



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ

Специального машиностроения

КАФЕДРА

СМ11 «Подводные роботы и аппараты»

ОТЧЕТ ПО ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКЕ

Студент Андреев Евгений Викторович
фамилия, имя, отчество

Группа СМ11-11М

Тип практики

Научно-исследовательская работа

Название предприятия

НУК СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана

Студент

подпись, дата

Андреев Е. В.
фамилия, и.о.

Руководитель практики

подпись, дата

Макашов А. А.
фамилия, и.о.

Оценка _____

2019 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Кафедра «Подводные роботы и аппараты» (СМ11)

З А Д А Н И Е
на выполнение научно-исследовательской работы
(производственной практики)

на предприятии **НУК СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана**

Студент Андреев Евгений Викторович, СМ11-11М
(фамилия, имя, отчество; индекс группы)

Тема научно-исследовательской работы:

Разработка и исследование метода позиционирования подводного аппарата у
донного объекта с использованием маркеров специального вида

Дата выдачи задания «04» сентября 2019 г.

Руководитель НИР _____ / Макашов А. А.
(подпись, дата)

Студент _____ / Андреев Е. В.
(подпись, дата) (Фамилия И.О.)

РЕФЕРАТ

Отчёт на 37 стр., 8 ч., 18 рис., 14 источников, 7 таблиц.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА У ДОННОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАРКЕРОВ СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА

Перечень ключевых слов: АНПА, опорный маркер, алгоритм детектирования, донная зарядная станция, видеокамера, светоизлучающий диод.

Целью данной работы является исследование возможности использования опорных маркеров для позиционирования АНПА.

В процессе работы был проведён обзор существующих типов маркеров, обоснован выбор исследуемого набора маркеров. Была составлена методика, по которой проводилось исследование и сравнение. Предложен алгоритм детектирования активного маркера. Сформулированы требования к видеосистеме подводного аппарата.

В результате исследования были проанализированы условия применимости выбранных опорных маркеров в подводной робототехнике в целях навигации, осуществлён выбор камеры и объектива для целей детектирования опорных маркеров, а также разработана конфигурация донной зарядной станции, позволяющая осуществить навигацию по видеосистеме.

Содержание

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1 Обзор существующих маркеров	8
2 Описание методики сравнения	10
3 Маркеры ARuCO	12
3.1 Определение зависимости размера маркера от расстояния и разрешения камеры	12
4 Маркер Pi-Tag	16
5 Маркер CCTag	19
6 Активный маркер	21
6.1 Алгоритм детектирования светодиодов на основе яркости	21
6.2 Алгоритм детектирования светодиодов на основе преобразования Хаффа	22
6.3 Самодельный активный маркер.....	23
7 Выбор камеры.....	26
8 Конфигурация донной зарядной станции.....	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	32
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	33
Приложение 1. Исходный код примера алгоритма детектирования светодиодов.....	35

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяются следующие сокращения и обозначения:

АНПА – Автономный необитаемый подводный аппарат;

ВК – Видеокамера;

СИД – Светоизлучающий диод;

ROS – Robot operating system.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время всё большее применение находят автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). К видам технических работ, осуществляемых аппаратами, можно отнести обследование трубопроводов и кабелей, проверка точности карт, фото- и видеосъёмка, в том числе маршрутная, осмотр опор эстакад и платформ и много другое.

В этой связи актуальной задачей является разработка методов позиционирования подводного аппарата по данным видеосистемы. Для наведения предлагается использовать маркеры специального вида, исследование проводилось применительно к задаче стыковки АНПА с донной зарядной станцией.

Наведение на донную зарядную станцию на больших расстояниях (свыше 10 метров) осуществляется по гидроакустическому маячку. Навигацию в непосредственной близости логично осуществлять с помощью видеокамер (ВК), установленных на АНПА, опорных маркеров определённого типа и алгоритмов технического зрения.

В данной работе объектом исследования являются опорные маркеры, использующиеся в робототехнике для навигации в пространстве. Предполагается, что аппарат оснащён всеми необходимыми измерителями параметров движения, вопросы маневрирования в данной работе не рассматриваются.

Цель работы – изучение различных типов опорных маркеров и определение их применимости в подводной робототехнике.

Задачи:

- разработка методики сравнения различных типов опорных маркеров;

- исследование имеющихся готовых программных решений для обнаружения и определения маркеров;
- выбор сенсора и объектива ВК исходя из необходимости детектирования конкретного маркера;
- компоновка конструкции зарядной станции и выбранных средств позиционирования.

1 Обзор существующих маркеров

Опорные маркеры имеют уникальный дизайн и различные геометрические формы (рисунок 1), однако все они могут быть автоматически обнаружены с помощью камеры. Системы определения маркеров используются в таких областях, как приложения дополненной реальности, медицина, космос и задачи, связанные с роботизацией. Разновидность области применения определяет критерии, которые характеризуют качественные свойства маркера и включают в себя такие критерии оценки, как устойчивость к перекрытию тенью, максимальное расстояние до маркера, ложноположительные и ложноотрицательные срабатывания, чувствительность детектирования к освещению и др.

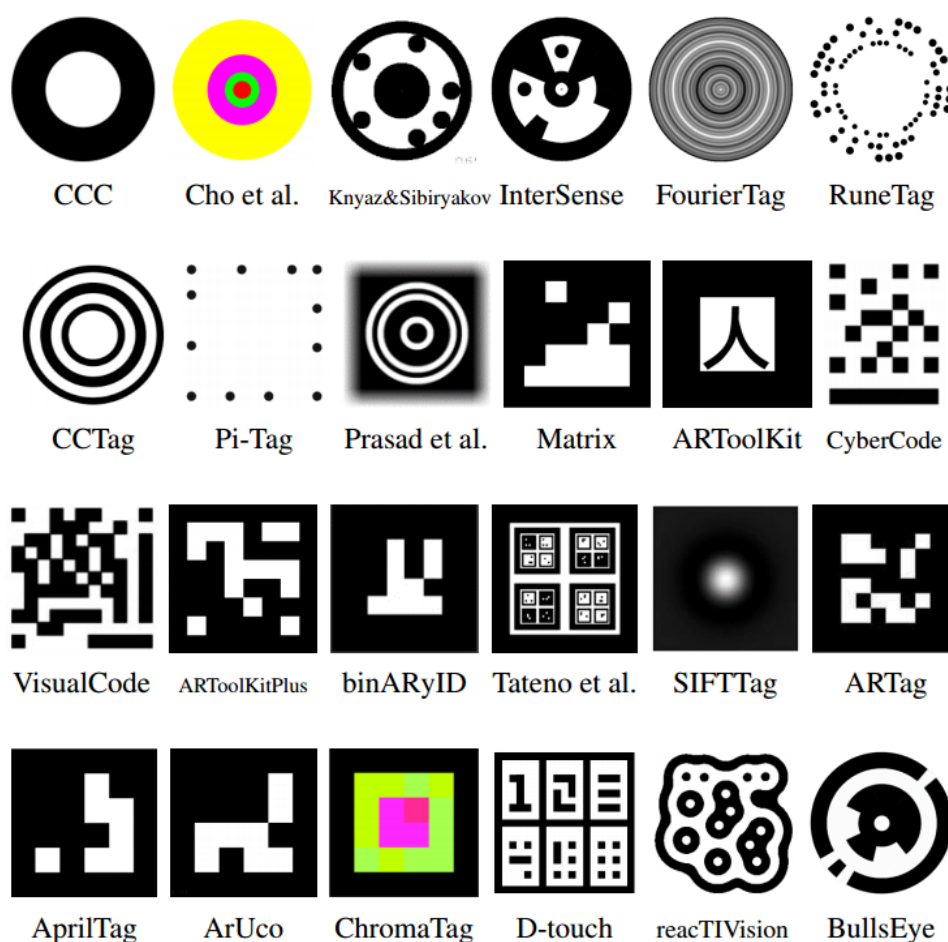


Рисунок 1 – Различные типы опорных маркеров

Опорным маркером может являться любая фигура. Однако на практике разработчики программного обеспечения мобильных роботов ограничены такими факторами, как разрешение видеокамеры, особенности цветопередачи и освещённости конкретной среды эксплуатации, вычислительная мощность оборудования, а также наличие или отсутствие открытых исходных кодов, содержащих алгоритмы детектирования. Как правило, удобнее всего детектировать черно-белый маркер простой формы. Чаще это прямоугольник или квадрат со вписанным внутрь него идентификатором-образом.

На тему исследования маркеров написано множество научных работ. Например, в статье [1] проведено сравнение популярных маркеров ARTag, AprilTag и CALTag в отношении устойчивости детектирования при наличии вращения.

В статье [2] авторы описывают собственный опорный маркер ToroTag и проводят его сравнение с имеющимися. Также описана общая последовательность операций над изображением при детектировании маркера. В работах [3, 4] затрагиваются вопросы детектирования круглых маркеров, как цветных, так и чёрно-белых. Также рассматриваются алгоритмы оценки эллипсов и окружностей.

На основе изученной информации, а также с учётом наличия открытых исходных кодов, был сформирован следующий набор опорных маркеров: ARuCo, Pi-Tag, CSTag и светодиодный активный маркер. Этот набор включает в себя достаточно разнотипные объекты, что позволяет провести исследование наиболее полно и объективно. Однако цветные маркеры не затронуты ввиду особенностей цветопередачи подводной среды. Далее каждый из них будет исследован в отдельности.

2 Описание методики сравнения

Прежде чем приступить к сравнению маркеров, необходимо составить методику проведения исследования и оценки применимости конкретного типа в подводной робототехнике.

В качестве видеокамеры использовалась веб-камера Logitech C910, настроенная на максимальное разрешение – 1080 p. Освещение – комнатное, оставалось неизменным на протяжении всех экспериментов.

Для каждого типа маркера были определены 3 размера, условно обозначаемые в дальнейшем как «m», «s» и «xs», представляющие собой печать на половину листа A4, на четверть и на одну девятую часть соответственно. Действительные габариты приведены в соответствующих таблицах ниже. Маркеры были наклеены на плотную основу и закреплены на штативе на высоте от пола, соответствующей высоте камеры.

Расположим маркеры на различных расстояниях от камеры и для каждого из них выясним возможность определения образца каждого размера. На рисунке 2 показана схема эксперимента, где в правой части условно изображена видеокамера, а крестики обозначают положения штатива. Соответствующие расстояния указаны ниже:

$$l1 = 5150 \text{ мм},$$

$$l2 = 3520 \text{ мм},$$

$$l3 = 1870 \text{ мм}.$$

Также для каждого типа определим пороговые значения, определяющие границу идентифицируемости (вертикальные отметки между расстояниями $l2$ и $l3$, относятся к первому типу исследованного маркера - ARuCo). Проведем это для каждого образца на расстояниях от $l1$ до $l3$.

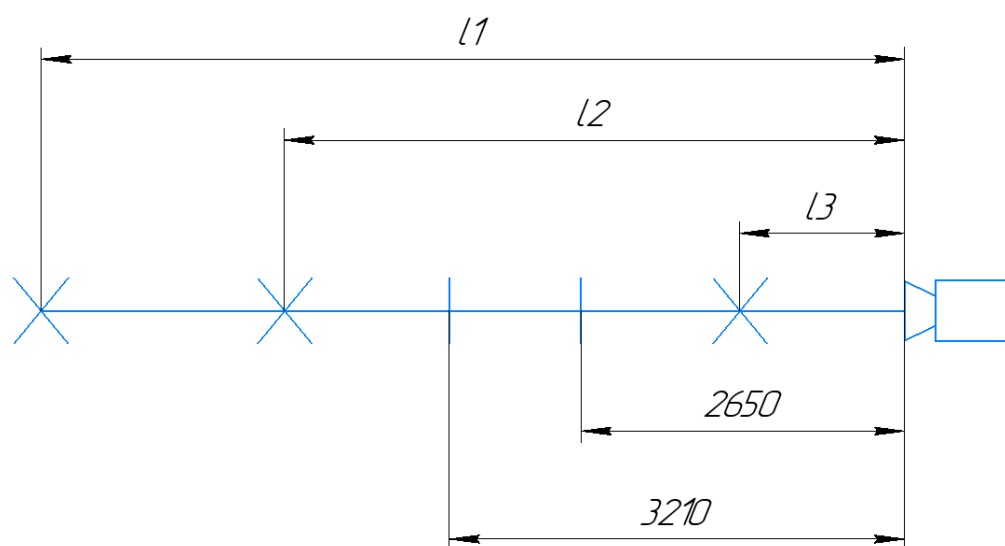


Рисунок 2 – Схема эксперимента

3 Маркеры ARuCO

Одним из наиболее популярных типов является ARuCo маркер, поскольку его реализация включена в стандартный пакет поставки библиотеки компьютерного зрения OpenCV (до версии 4) и вынесена в отдельный модуль пакета OpenCV-contrib начиная с версии 4.

Данный маркер представляет собой чёрный квадрат, содержащий в себе идентификационную метку размерами 5x5, составленную из белых квадратов. Модуль ARuCo содержит в себе предопределённый словарь из 256 маркеров для их генерации и распознавания. Все 256 маркеров являются уникальными вне зависимости от их углового положения в пространстве, что позволяет определить ориентацию маркера в пространстве.

3.1 Определение зависимости размера маркера от расстояния и разрешения камеры

Выявим зависимость габаритов маркера от дальности обнаружения и разрешения камеры экспериментальным путём (рис. 3).



Рисунок 3 – Проведение эксперимента

В соответствии с представленными ранее методикой и схемой проведения эксперимента определим возможность идентификации маркеров «xs» и «s» на выбранных расстояниях. Результаты эксперимента приведены в таблице 1

Таблица 1 – Экспериментальные данные обнаружения маркера ARuCo

Размер	Расстояние	Определяется?
xs (60 x 60 мм)	<i>l1</i>	Нет
	<i>l2</i>	Нет
	<i>l3</i>	Да
s (90 x 90 мм)	<i>l1</i>	Нет
	<i>l2</i>	Нет
	<i>l3</i>	Да
m (130 x 130 мм)	<i>l1</i>	Да
	<i>l2</i>	Да
	<i>l3</i>	Да

Пороговое расстояние (см. рис. 2) для маркера xs равно 2650 мм, при этом сам маркер имеет размеры 33 x 33 пикселя (рис. 4).

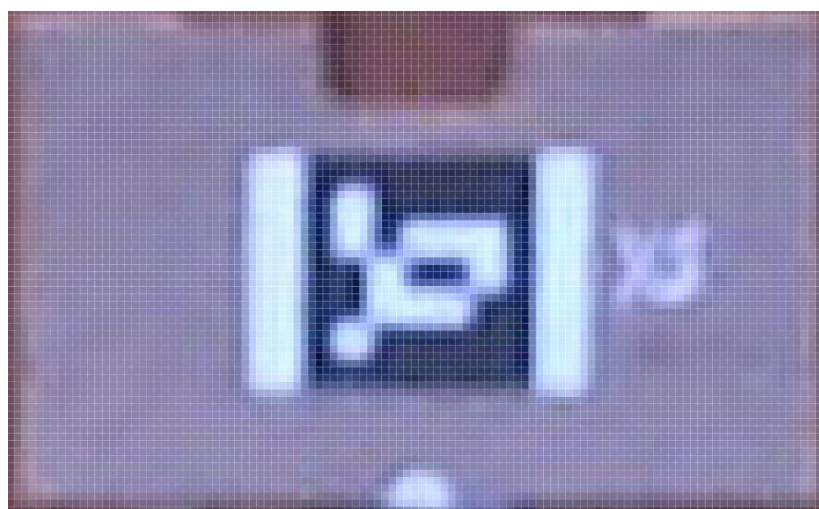


Рисунок 4 – Пикселизация маркера «xs»

Пороговое расстояние для маркера s равно 3210 мм, при этом сам маркер имеет размеры 40 х 40 пикселей (рисунок 5).



Рисунок 5 – Пикселизация маркера «s»

Выведем формулу, связывающую расстояние от камеры до объекта распознавания с габаритами последнего при заданном разрешении ВК. Очевидно, что размер маркера зависит прямо пропорционально от дальности и обратно пропорционально от разрешения. Влияние угла обзора камеры и его уменьшение при переходе лучей из воздушной среды в водную, искажения, вызванные движением воды, а также возможность обнаружения маркера под углом на данном этапе не учитываем.

$$M \geq k \frac{l}{r}, \quad (1)$$

где

M – размер маркера, мм;

k – масштабный коэффициент, пиксели;

l – расстояние до маркера;

r – разрешение камеры по высоте кадра.

Подставим в (1) значения полученных пороговых расстояний, разрешение ВК и размеры маркеров «s» и «xs», чтобы определить коэффициент k .

$$\begin{cases} 33 \geq k_1 \frac{2650}{1080p} \\ 40 \geq k_2 \frac{3210}{1080p} \end{cases}, \text{отсюда} \begin{cases} k_1 = 13,449057 \\ k_2 = 13,457944 \end{cases}.$$

Примем $k_1 = k_2 = 13,45$.

Таким образом, в идеальных условиях габариты опорного маркера, необходимые для его обнаружения с 10 метров:

$$M \geq 13,45 \cdot \frac{10000}{1080p} = 124,537 \text{ мм} = 0,125 \text{ м},$$

что является удовлетворительным результатом.

4 Маркер Pi-Tag

Опорный маркер Pi Tag (см. рисунок 6) представляет собой набор чёрных точек одинакового размера, расположенных на белом поле. Алгоритм детектирования представлен в виде открытых исходных кодов [5] и является адаптированной версией пакета «sob fiducials» [6] по определению опорных маркеров, входящего в состав ROS [7].

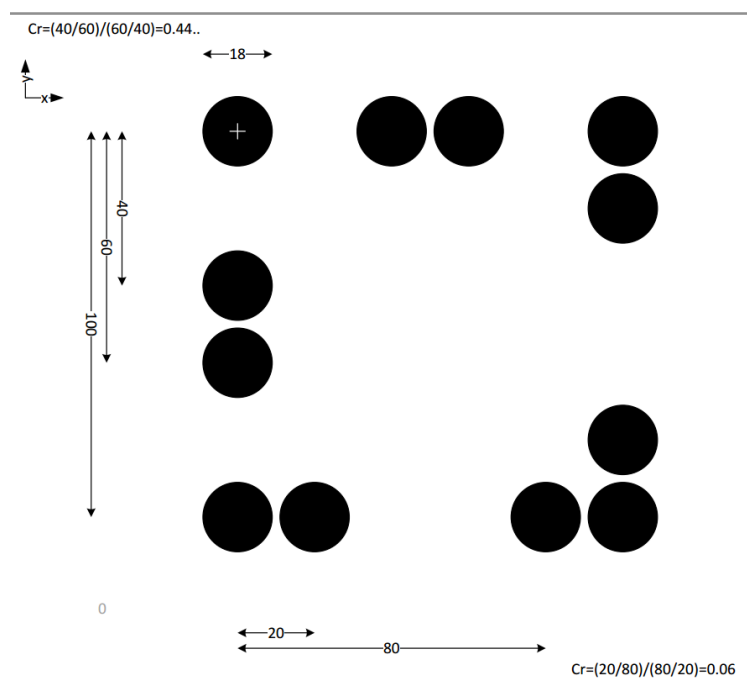


Рисунок 6 – Пример маркера Pi Tag

Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Экспериментальные данные обнаружения маркера Pi-Tag

Размер	Расстояние	Определяется?
xs (55 x 55 мм)	<i>l1</i>	Нет
	<i>l2</i>	Нет
	<i>l3</i>	Нет
s (85 x 85 мм)	<i>l1</i>	Нет
	<i>l2</i>	Нет

	<i>l3</i>	Нет
m (120 x 120 мм)	<i>l1</i>	Нет
	<i>l2</i>	Нет
	<i>l3</i>	Да

Плохие результаты работы эксперимента заключаются во внутреннем устройстве алгоритма детектирования. Понимание внутреннего устройства алгоритма даёт серия изображений, показанная на рисунке 7.

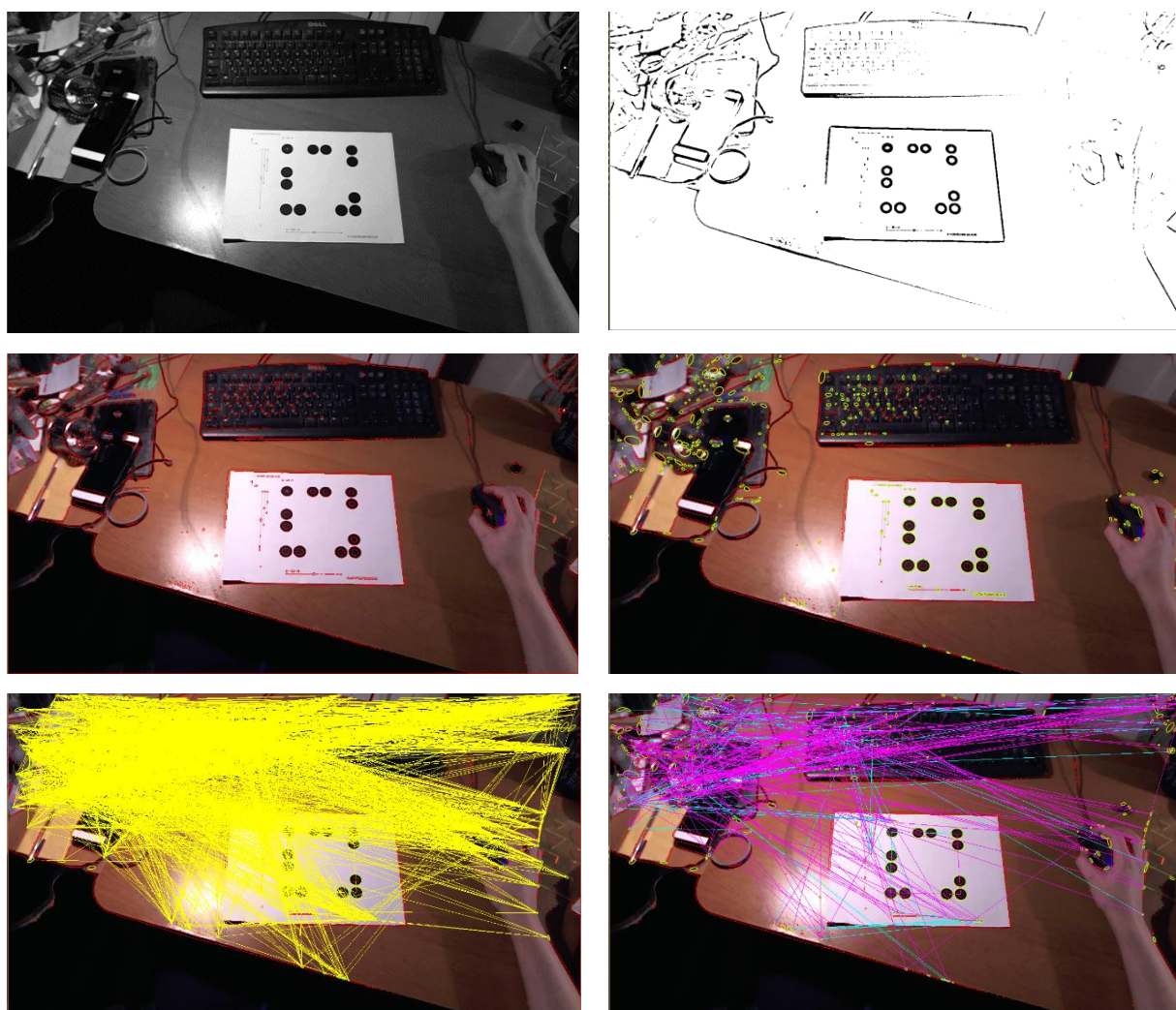


Рисунок 7 – Последовательность преобразований для детектирования маркера Pi-Tag

Идентифицированный маркер показан на рисунке 8.

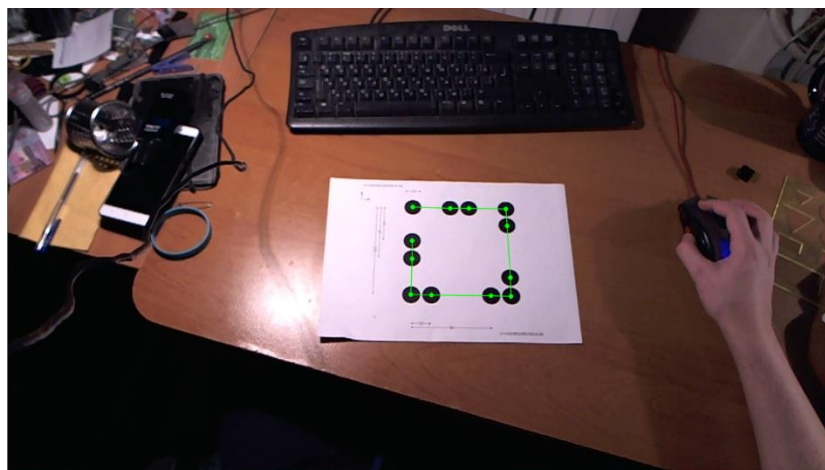


Рисунок 8 – Результат определения маркера Pi-Tag

Разработчики данной библиотеки не использовали какие-либо алгоритмы кластеризации для более тщательного отсеивания эллипсов. Помимо прочего, данный тип маркеров нуждается в тонкой настройке параметров, отвечающих за наибольший и наименьший размеры эллипса, а также за соотношение сторон фигуры. Для того чтобы охватить все возможные варианты детектирования, включая обнаружение на большем расстоянии, необходимо заложить параметры, обеспечивающие наибольший диапазон вариантов. Однако в этом случае производительность обнаружения оставляет желать лучшего – от нескольких секунд до 3-х минут (!), поскольку программа вынуждена перебирать количество вариантов, равное числу сочетаний C_n^4 , где n – все обнаруженные эллипсы.

Дальнейшее исследование этого маркера считаем нецелесообразным.

5 Маркер CСTag

Данный маркер (см. рисунок 9) реализован в одноимённой библиотеке [8] и представляет собой набор трёх концентрических колец. Конфигурация из 3-х колец, различающихся по толщине, предоставляет 32 уникальных экземпляра.



Рисунок 9 – Внешний вид маркера CСTag

Результаты эксперимента, проведенного согласно методике, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Экспериментальные данные обнаружения маркера CСTag

Размер	Расстояние	Определяется?
xs (Ø60 мм)	<i>l1</i>	Нет
	<i>l2</i>	Да
	<i>l3</i>	Да
s (Ø90 мм)	<i>l1</i>	Нет
	<i>l2</i>	Да
	<i>l3</i>	Да
m (Ø130 мм)	<i>l1</i>	Нет
	<i>l2</i>	Нет
	<i>l3</i>	Да

Пороговое расстояние для маркера «s» составляет 3620 мм, а для маркера «xs» - 2850 мм, при этом размеры в пикселях составляют 28 и 35 px соответственно. Действуя аналогично пункту 3.1, найдём приближённое значение масштабного коэффициента используемой видеокамеры.

$$\begin{cases} 28 \geq k_1 \frac{2850}{1080p} \\ 35 \geq k_2 \frac{3620}{1080p} \end{cases}, \text{отсюда} \begin{cases} k_1 \approx 10,61, \\ k_2 \approx 10,44. \end{cases}$$

Примем $k_1 = k_2 = 10,53$.

Согласно (1), в условиях, сходных с условиями проведения эксперимента, габариты опорного маркера CСTag, необходимые для его обнаружения с 10 метров составят

$$M \geq 10,53 \cdot \frac{10000}{1080p} = 97,5 \text{ мм} = 0,975 \text{ м}.$$

Отметим, что в сравнении с ARuCo, данный тип маркеров требует меньших размеров, для обнаружения на той же дистанции. Это связано с более крупными структурными элементами CСTag. Однако количество уникальных маркеров значительно меньше.

6 Активный маркер

Хорошим опорным объектом может являться светоизлучающий диод (СИД). Светящиеся объекты под водой на большой глубине заметны на большом расстоянии. Демаскирующий эффект проще всего минимизировать следующим образом: при подходе к донной станции АНПА сообщит ей по гидроакустическому каналу команду зажечь светодиоды, которые погаснут сразу после завершения стыковки. Методику детектирования СИД проще всего построить на основе данных о яркости.

6.1 Алгоритм детектирования светодиодов на основе яркости

Предлагается использовать следующую последовательность действий для обнаружения и определения положения СИД:

1. Получение изображения в оттенках серого.
2. Извлечение порогового изображения.
3. Фильтрация и сглаживание порогового изображения.
4. Нахождение контуров объектов с помощью детектора Канни [9].
5. Определение описывающего прямоугольника для каждого контура.
6. Нахождение эллипса для каждого контура.
7. Вычисление центра как полу суммы координат фокусов эллипса.



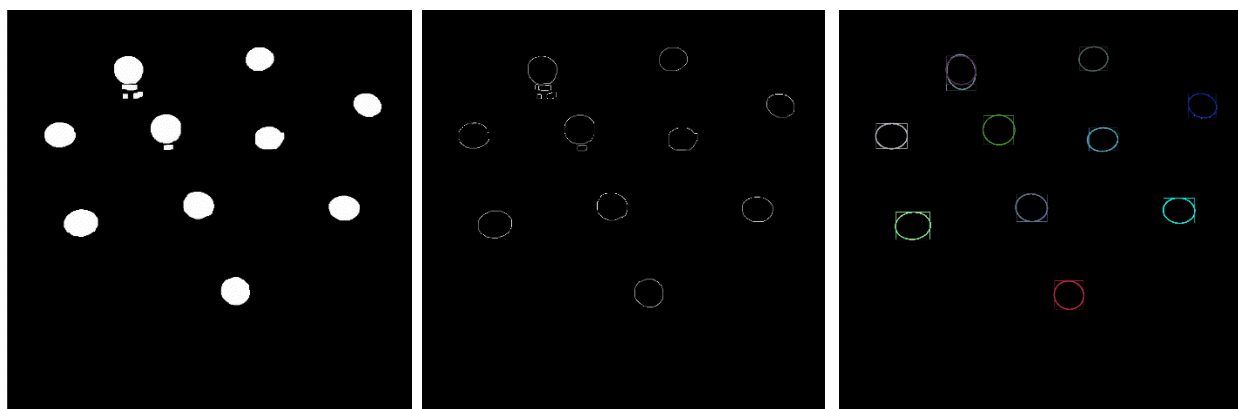


Рисунок 10 – Последовательность преобразования изображения для обнаружения положений светодиодов

Пороговое изображение определяется по уровню яркости, который задан в виде постоянного значения. В качестве сглаживающей операции используется морфологическое преобразование «opening» [10], которое является комбинацией преобразований «erode» и «dilate» [11]. Матрица преобразования прямоугольная размера 5x5.

Детектор Канни призван обнаруживать границы объектов на изображении. Для его работы необходимо задать наибольшее и наименьшее ожидаемые значения яркости пикселей на границах объектов (в нашем случае контуров).

Исходный код примера использованного алгоритма приведён в приложении 1.

6.2 Алгоритм детектирования светодиодов на основе преобразования Хаффа

Как было указано выше, точечный источник света на изображении представляет собой световое пятно. Следовательно, возможно использовать преобразование Хаффа для окружностей, чтобы найти координаты СИД (рисунок 11).



Рисунок 11 – Детектирование на основе преобразования Хаффа

Однако данный метод вызывает ложные срабатывания, в то время как не все источники света оказываются идентифицированы.

6.3 Самодельный активный маркер

Самодельный активный маркер представляет собой картонную основу, на которой закреплены 4 СИД (см. рисунок 12). В основе были проделаны отверстия под маркеры размеров «xs», «s» и «m» таким образом, чтобы габариты были сопоставимы с исследованными ранее маркерами.

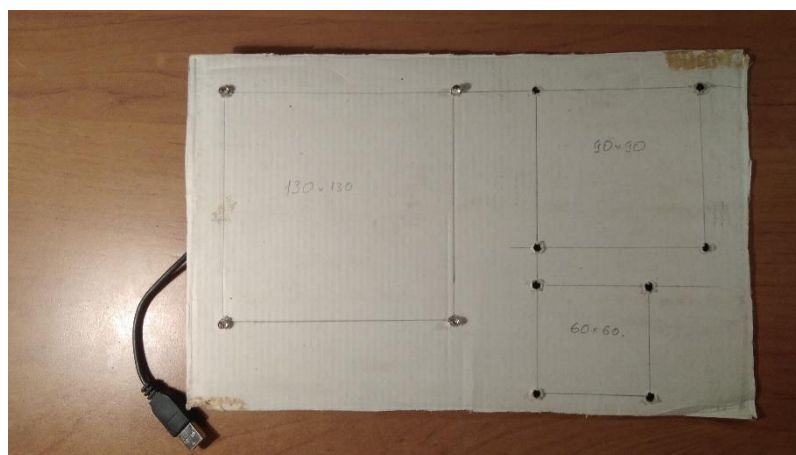


Рисунок 12 – Внешний вид самодельного активного маркера

Для идентификации пассивных маркеров требуется необходимый уровень освещения, в то время как активные сами являются источниками света. По этой причине эксперименты проводились в темноте.

Если пассивные маркеры «страдают» от недостаточной чёткости изображения, вызванной шумами камеры и различными эффектами размытия, то светодиодные маркеры в меньшей степени подвержены шумам, однако способны пересвечивать изображение. Эффект засвечивания (см. рисунок 13) не позволяет алгоритму выделить отдельные контуры, и как следствие, определить эквивалентные эллипсы и их координаты.



Рисунок 13 – Эффект засвечивания изображения

При проведении эксперимента (рисунок 14) яркость всех СИД регулировалась с помощью потенциометра. В реальных условиях предполагается использовать камеру с управляемой диафрагмой для регулировки светового потока, попадающего на матрицу, программным путём в режиме реального времени. Помимо прочего, расстояние между отдельными диодами будет больше, т.к. наведение по ним будет производиться на расстоянии от 10 до 1 м.



Рисунок 14 – Маркер размера «s» на расстоянии l_3

Результаты эксперимента приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Экспериментальные данные обнаружения активного маркера

Размер	Расстояние	Определяется?
xs (60 x 60 мм)	l_1	Да
	l_2	Да
	l_3	Да
s (90 x 90 мм)	l_1	Да
	l_2	Да
	l_3	Да
m (130 x 130 мм)	l_1	Да
	l_2	Да
	l_3	Да

Отметим, что использование активного маркера накладывает некоторые условия на выбор камеры и объектива. Как было сказано выше, модуль камеры должен быть оборудован программно управляемой диафрагмой, а угол зрения объектива не должен быть слишком узким, затем, чтобы все светодиоды попали в кадр при наименьшем расстоянии.

7 Выбор камеры

Сформулируем требования, предъявляемые к камере и объективу (табл. 5).

Таблица 5 – Предъявляемые требования к видеосистеме

Параметр	Значение
Кадров/с, мин	20
Разрешение, не менее	FullHD (1920 x 1080)
Протокол передачи данных	Ethernet
Максимальный угол обзора по горизонтали, °	90

Чем выше частота кадров, тем меньше размытий будет наблюдаться в динамических сценах, однако нагрузка на вычислитель возрастает. Частота в 20 кадров/с является минимально необходимой для замыкания системы управления по сигналу с видеокамеры. Сетевой интерфейс Ethernet 1 Гбит/с позволит уменьшить задержки потокового видео при передаче. Разрешение FullHD на сегодняшний день является стандартом, при меньшем разрешении качество картинки будет неудовлетворительным.

Угол обзора объектива определяет количество объектов, попадающих на изображение одновременно. Чем он больше, тем с большего расстояние искомый объект попадёт в кадр. Однако увеличиваются также и нелинейные искажения изображения, большой угол обзора требует высокого разрешения матрицы. Если второе решается просто выбором камеры с большим количеством пикселей, то искажения по краям кадра устраняются с помощью специальной программной процедуры калибровки.

Для надёжного обнаружения маркеров выберем камеру BD3670M от компании Beward [12, 13]. Технические характеристики приведены в таблице 6.



Рисунок 15 – Промышленная камера BD3670M

Таблица 6 – Характеристики камеры BD3670M

Параметр	Значение
Тип сенсора	КМОП, цветной
Разрешение	6 Мп
Разрешение (в х ш)	3072 x 2048 пикселей
Кадров в секунду	До 30 к/с при 3072x2048, до 60 к/с при 1920x1080 и меньше

Устройство снабжено интерфейсом Gigabit Ethernet, имеет размер матрицы 1/1,8 дюйма, что уменьшает влияние шумов на итоговое изображение, а также камера имеет моторизованную регулировку заднего фокуса и способна управлять диафрагмой.

Подберём объектив для данной камеры. Хорошим выбором является профессиональный варифокальный объектив ВН03611AIR [14] с автоматической регулировкой диафрагмы и инфракрасной коррекцией. Автоматическая регулировка диафрагмы объектива постоянным током (DC-Drive) позволяет регулировать количество света на матрице видеокамеры, что

необходимо при неведении по светоизлучающим диодам. А технология ИК-коррекции позволяет избежать расфокусировки изображения при работе камеры в различных условиях освещённости, изображение остается одинаково четким в условиях светлых и тёмных сцен.

Настройка фокусного расстояния объектива в диапазоне от 3.6 до 11 мм осуществляется вручную. Поле зрения ВН03611AIR может быть изменено от 44 до 106° (при работе с матрицами формата 1/1,8"). Технические характеристики приведены в таблице 7.



Рисунок 16 – Внешний вид объектива ВН03611AIR

Таблица 7 – Характеристики объектива ВН03611AIR

Параметр	Значение
Разрешение	8 Мп
Тип объектива	Варифокальный с АРД
Фокусное расстояние	От 3.6 до 11 мм
Угол обзора по горизонтали	От 44° до 106° (на матрице 1/1,8")
Совместимый формат матриц	До 1/1.8"
Увеличение	Ручная регулировка
Фокус	Ручная регулировка
Диафрагма	Автоматическая, по постоянному току (DC)

Результаты расчёта итоговых горизонтальных и вертикальных углов обзора для выбранной комбинации камера-объектив приведены на рисунке 17.

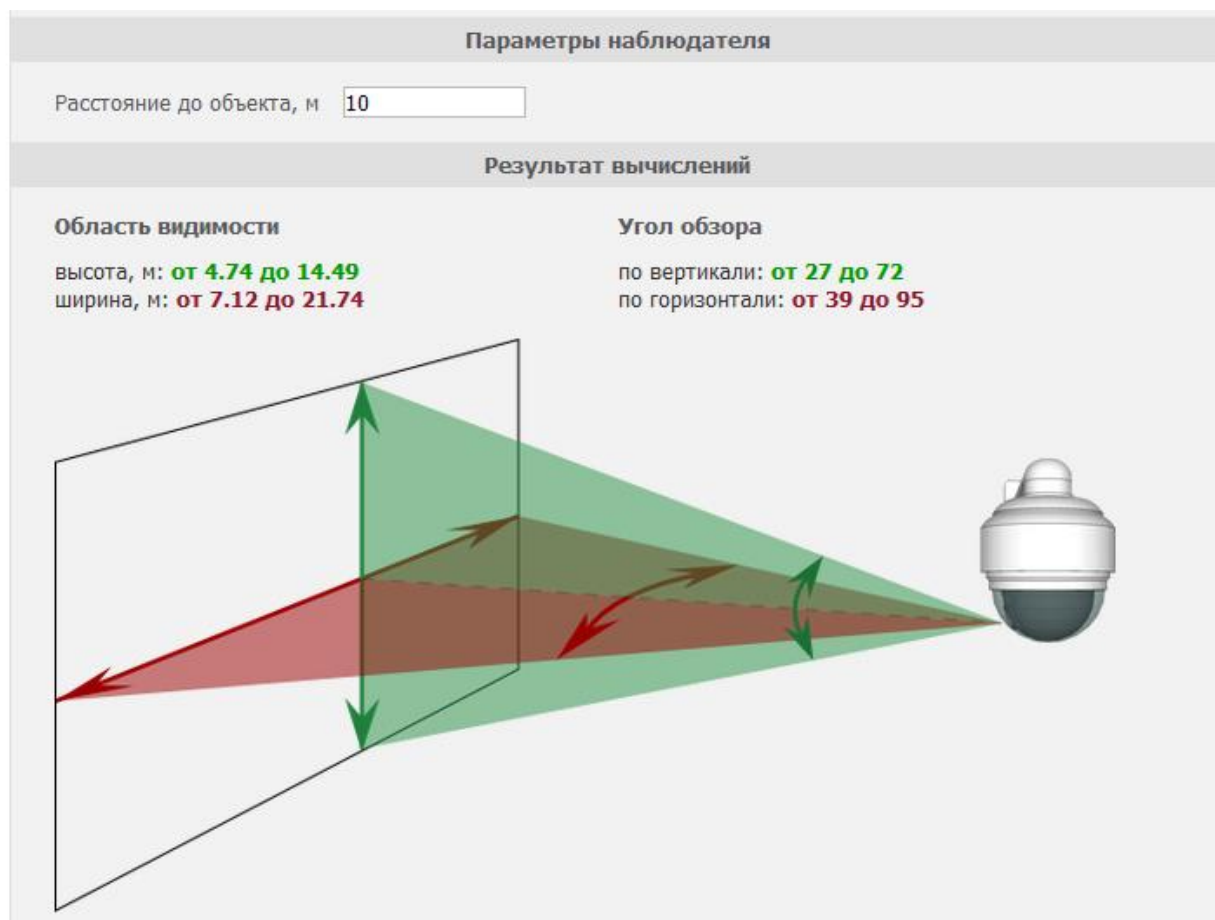


Рисунок 17 – Горизонтальные и вертикальные углы обзора

Однако данный расчёт не учитывает преломление луча на границе воды и воздуха. Согласно закону Синеллиуса, приведённому на рисунке 18, при переходе из более плотной среды в менее плотную луч сильнее отклоняется от вертикали. Таким образом, в условиях подводной эксплуатации реальные углы обзора по горизонтали и вертикали будут больше.

Использование выбранной видеокамеры совместно с объективом ВН03611AIR обеспечит чёткое и незасвеченное изображение с достаточным полем зрения как вблизи детектируемого объекта, так и на значительном расстоянии от него.

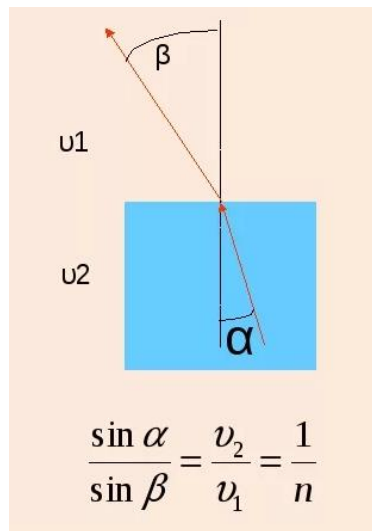


Рисунок 18 – Иллюстрация закона преломления Синеллиуса

8 Конфигурация донной зарядной станции

Предлагаемая итоговая конфигурация донной зарядной станции показана на рисунке 19. Грань пирамиды, на которой расположен зарядный порт, дополнительно помечена центральным светодиодом.

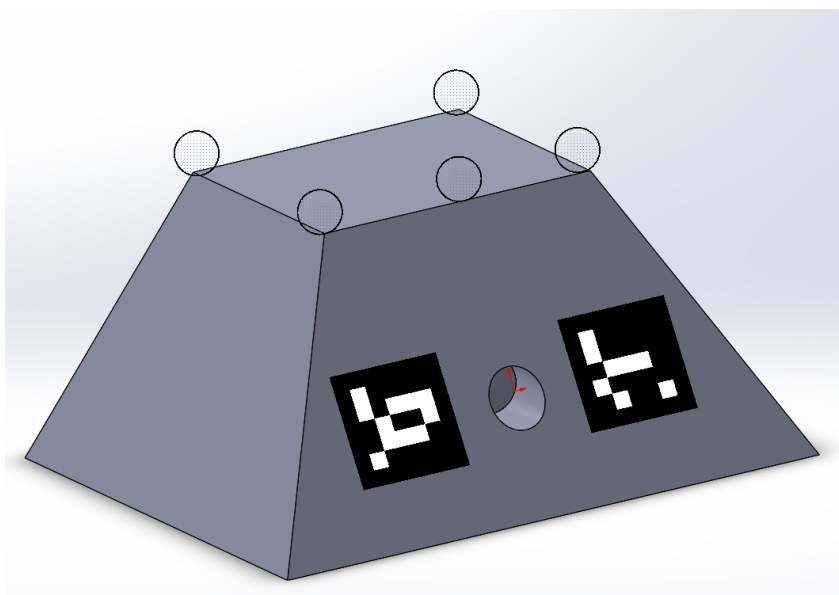


Рисунок 19 – Конфигурация донной зарядной станции

А маркеры ARuCo, расположенные по обе стороны от зарядного порта, позволят АНПА определить АНПА собственную угловую ориентацию по видеосистеме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования были определены условия применимости следующих типов опорных маркеров: ArgCo, Pi-Tag, CSTag и светодиодного активного маркера. Представлена аналитическая зависимость, позволяющая определить габариты маркера для детектирования в условиях, приближенных к идеальным, в зависимости от разрешения видеокамеры.

На основе опытных данных, полученных при изучении указанных выше маркеров, сформулированы критерии выбора видеокамеры и объектива. Произведены подбор оборудования и расчёт углов обзора на воздухе для выбранных сенсора и оптической системы. Предложена конфигурация донной зарядной станции, способная обеспечить возможность наведения и позиционирования АНПА по видеосистеме на расстоянии до 10 метров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ksenia Shabalina, Artur Sagitov, Leysan Sabirova, Hongbing Li, and Evgeni Magid. ARTag, AprilTag and CALTag Fiducial Systems Comparison in a Presence of Partial Rotation: Manual and Automated Approaches. Research Gate. Январь, 2020. 25 с.
2. Yontago Hu. TopoTag: A Robust and Scalable Topological Fiducial Marker System. Research Gate. Август, 2019. 11 с.
3. Fakhreddine Ababsa, Malik Mallem. A Robust Circular Fiducial Detection Technique and Real-Time 3D Camera Tracking. Journal of multimedia, vol. 3. № 4, Октябрь, 2008. 8 с.
4. Oliver Christen, Edwin Naroska, Alexander Micheel, Shanq-Jang Ruan. Target Marker: A Visual Marker for Long Distances and Detection in Realtime on Mobile Devices. Proceedings of the World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS 2015) Barcelona, Spain, July 13 - 14, 2015. Paper № 339. 7 с.
5. Репозиторий Pi-Tag-Detector [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/mpetroff/pi-tag-detector> (дата обращения: 26.10.2019, 12:00).
6. Страница документации пакета Cob Fiducials Beward [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://wiki.ros.org/cob_fiducials (дата обращения: 26.10.2019, 12:00).
7. Официальный сайт фреймворка ROS Beward [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ros.org/> (дата обращения: 26.10.2019, 12:00).
8. Репозиторий CCTag [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/alicevision/CCTag> (дата обращения: 26.10.2019, 12:00).
9. Детектор границ Канни [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/114589/> (дата обращения: 26.10.2019, 12:00).

10. Руководство по OpenCV. Морфологические преобразования, часть 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.opencv.org/4.1.1/d3/db6/tutorial_opening_closing_hats.html (дата обращения: 26.10.2019, 12:00).
11. Руководство по OpenCV. Морфологические преобразования, часть 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.opencv.org/4.1.1/db/df6/tutorial_erosion_dilatation.html (дата обращения: 26.10.2019, 12:00).
12. Официальный сайт компании Beward [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.beward.ru/> (дата обращения: 26.10.2019, 12:00).
13. Спецификация IP-камеры BD3670M [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.beward.ru/katalog/ip-kamery/ip-kamery-serii-bd/bd3670m/> (дата обращения: 15.12.2019, 12:00).
14. Спецификация объектива BH03611AIR [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.beward.ru/katalog/obektivy/varifokalnye/ob-ektiv-bh03611air/> (дата обращения: 15.12.2019, 12:00).

Приложение 1. Исходный код примера алгоритма детектирования светодиодов

[//https://docs.opencv.org/4.1.1/de/d62/tutorial_bounding_rotated_ellipses.html](https://docs.opencv.org/4.1.1/de/d62/tutorial_bounding_rotated_ellipses.html)
[//https://docs.opencv.org/4.1.1/d3/db6/tutorial_opening_closing_hats.html](https://docs.opencv.org/4.1.1/d3/db6/tutorial_opening_closing_hats.html)

```
#include <opencv2/opencv.hpp>  
#include <opencv2/aruco.hpp>
```

```
using namespace cv;  
using namespace std;
```

```
int threshold_value = 245;  
//int threshold_type = 3;  
int const max_value = 255;  
int const max_type = 4;  
int const max_binary_value = 255;
```

```
float treshold_area = 30 * 20;
```

```
string path = "../sources/";  
string dir = "";  
string file = "led_blue.jpg";  
string full_path = path + dir + file;
```

```
Mat image, image_gray, hough, tresh, tresh_opening, canny_output, drawing;
```

```
RNG rng(12345);
```

```
vector<Vec3f> circles;
```

```
void morphology_Operation(int morph_operator, Mat& src, Mat & dst)
```

```
{  
    int morph_elem = MORPH_RECT;  
    int morph_size = 5;  
  
    Mat element = getStructuringElement(morph_elem, Size(2 * morph_size +  
1, 2 * morph_size + 1), Point(morph_size, morph_size));  
    morphologyEx(src, dst, morph_operator, element);  
    imshow("Morph operation", dst);  
}
```

```
int main(int argc, char** argv)  
{
```

```

image = imread(full_path, IMREAD_COLOR);
cvtColor(image, image_gray, COLOR_BGR2GRAY); // Convert the image
to Gray
//GaussianBlur(image, image_copy, Size(13, 13), 0, 0);
image.copyTo(hough);

HoughCircles(image_gray, circles, HOUGH_GRADIENT, 1,
    image_gray.rows / 32, // change this value to detect circles with
different distances to each other
    100, 30, 20, 50 // change the last two parameters
                    // (min_radius & max_radius) to detect larger
circles
);

for (size_t i = 0; i < circles.size(); i++)
{
    Vec3i c = circles[i];
    Point center = Point(c[0], c[1]);
    // circle center
    circle(hough, center, 1, Scalar(0, 100, 100), 3, LINE_AA);
    // circle outline
    int radius = c[2];
    circle(hough, center, radius, Scalar(255, 0, 255), 3, LINE_AA);
}

threshold(image_gray, tresh, threshold_value, max_binary_value,
THRESH_TOZERO);

morphology_Operation(MORPH_OPEN, tresh ,tresh_opening);

//Canny(image_gray, canny_output, threshold_value-30, 255);
//Canny(tresh, canny_output, 0, 255);
Canny(tresh_opening, canny_output, 0, 255);

vector<vector<Point>> contours;

findContours(canny_output, contours, RETR_TREE,
CHAIN_APPROX_SIMPLE, Point(0, 0));

vector<RotatedRect> minRect(contours.size());
vector<RotatedRect> realRect;
vector<RotatedRect> minEllipse;

```

```

for (size_t i = 0; i < contours.size(); i++)
{
    minRect[i] = minAreaRect(contours[i]);
    if (contours[i].size() > 5 && (float(minRect[i].size.width) *
float(minRect[i].size.height) > threshld_area)) {
        realRect.push_back(minRect[i]);
        minEllipse.push_back(fitEllipse(contours[i]));
    }
}

drawing = Mat::zeros(canny_output.size(), CV_8UC3);

for (size_t i = 0; i < realRect.size(); i++)
{
    Scalar color = Scalar(rng.uniform(0, 256), rng.uniform(0, 256),
rng.uniform(0, 256));
    // contour
    //drawContours(drawing, contours, (int)i, color);
    // ellipse
    ellipse(drawing, minEllipse[i], color, 2);
    // rotated rectangle
    Point2f rect_points[4];
    realRect[i].points(rect_points);
    for (int j = 0; j < 4; j++)
    {
        line(drawing, rect_points[j], rect_points[(j + 1) % 4], color);
    }
}

imshow("Original", image);
imshow("Grayscale", image_gray);
imshow("Threshold", tresh);
imshow("Hough Detector", hough);
imshow("Canny output", canny_output);
imshow("Contours", drawing);

waitKey(0);

return 0;
}

```