматическую фокусировку камеры. Данная функция играет очень важную роль в работе процедуры распознавания образов, так как от качества её проведения непосредственно зависит качество снимаемых изображений. Данная вкладка позволяет осуществлять две основные функции: найти положение камеры с лучшим фокусом и переместить камеру в это положение. Чтобы найти положения сфокусированное положение камеры необходимо пройти ряд шагов вдоль оси Z двигательной установки. Чем меньше шаг, тем точнее будет определено сфокусированное положение камеры. Идея работы данного алгоритма схожа с определением ориентации маркеров в алгоритме распознавания образов. Для каждого шага высчитывается и сохраняется определённое значение метрики, характеризующее степень размытости изображения, для чего используется функция библиотеки OpenCV `getImageBlur()`. Таким образом, сравнивая значения метрик каждого шага, программное обеспечение способно найти положение камеры, при котором получаемое изображение имеет наименьшее размытие.

Данный алгоритм также может использоваться и с другой целью. В силу того, что камера постоянно зафиксирована на роборуке, существует возможность измерения относительного расстояния вдоль оси Z до объекта под камерой. Данное применение возможно, например, для измерения толщины слоя kleящего вещества собранного СРСП или контроля любых других метрических параметров модуля.

5. *Motion Manager*. От англ. motion manager – менеджер передвижений. Данная вкладка предоставляет контроль над всеми механическими движениями системы. Её функционал включает в себя:

- Независимый контроль вращения и движения по всем трём осям.
- Автоматическая калибровка.
- Слежением за статусом всех элементов двигательной подсистемы в режиме реального времени, включающие в себя четыре шаговых двигателей (один на вращение и три на движение по вдоль трёх осей).

Глава 4

Тестирование системы и сборка первого прототипа

Система автоматизированной сборки обладает рядом свойств с точки зрения точность сборки:

1. Повторяемость передвижений двигательной установки.
2. Повторяемость съёмки изображений.
3. Точность процедуры распознавания образов.
4. Возможные движения сенсора во время его захвата и отпускания с помощью системы отрицательного давления.

С целью изучения данных свойств был проведён ряд тестов системы.

Настоящие сенсоры будут иметь очень малую толщину (200 мкм), что делает их очень хрупкими. Даже несмотря на то, что для тестов могут быть использованы фиктивные сенсоры, толщина которых составляет 300 мкм, они всё ещё слишком хрупки для первых тестов, во время которых вероятность непштатных ситуаций заметно выше. По этой причине для первых тестов захвата использовались использовались образцы из стекла. Они имеют такие-же размеры и достаточно близки по механическим свойствам с кремниевыми сенсорами. Более того, они заметно дешевле и, следовательно, в случае неудачного теста потеря стеклянного образца не так критична, как кремниевого фиктивного сенсора. Несмотря на всё, сказанное выше, ни один из стеклянных образцов не был разрушен во время тестов и тестовых сборок.

Хотя тесты захвата кремниевых сенсоров не проводились в виду рисков, возможность получения некоторой информации об их поведение в данном тесте можно спрогнозировать без непосредственного проведения теста. Проведя полный набор тестов со стеклянными образцами и проанализировав их результаты, можно будет сделать выводы о том, как процесс захвата и выпуска влияет на точность/позиционирование образца. Позднее, после точной калибровки параллельности нижней поверхности устройства захвата относительно поверхности сборочной платформы и

проведения необходимых тестов программного обеспечения, можно будет уточнить предсказанные результаты с гораздо меньшими рисками неудачного исхода.

4.1 Тест точность процедуры распознавания образов

С целью исследования точности процедуры распознавания образов ряд следующих тестов был проведён. В ходе этих тестов исследуемые образцы (и стеклянные, и кремниевые) оставались неподвижными, поэтому ошибки, вносимые нежелательным ожидаемым смещением образца во время процедуры захвата, исключаются.

4.1.1 Распознавание образов на угле стеклянного образца

В самом первом teste точности распознавания образов в качестве маркеров стеклянных образцов просто использовались их углы. Для теста использовались тонкие образцы стекла с углами, покрашенными серебряной краской для лучшего контраста на бинарном изображении (Figure 4.1).



Рис. 4.1: Образцы стекла с углами, покрашенными серебряной краской.

Пошаговое описание теста приведено ниже:

1. Передвинуться в позицию для съёмки изображения.
2. Сделать снимок и провести процедуру распознавания образов.
3. Передвинуться на 5 мм по всем осям
4. Вернуться в позицию для съёмки изображения.
5. Сделать снимок и провести процедуру распознавания образов.
6. Сохранить данные данной итерации и перейти к следующей.

После каждой итерации приложение сохраняет разницу между измеренными координатами маркера до и после перемещения роборуки. Итоговое распределение данных величин изображено на Рисунках 4.2, 4.3 и 4.4 для оси X, Y и α , соответственно. Тест состоял из 100 итераций, сделанных подряд.

Looking at the Figures 4.2 and 4.3 one can see that the X, Y detection of the pattern recognition has precision of around 1-2 um, while the theta detection results do not look

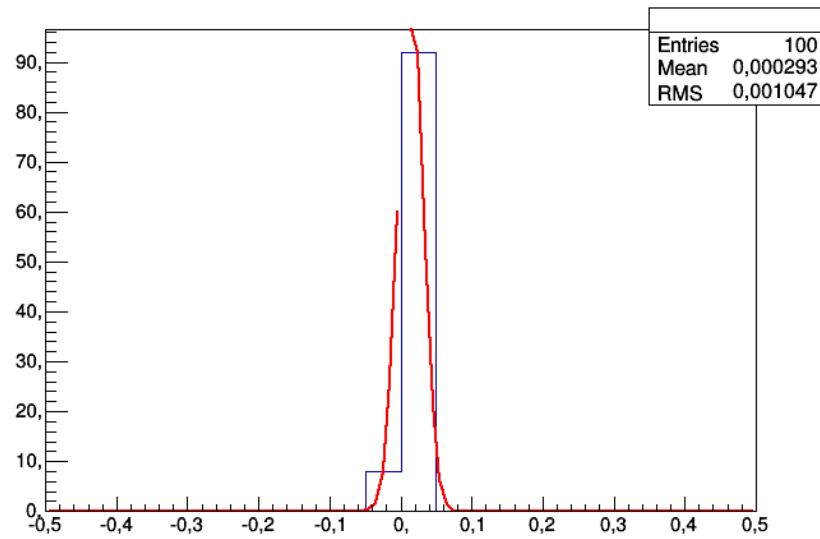


Рис. 4.2: Распределение разности по координате X до и после премещения роботуки. $\Delta X \approx 1 \text{ um}$.

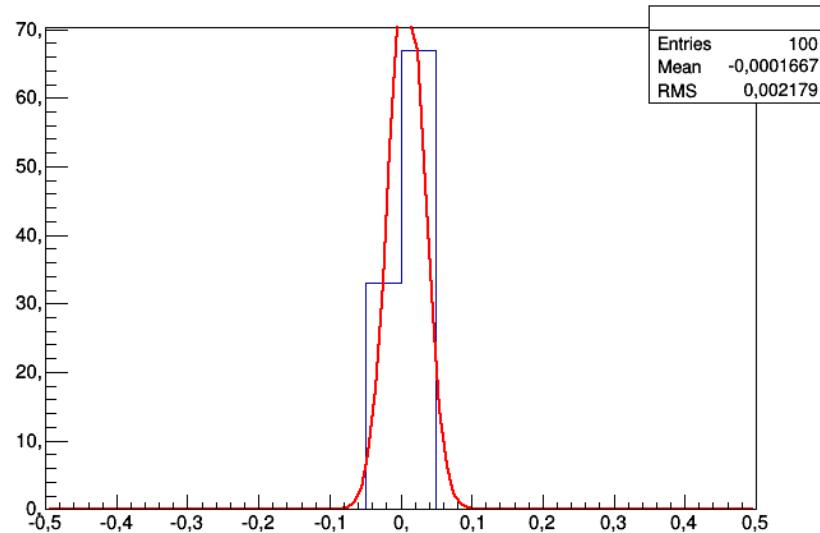


Рис. 4.3: Распределение разности по координате Y до и после премещения роботуки. $\Delta Y \approx 2 \text{ um}$.

so precise. There are several reasons of such behaviour. The main one them is shown on the Figure 4.5.

На Рисунках 4.2 и 4.3 можно видеть, что повторяемость измерения координат X, Y находится в пределах 1-2 мкм, в то время как

Silver painted surface is not flat in 10 um scale. Due to this roughness different amount of light reflects to the camera from different points along the painted surface. That is why the painted corner contains various shades of grey, which in some points are darker, than the table underneath the sample (background). All these result into the

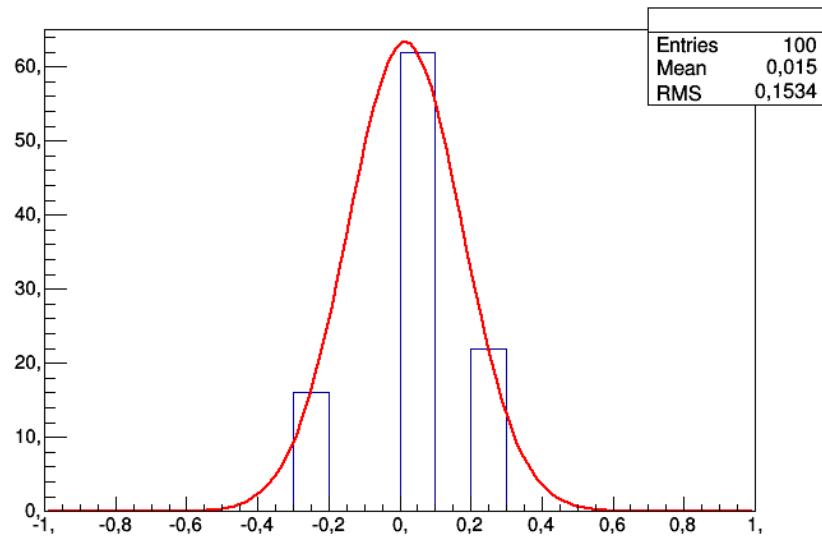


Рис. 4.4: Распределение разности значения определённого угла поворота между исследуемым изображением относительно шаблонного изображения до и после перемещения роборуки. $\Delta\theta \approx 0.15 \text{ degree}$.

picture one can see in the Figure 4.5. This kind of pictures has random distribution of dark areas on it. That is why the pattern recognition algorithm has such error while comparing two pictures (master template and acquired image) with random distribution of black areas. Moreover, this kind of tests lasts around one hour, which is long enough for the sun to change the ambient light in the laboratory. Even though all reasonably possible measures were done to prevent such effect, the acquired image is very sensitive for light. For example, the effect of the sun light can result in the threshold variation for 20 units (the color depth is 256) even with covered window in the laboratory.



Рис. 4.5: The view of the corner after applying the Threshold.

4.1.2 Pattern recognition on the marker of the dummy sensor

The same test, but with dummy silicon sensor and real marker on it, was done. Before the test marker was aligned as much close to zero degrees as possible. At the Figure 4.6 one can see that the edge of the marker after applying Threshold is almost perfect (+/- one pixel). This fact itself is already a proof that Threshold step of pattern recognition is feasible.

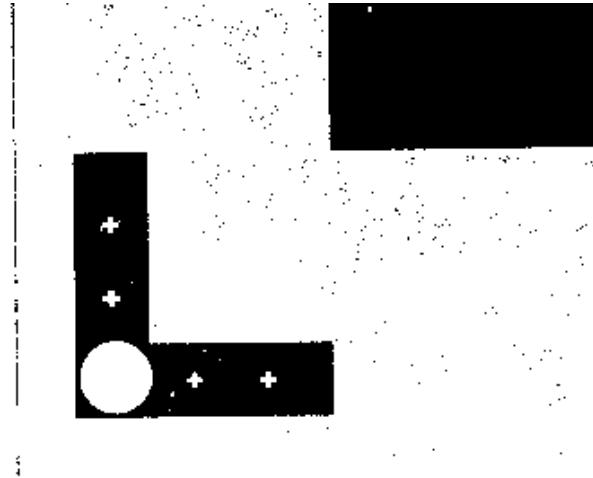


Рис. 4.6: Sensor marker after applying Threshold.

The Distribution of X, Y coordinates and theta shows better results than with painted corner, which was expected. For X and Y it is less than a micron, which is already at the limit of camera resolution. $\Delta\theta$ is one order of magnitude better than with painted corner — $\approx 0.02\text{degree}$.

A screenshot of the application during the test is shown on the Figure 4.7. On the pattern recognition curve one can see that at 0 degree there is an unexpected short upward shot. This peak is not a fluctuation and it is not consist of only one point in the plot. As the scale increases, more points form this peak appear. It was not observed in the previous test just because the theta step was one order of magnitude bigger.

4.2 Pickup precision tests

Next set of tests were oriented to explore the effect of pickup and setdown on the precision of the system. In other words, will this process move the sample or not in XY plane. Due to the risk of breaking fragile silicon samples, we used glass ones.

4.2.1 Pickup precision tests without assembly platform

The first pick-up/down test was done without assembly platform. The step-by-step outline of this test is listed below:

1. Move to the image acquiring position.
2. Acquire image and run pattern recognition.

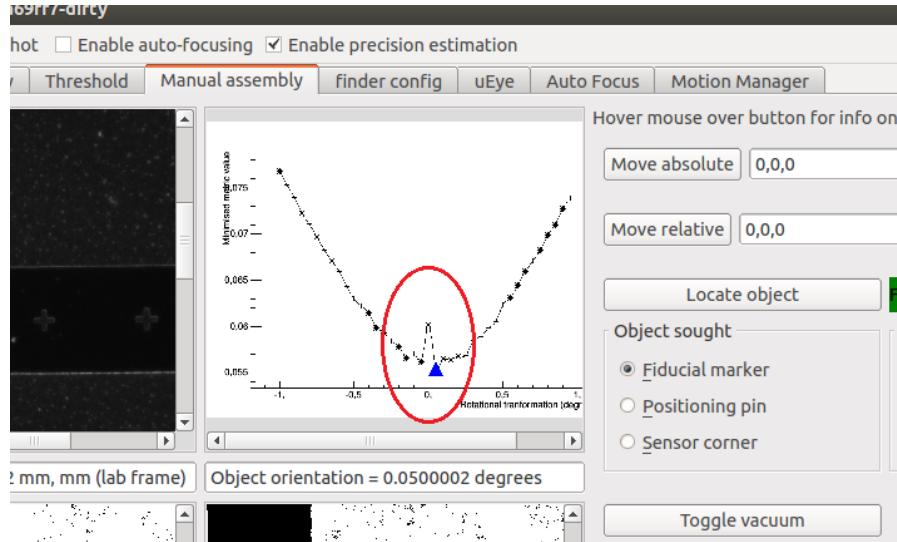


Рис. 4.7: Screenshot of application during precision estimation test with dummy silicon sensor and marker on it.

3. Move to pre-pickup position.
4. Move to pickup position.
5. Turn negative vacuum on.
6. Move up.
7. Move down.
8. Release vacuum.
9. Move down.
10. Move to pre-pickup position.
11. Move to the image acquiring position.
12. Acquire image and run pattern recognition.
13. Save data of the current iteration and go to the next one.

One can notice the step of moving first to pre-pickup position before going to the pickup position and visa versa. This step is essential. The motion stage provides equal speed in all three axes, so when it receives a command to move to some position it starts to move with equal speed in each of three directions towards the destination simultaneously. As soon as destination in one axis is reached, it obviously stops moving in this axis while moving in other axes is going on. Therefore there is an unlike situation when the robotic arm reaches the sample in Z-axis while X and Y axes would still keep moving, which may cause damage or even break a sample. To prevent such situation we added the step of moving to pre-pickup position.

The results of the test showed movement of the sample, which could be noticed with a naked eye. In order to minimize this movement we decided to make a touch test – the same as pickup and setdown, but without vacuum. Such kind of test can show the contribution of the touch to the sample movement in the pick-up and -down test. The results if this test was quite similar to the previous test, which means that the touch itself contributes the most to the sample movements in the pick-up and -down

test. The interesting fact of this movement is its trend. On Figure 4.8 one can see X and Y movement trends with respect to iteration number in the touch test. This plots show that the movement is not random and it is more or less constant both in value and direction.

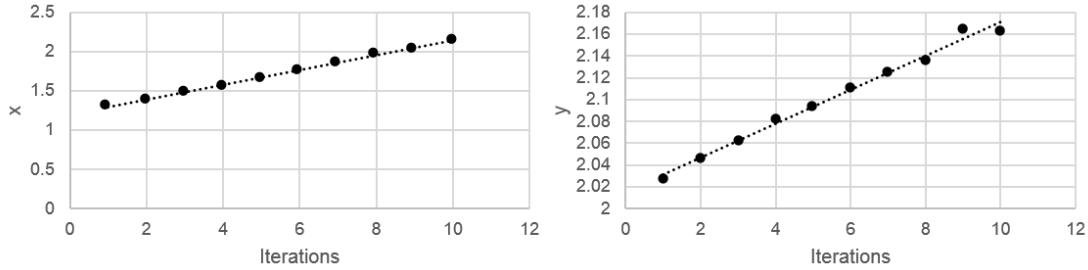


Рис. 4.8: X and Y movement trends with respect to iteration number in the touch test.

The most probable reason for such effect is that pickup tool surface is not parallel to the table, where samples lay waiting for being picked-up. This fact perfectly corresponds to the constant movement of a sample to the one direction. Unfortunately, it is very complicated to align this surface parallel enough to make sample movement negligible. Another way to avoid this movement is to use an assembly platform, which can hold samples with vacuum underneath so they would be fixed.

4.2.2 Pickup precision tests with assembly platform

The step-by-step outline of the pickup and setdown test with the assembly platform is very similar to the one without it. The only difference is that samples are always fixed by the underneath vacuum and are only released, when the vacuum from pick-up tool is provided, so it can lift the sample upwards.

1. Move to the image acquiring position.
2. Acquire image and run pattern recognition.
3. Move to pre-pickup position.
4. Move to pickup position.
5. Turn pick-up tool negative vacuum on.
6. Turn assembly platform negative vacuum off.
7. Move up.
8. Move down.
9. Turn assembly platform negative vacuum on.
10. Turn pickup tool negative vacuum off.
11. Move down.
12. Move to pre-pickup position.
13. Move to the image acquiring position.
14. Acquire image and run pattern recognition.
15. Save data of the current iteration and go to the next one.

Distribution of the difference between detected X coordinate of the master image before and after moving the arm in each iteration is shown on the Figure 4.9.

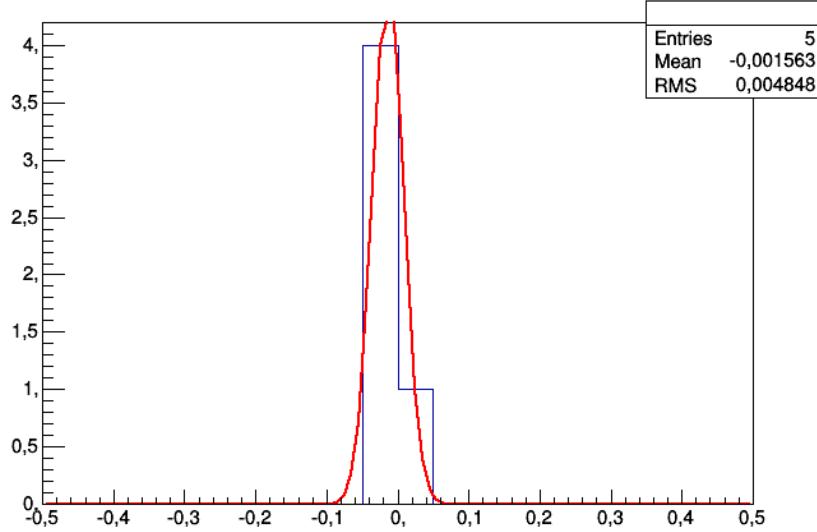


Рис. 4.9: Distribution of the difference between detected X coordinate of the master image before and after moving the arm in each iteration. $\Delta X \approx 4 \text{ um}$.

As one can see from the Figure 4.9, $\Delta X \approx 4 \text{ um}$, which is very close to the limit of 1 um of the pattern recognition itself without touching the sample. Moreover, the X and Y coordinates show no trend with respect to the iteration number. Taking into account these results, it is possible to say that using an assembly platform can fix samples enough tight, so it is possible to neglect their movements.

4.3 First assembled prototype

After all tests mentioned above it was possible to assemble the very first prototype of the module. To test the precision of the assembling module for the first time it was decided to use simplified assembly algorithm, which would provide maximum precision only on one corner. Schematic view of the first module prototype is shown on the Figure 4.11.

The step-by-step outline of the assembly process is listed below:

1. *Place and align top sample parallel to X-axis of motion stage and lift it up with pick-up tool.* Place top sample on the assembly platform and fix it with vacuum. Find with the pattern recognition its orientation in space. Rotate the platform to align top sample parallel to the edge of the pick up tool. As soon as theta recognition do not provide enough accuracy, the following method was used. Move camera for 5 cm along the sample edge and measure the shift of the sample edge. Knowing two cathetus of it is possible to find the angle of the right triangle, which equals to the angle between sample edge and x-axis of motion stage. Rotate the assembly

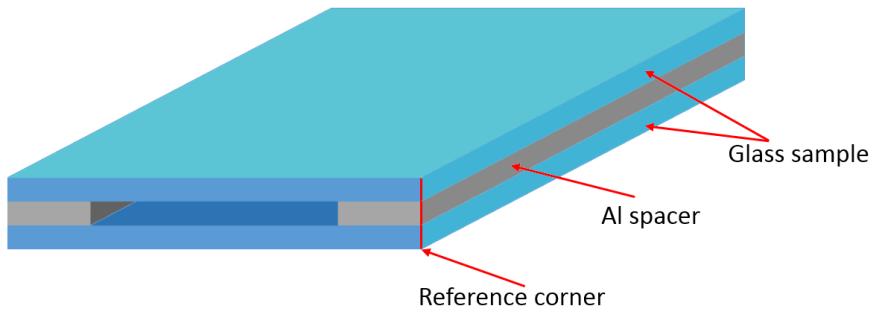


Рис. 4.10: Schematic view of the first module prototype.

platform for this angle. To sum-up, first – rough top sample orientation estimation with direct pattern recognition, second – precise calculated sample orientation with Pythagorean theorem. Now the top sample is aligned enough parallel to the X-axis of the motion stage. Next, save position of the reference corner with a pattern recognition. Finally, pick-up top sample with pick-up tool and leave it there.

2. *Place Al spacers.* Put Al spacers to the inserts, fix them with bottom vacuum and align them parallel to the X-axis of the motion stage. Absolutely the same way as with top sample. Save the coordination of the reference corner with pattern recognition. Comparing coordinates of the reference corners of Al spacer and top sample, move the robotic arm in XY plane of the motion stage so they would match.
3. *Glue Al spacers to the top sample.* Place the glue on Al spacers and move robotic arm with attached top sample down. It is important to move robotic arm down for exactly correct distance. This topic was discussed in details in the Module Assembly Chapter. Wait glue to be cured and lift glued structure (Al spacers and top sample) from assembly platform.
4. *Place and align bottom sample parallel to X-axis of motion stage.* Place bottom sample on the assembly platform and fix it with bottom vacuum. Make the parallel alignment to the X-axis with the same method as with top sample. Find XY coordinates of the reference corner with the pattern recognition. Compare them to XY coordinates of spacers and top sample. Move the robotic arm with attached structure glued before to match reference corners of all parts of the module.
5. *Final gluing.* Put the glue on the bottom sample and move robotic arm down for correct distance to glue entire prototype. After glue is cured the assembly process is finished.

The glued prototype is shown on Figure 4.11.

We used simplified algorithm for the first prototype assembly aligning only one corner. The quality of assembled prototype is very promising. It meet all necessary requirements. On the Figure 4.12 one can see the photo of the reference corner from

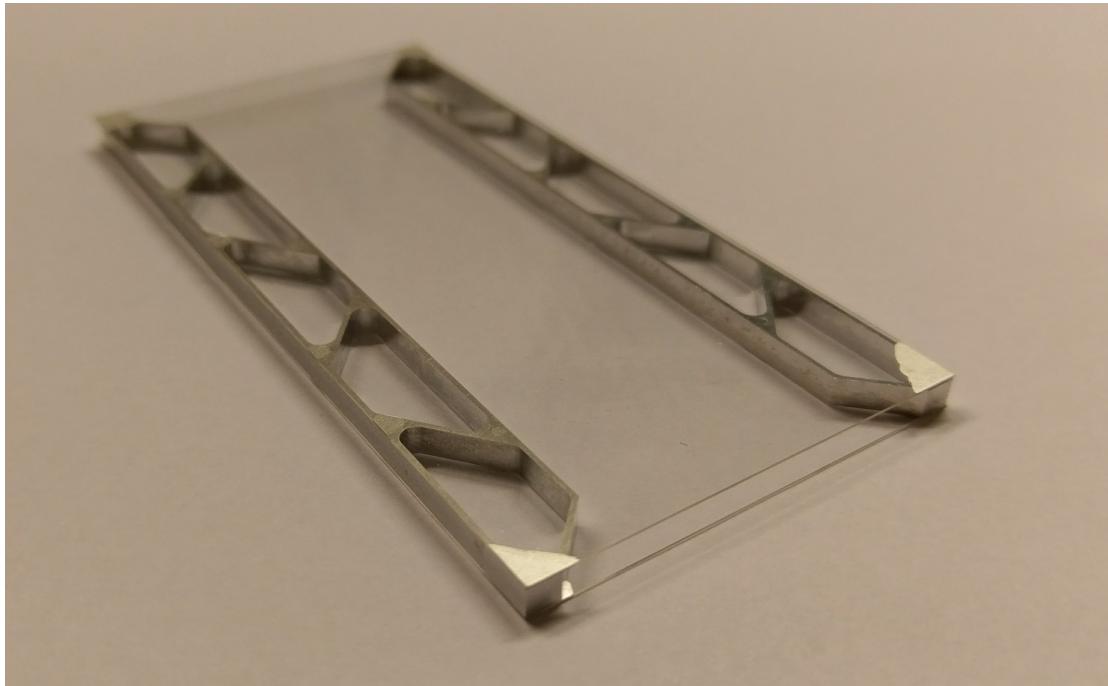


Рис. 4.11: Photo of the first assembled prototype.

the microscope. Pictures from other directions look very similar having approximately the same accuracy.

This assembled prototype proved the feasibility of the automated assembly and showed lots of issues to be solved in future. Even though it has only silver painted corner, not precise lithography, this prototype showed very good results in terms of assembling accuracy.

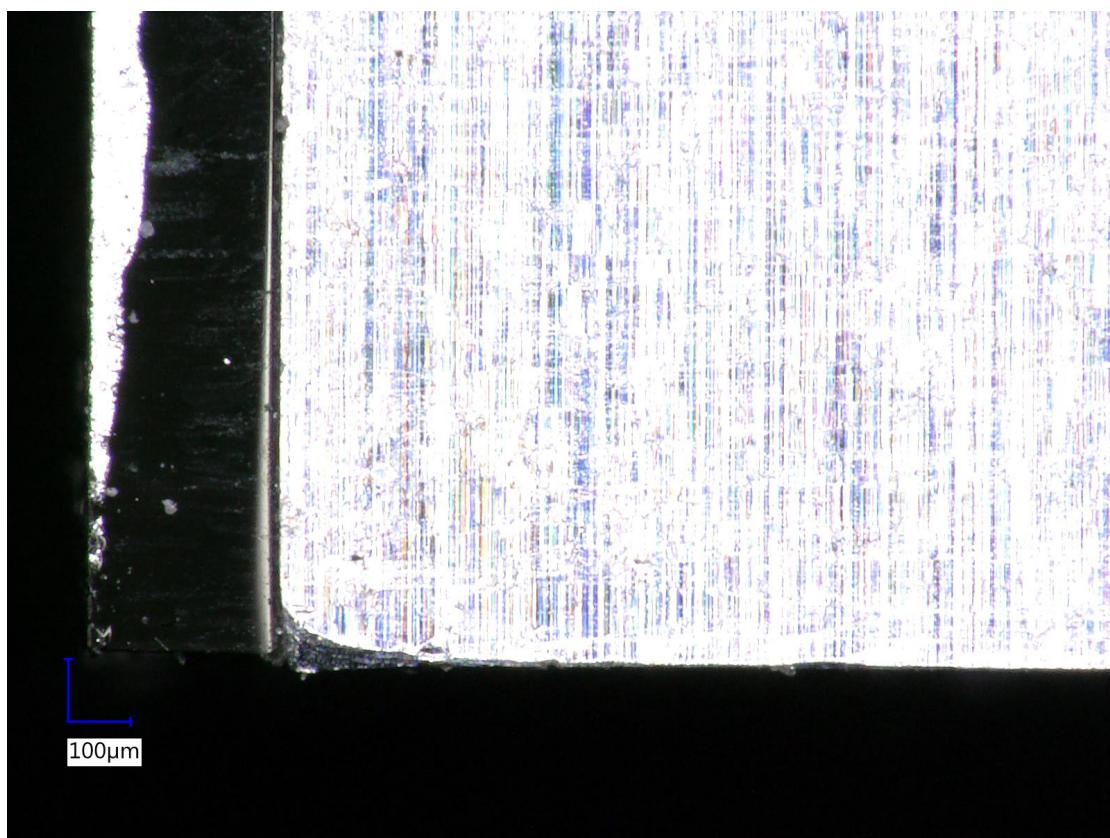


Рис. 4.12: Microscope photo of the reference corner of the first prototype.
Misalignment of the components is around 20 μm .

Глава 5

Conclusion

During my work on the project of Automation of CMS Phase II Tracker module assembly the following results were reached:

- Proved the possibility of an automated module assembly with the required accuracy.
- The first prototype is assembled demonstrating the potential of the system.
- The PSAuto software is modified.
- The assembly platform was designed, manufactured, implemented to the system and successfully tested.
- The fast adhesive technique is investigated and successfully implemented.
- Lots of tests were done showing abilities of the system and its accuracy.

Ссылка на репозиторий с кодом приложения: <https://github.com/bryksa/cmstkmodlab>.

Приложение А

Appendix

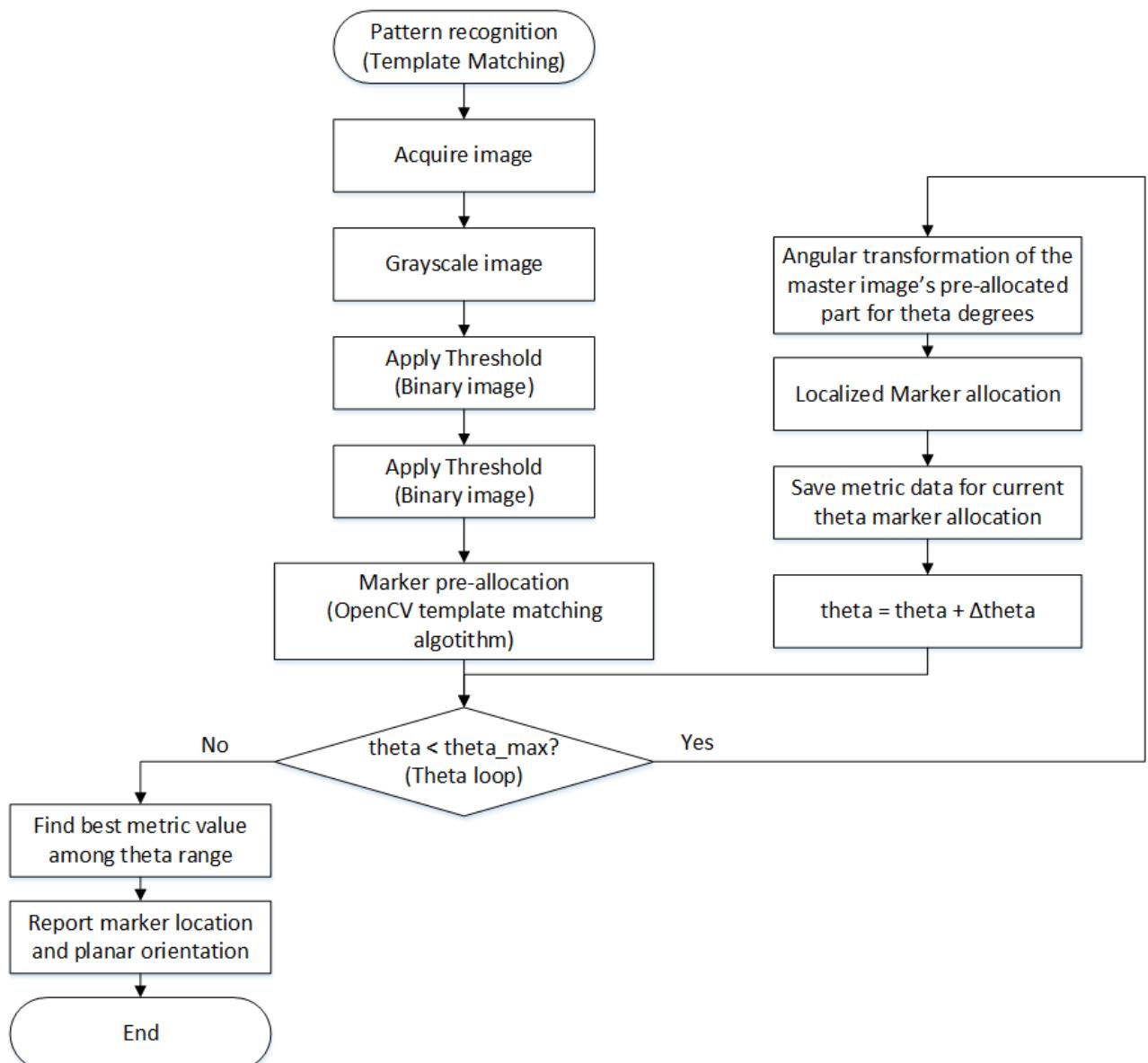


Рис. A.1: Pattern recognition Flow Chart.

Литература

- [1] The large hadron collider, 2017. URL <https://home.cern/topics/large-hadron-collider>.
- [2] Technical proposal for the phase-ii upgrade of the compact muon solenoid, 2015. URL <https://cds.cern.ch/record/2020886/files/LHCC-P-008.pdf>.
- [3] J.M. Keaveney. Commissioning of an automated assembly system for the ps modules of the cms phase ii upgrade outer tracker. <https://github.com/keaveney/assemblyDoc>, 2017.
- [4] K. James, M. Andreas, M Carsten, and Z. Adam. Towards an automated ps module assembly system, 2016.
- [5] Polytec PT GmbH. Data sheet. polytec ep 660, 2017. URL http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Polytec_EP_660_engl.pdf.
- [6] Wekem GmbH. Wekem product catalog, 2007. URL <http://www.jsj.lv/upload/content/wekem-english.pdf>.
- [7] Apple Inc. Model-view-controller, 2012. URL <https://developer.apple.com/library/content/documentation/General/Conceptual/CocoaEncyclopedia/Model-View-Controller/Model-View-Controller.html>.
- [8] A. Kaehler and G. Bradski. *Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, 2016. ISBN 9781491937969. URL <https://books.google.by/books?id=LPm3DQAAQBAJ>.