

# Графический моделирующий комплекс для автономного необитаемого подводного аппарата

Михаил Морозов, Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН, morozov@iacp.dvo.ru

Игорь Туфанов, Институт проблем морских технологий ДВО РАН, ituphanov@gmail.com

## Аннотация

В работе рассматривается опыт создания и использования графического моделирующего комплекса автономного необитаемого подводного аппарата. Комплекс предназначен для отладки миссий аппарата в виртуальной трехмерной среде и позволяет выполнить часть необходимых испытаний в лабораторных условиях, что существенно снижает время и стоимость экспедиционных работ. Отладка миссии производится на основе формирования целевых реалистичных изображений окружающей среды для решения отдельных задач управления подводного аппарата.

**Ключевые слова:** Автономный необитаемый подводный аппарат, 3D моделирование, OpenGL, распознавание образов, машинное зрение.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При решении многих задач, связанных с маневрированием автономных необитаемых подводных аппаратов /АНПА/ вблизи подводных сооружений, требуется обработка видеоизображений для формирования надлежащего управления. В процессе подготовки миссии подводного аппарата обычно предварительно производится её моделирование с целью проверки и выявления ошибок, которые могут возникнуть в море. Этот процесс также называется верификацией миссии. Верификация особенно важна в миссиях с применением видео, поскольку такие миссии сложнее традиционных.

При использовании видео процесс моделирования усложняется: помимо движения аппарата и параметров водной среды, необходимо также иметь на выходе модели изображение, получаемое камерой. То есть, необходима модель трёхмерной среды, в которой аппарат выполняет перемещение, равно как и модель камеры, как одного из датчиков.

Настоящая работа посвящена разработке такой трёхмерной модели и схеме её использования для проверки миссии, являющейся переменной частью системы управления /СУ/ АНПА.

Существует множество систем моделирования для робототехники. В том числе и такие системы, в которых модельное изображение входит в цикл управления. Например, в работе [7] описан процесс моделирования, охватывающий не только программную, но и аппаратную части автономного летательного аппарата. Модельное изображение не передаётся модулю распознавания напрямую, а проецируется на экран и фиксируется камерой. Симулятор ÜberSim [6] используется в Carnegie Mellon University для моделирования действий группы роботов при игре в футбол. В области подводной робототехники существует модель, разработанная в рамках проекта CO<sup>3</sup>AUVs [4]. Она принимает на вход команды управления подводным аппаратом, а возвращает данные датчиков. В данной работе рассматривается опыт создания и использования

графического моделирующего комплекса автономного необитаемого подводного аппарата, предназначенного для АНПА МАРК [1].

## 2. ЗАДАЧИ АНПА, ТРЕБУЮЩИЕ УПРАВЛЕНИЯ, ОСНОВАННОГО НА ВИДЕО

К задачам, в которых требуется включение видео в цикл управления, относится задача следования вдоль протяжённого объекта [3]. Она может возникать в случае, если необходимо произвести инспекцию такого объекта (кабеля, трубы). Предполагается, что АНПА сначала совершает поисковый манёвр и начинает следовать вдоль искомого объекта, когда тот попадает в кадр. Предметом исследований здесь являются как алгоритмы движения, так и алгоритмы распознавания протяжённого объекта на кадре.

Другая задача, требующая обработки видео – это стыковка АНПА с донной станцией [1]. Предполагается, что для наведения на станцию в дальней зоне используется гидроакустический маяк, а в ближней зоне и во время стыковки АНПА использует изображение с камеры, чтобы распознать специальный маркер и выполнить точное позиционирование.

Ежегодно проходят различные соревнования по подводной робототехнике, в которых участникам необходимо создать АНПА, поведение которого основано на использовании видеoinформации. При этом перед АНПА участникам ставятся задачи, решения которых связаны с операциями вблизи визуальных объектов. Так, например, в соревнованиях RoboSub [9], проходящие под эгидой AUVSI Foundation, в бассейне в толще воды расположены различные объекты: буи, плоские дорожки, конструкции из труб ПВХ. Размеры и цвета объектов, а также их примерное расположение становится известным участникам приблизительно за полгода до соревнований. Аппарат участников должен перемещаться по бассейну, следуя оранжевым дорожкам, дотрагиваться корпусом до буёв определённого цвета, проходить сквозь рамки и т.д. Другие соревнования, Singapore AUV Challenge [10], проходят под эгидой IEEE. АНПА участников должны следовать по изображённым на дне бассейна дорожкам и попутно совершать некоторые дополнительные перемещения. Существуют также европейские соревнования, Student AUV Challenge – Europe [11]. Из трёх перечисленных соревнований последние два являются студенческими, а к участию в RoboSub допускаются также аспиранты и научные сотрудники. Участие в подобных соревнованиях преследует, помимо прочих, и технические цели: отладить СУ своего АНПА и сравнить её с аналогами. Одним из центральных элементов СУ для подобных соревнований является обработка видео и включение его в цикл управления.

## 3. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

В настоящем разделе описывается СУ, которая применяется на АНПА «МАРК» [1] и была разработана для АНПА «Юниор»

для участия в соревнованиях RoboSub в 2012 и 2013 году. В настоящее время продолжается разработка и поддержка единой системы для двух аппаратов. Тем не менее, существуют части системы, специфичные для каждого аппарата и в настоящей работе рассматривается лишь та её часть, которая используется на АНПА «Юниор», поскольку именно он оснащён видеокерами.

СУ реализована в виде набора исполняемых модулей. Для передачи данных используется механизм IPC, основанный на сетевых сокетах. У каждого модуля имеется набор входящих и/или исходящих сообщений. Такая организация СУ позволяет произвольным образом распределять модули по компьютерам, если на борту АНПА компьютеров имеется несколько (это зависит также и от того, к каким компьютерам подключены бортовые приборы). Так, например, АНПА «Юниор» имеет два бортовых компьютера, на одном из которых запускаются программы обработки изображений и гидроакустических сигналов, а на другом – модули СУ, отвечающие за управление движением аппарата и исполнение программы-задания. На борту АНПА модули работают под управлением ОС Linux, но могут быть перекомпилированы и под другую ОС (например, Windows) в случае необходимости.

На рис 1 изображена часть схемы СУ. В диаграмму не вошли некоторые драйверы бортовых устройств и пульт оператора.

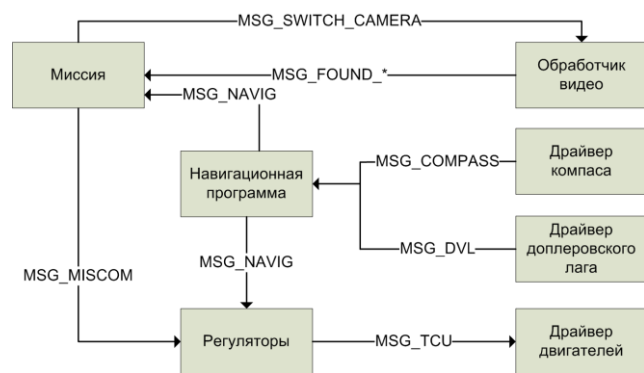


Рис 1: Основные модули СУ и сообщения, передаваемые между ними. Модули, находящиеся в правой колонке осуществляют обмен данными с бортовыми устройствами.

Опишем кратко некоторые модули и передаваемые между ними сообщения, поскольку это важно для дальнейшего изложения:

- *Миссия.* Основная программа, в которой действия необходимые для выполнения задачи разбиваются на простые команды движения. Эти команды передаются регуляторам в сообщениях MSG\_MISCOM.
- *Навигационная программа.* Собирает данные с навигационно-пилотажных датчиков в единый пакет (MSG\_NAVIG), на который подписаны регуляторы и миссия.
- *Регуляторы.* Принимают целевые параметры движения (MSG\_MISCOM) от миссии и текущие параметры (MSG\_NAVIG) от навигационной программы. На основе этого вычисляются необходимые параметры движения: тяги и угловые моменты.
- *Обработчик видео.* Модуль получает изображения от драйвера камеры (используется интерфейс v4l), осуществляет их предварительную обработку (цветокоррекция) и выполняет алгоритмы

распознавания. На выходе алгоритмов распознавания формируется описание найденных в кадре объектов: их цвета и геометрические параметры в координатах кадра. Сообщения с этим описанием (MSG\_FOUND\_\*) передаются миссии, которая использует их для принятия решений. Миссия может переключать камеры (менять активную камеру) и включать/выключать распознавание конкретных объектов, используя сообщение MSG\_SWITCH\_CAMERA.

- *Драйверы бортовых устройств.*

Таким образом, цикл управления, включающий обработку изображений, выглядит так: Миссия – Регуляторы – Драйвер двигателей – Двигатели – Среда – Камера – Обработчик видео – Миссия.

#### 4. ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Визуальные объекты, которые необходимо найти на изображениях, созданы искусственно и характеризуются резкими границами и яркими цветами. Однако при разработке алгоритмов поиска объектов на изображении информация о цвете используется лишь в непосредственной близости от объектов, поскольку под водой цвета искажаются.

Поиск объектов осуществляется с применением методов выделения границ, аппроксимации контуров полигонами, бинаризации по яркости или границам Н-канала в цветовом пространстве HSV. Для поиска прямолинейных объектов используется алгоритм на основе преобразования Хафа, учитывающий направления градиентов на изображении. При реализации широко использовалась библиотека OpenCV [5].

Примеры объектов и результатов их поиска на изображениях приведены на рис 2. Для поиска оранжевой дорожки (вверху) использовалась бинаризация по цвету в Н-канале. Для поиска шара (внизу) использовался алгоритм на основе преобразования Хафа.

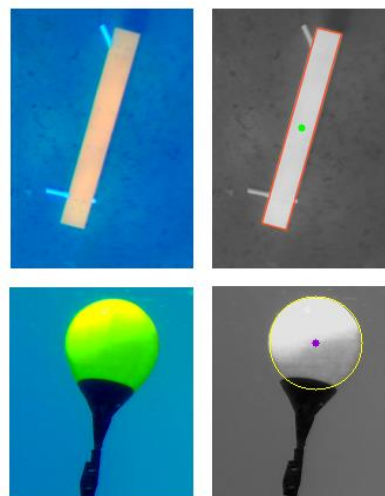


Рис 2: Примеры изображений искусственных объектов (слева) и результат их поиска (справа).

#### 5. МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Для отладки задач управления на основе видео разработан графический комплекс моделирования внешней среды для АНПА. Комплекс позволяет моделировать получение сенсорной информации о внешней среде посредством фото-

видео камер и гидролокаторов. Комплекс дает возможность имитировать движение АНПА в водной среде и может служить визуальным инструментом для отладки различных алгоритмов выполнения миссий.

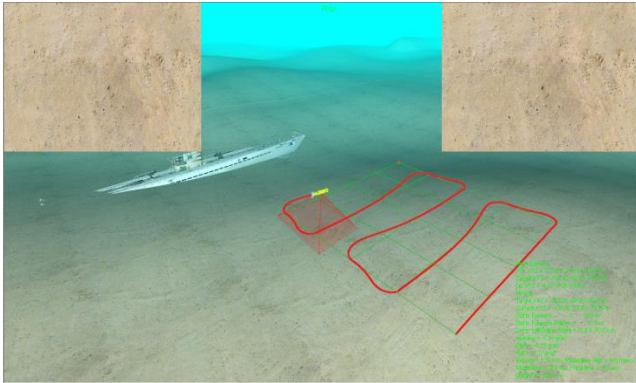


Рис 3: Моделирование движения АНПА в подводной среде. В отдельных окнах показаны изображения с бортовых камер, работающих в стерео-режиме. Камеры направлены на дно, поле зрения камер показано красной полупрозрачной пирамидой.

#### 4.1 Состав моделирующего комплекса среды

Моделирующий комплекс подводной обстановки сочетает в себе:

- 1.) Данные о подводной обстановке (рельеф, текстуры, статические и динамические объекты).
- 2.) Моделирование движения АНПА с учетом динамики реального аппарата.
- 3.) Средства отображения обстановки на экране.
- 4.) Возможность моделировать работу бортовых видеокамер и гидролокаторов АНПА в режиме реального времени.

#### 4.2 Данные о подводной обстановке

Рельеф и другие объекты задаются полигональными сетками с нанесенными текстурами, т.е. стандартными средствами представления сцен в трехмерной графике. На рельефе могут располагаться статические объекты, задающие различные детали, а над ним в водной среде движутся динамические анимированные объекты (рыбы). Сцена, описывающая подводную обстановку, загружается из файлов формата 3DS и таким образом может быть подготовлена в любом 3D-редакторе.

#### 4.3 Моделирование движения АНПА

Комплекс моделирования среды работает в двух основных режимах: автономном и в режиме внешнего управления. В первом случае расчет траектории движения АНПА производится самостоятельно, во втором случае траектория движения задается внешней программой. С внешней управляющей программой налажен двусторонний обмен посредством механизма разделения памяти (Shared Memory). От внешней программы МК среды получает координаты АНПА, обратно выдает изображения с бортовых камер.

#### 4.4 Рендеринг сцены

Визуализация сцены происходит посредством OpenGL с использованием аппаратного ускорения за счет хранения геометрии и текстур в видеопамати. Кроме этого используются методика разделения крупных объектов сцены на части и оптимизации за счет рендеринга только видимых частей. Достигнутая скорость рендеринга позволяет

моделировать движение и работу сенсоров АНПА в режиме реального времени. А в некоторых случаях (зависит от сложности сцены, конфигурации сенсоров и видеокарты), в режиме ускоренного моделирования миссии, т.е. с опережением реального времени.

#### 4.5 Моделирование сенсоров

В настоящее время таких сенсоров три: бортовая видео-фото камера, гидролокатор бокового обзора и однолучевой эхолот. Бортовые камеры моделируются стандартными средствами компьютерной графики (OpenGL). Каждая камера неподвижна относительно аппарата. Положение камеры задается точкой закрепления в локальной системе координат и вектором направления наблюдения. Также задается разрешение изображения, поле зрения и цветность RGB/Grayscale. Есть возможность имитировать на изображении размытие удаленных объектов за счет включения эффекта тумана. В настоящий момент комплекс позволяет моделировать работу 3х видеокамер, но при необходимости их количество может быть увеличено. Кадры с видеокамер могут формироваться или по запросу внешней управляющей программы или непрерывно с заданной частотой. Формирование гидролокационной картины происходит методом, описанным в работе [12]. Имитация работы гидролокатора бокового обзора была использована для разработки алгоритмов прослеживания протяженных объектов в работе [13].

### 6. МОДЕЛЬ В ЦЕЛОМ

Основной целью моделирования является верификация миссии. Возможна попутная отладка других модулей. При этом важно, чтобы исходный код модулей, подвергающихся проверке, не изменялся и был одним и тем же и в режиме моделирования и в реальном режиме работы.

При моделировании реальная физическая среда подменяется исполняемым модулем, который и является моделью. Модель перехватывает IPC-сообщения системы управления и подменяет сообщения от некоторых её модулей.

Трёхмерная модель среды является отдельной программой и работает под управлением ОС Windows. Передача данных между двумя частями модели осуществляется через общую память, являющуюся частью динамически присоединяемой библиотеки (DLL). Таким образом, процесс моделирования либо целиком осуществляется в ОС Windows, либо модель запускается на одном компьютере, а СУ – на другом (например, на бортовом компьютере АНПА), уже под управлением ОС Linux.

Тем не менее, моделирование с использованием двух компьютеров может быть затруднено, если предполагается передача несжатых изображений по сети. В этом случае изображения приходится предварительно сжимать таким образом, чтобы это не сказалось на качестве распознавания. В случае запуска всех модулей на одном компьютере подобных проблем не возникает.

Схема подключения модели изображена на рис 4. Приходится создать новое сообщение, MSG\_VIDEO\_FRAME, которое модель формирует для передачи обработчику видео. Это сообщение содержит изображение для обработки. Модель также формирует навигационный пакет, и принимает параметры движения аппарата от регуляторов. Основной цикл модели выглядит следующим образом:

1. Принять сообщение о параметрах движения.
2. Вычислить новое положение аппарата.
3. Передать новое положение аппарата модели среды.

4. Получить от модели среды изображения с камер.
5. Передать изображения с камер обработчику

Начальные параметры движения аппарата передаются модели через параметры командной строки.

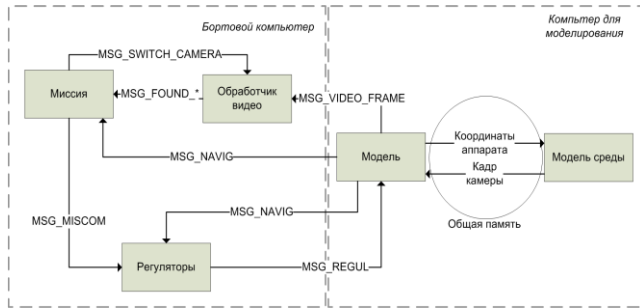


Рис 4: Схема подключения модели с использованием двух компьютеров. На бортовом компьютере работают основные модули СУ. На втором компьютере работают обе части модели, обменивающиеся данными через общую память.

## 7. РЕЗУЛЬТАТЫ

Далее будут описаны параметры, с которыми модель использовалась для подготовки к соревнованиям RoboSub 2012 и RoboSub 2013.

Запуск модели производился на одном компьютере под управлением ОС Windows. Модули СУ могут быть скомпилированы для этой ОС. То же самое касается и библиотек третьих сторон (IPC [8] используется для передачи сообщений и OpenCV [5] используется для обработки изображений).

Основной целью моделирования была верификация миссии, в то время как регуляторы являлись предметом отдельного направления работы. Поэтому при моделировании регуляторы не использовались, и модель напрямую принимала сообщение MSG\_MISCOM. Такая схема подключения представлена на рис 5.

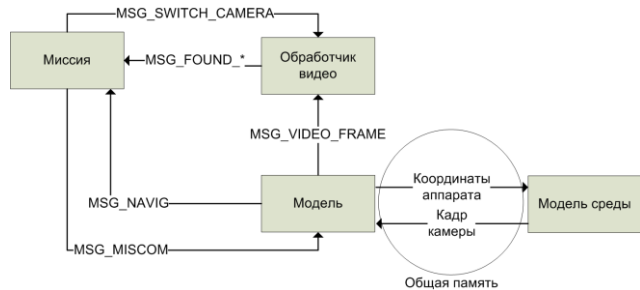


Рис 5: Схема моделирования миссии без использования регуляторов.

Опишем каждый шаг основного цикла моделирования более подробно:

1. Принять сообщение MSG\_MISCOM, если таковое имеется в очереди сообщений. Оно задаёт целевые параметры движения: координаты, глубину и курс.
2. Вычислить новое положение аппарата. Используется кинематическая модель, в которой крен и дифферент полагаются равными нулю. Линейные и угловые скорости аппарата ограничены. В случае если расстояние до целевой точки находится в пределах некоторой константы, аппарат совершает поворот в

сторону целевой точки и движется вперед. В противном случае аппарат смещается в сторону целевой точки и стабилизирует курс к целевому (движительная система аппарата позволяет это сделать).

3. Передать новое положение аппарата модели среды. На этом этапе необходимо выполнить перевод из системы координат, используемой в СУ ( $x, y$ , глубина, азимут курса), к координатам, используемым в среде ( $x, y, z$ , курсовой угол).
4. Получить от модели среды изображения с камер. Используются две камеры: передняя и нижняя. Вертикальный угол обзора каждой камеры составляет  $60^\circ$ . Размер изображения  $320 \times 240$ .
5. Передать изображения с камер обработчику. Изображения передаются на вход распознавателя в несжатом виде.

Использование модели значительно облегчило программирование миссии.

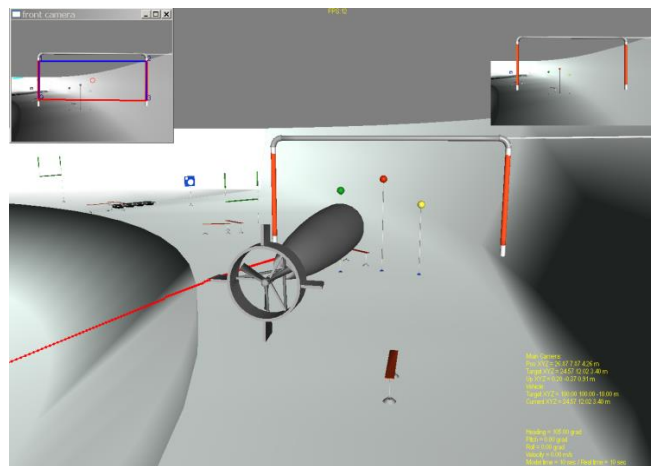


Рис 6: Часть окна модели среды. В модель загружена сцена, подготовленная для соревнований Robosub. В левом верхнем углу находится отладочное окно модуля обработки видео. В нем отмечены специальным маркером распознанные «ворота».

## 8. ВЫВОДЫ

К факторам, которые не учитывает настоящая модель, но которые могут быть учтены, относятся:

- Динамика аппарата.
- Тяговые характеристики движителей (например, как распределена сила при вращении винта в обе стороны).
- Ошибки датчиков.
- Искажения изображений, возникающие из-за специфики водной среды.
- Искажения, вносимые оптикой видеокамер.

Таким образом, верификация миссии на модели означает лишь, что логика миссии верна. Программное обеспечение аппарата при этом всё еще может содержать ошибки или не учитывать немодельных факторов.

Тем не менее, созданная модель позволяет верифицировать алгоритм работы миссии и представляется полезной для предварительной отладки реальных морских работ.

## 9. ЛИТЕРАТУРА

1. БОРЕЙКО А. А., ВОРОНЦОВ А. В., КУШНЕРИК А. А., ЩЕРБАТЮК А. Ф. *Алгоритмы обработки видеоизображений для решения некоторых задач управления и навигации автономных необитаемых подводных аппаратов* // Подводные исследования и робототехника. – 2010. – №1. – С. 29–39.
2. ВАУЛИН Ю. В., ДУБРОВИН Ф. С., КУШНЕРИК А. А., ТУФАНОВ И. Е., ЩЕРБАТЮК А. Ф. *Малогобаритный необитаемый подводный аппарат МАРК нового поколения для выполнения групповых операций* // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2012. – №6. – С. 59–65.
3. ИНЗАРЦЕВ А. В., ПАВИН А. М. *Интегрированная система технического зрения и управления АНПА для поиска и обследования протяжённых кабельных линий* // Подводные исследования и робототехника. – 2007. – №2. – С. 15–20.
4. ANTONELLI G., САПТИ А., CASALINO G., INDIVERI G., PASCOAL A., CAFFAZ A. *The CO<sup>3</sup>AUVs project: Overview and current progress* // Proceedings of the OCEANS 2011 MTS/IEEE Conference, June 6-9, 2011, Spain.
5. BRADSKI G., КАЕHLER A. *Learning OpenCV: computer vision with the OpenCV library* – 2008. – O'Reilly. – 555 p.
6. BROWNING B., TRYZELAAR E. *ÜberSim: A multi-robot simulator for robot soccer* // Proceedings of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, AAMAS'03. – 2003. – P. 948–949.
7. GANS N. R., DIXON W. E., LIND R., KURDILA A. *A hardware in the loop simulation platform for vision-based control of unmanned air vehicles* // Mechatronics. – 2009. – Vol 19. – Issue 7. – P. 1943–1056.
8. SIMMONS R., JAMES D., *Inter Process Communication: A Reference Manual* // <http://www.cs.cmu.edu>.
9. <http://www.auvsifoundation.org/foundation/competitions/robosub/>
10. <http://ewh.ieee.org/r10/singapore/oes/sauvc/>
11. <http://sauc-europe.org/>
12. БОБКОВ В.А., МОРОЗОВ М.А. *Моделирование работы гидролокционных устройств средствами машинной графики* // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – №1. – С. 46–51.
13. БАГНИЦКИЙ А.В., ИНЗАРЦЕВ А.В., ПАВИН А.М., МЕЛЬМАН С.В., МОРОЗОВ М.А., *Модельное решение задачи автоматической инспекции подводных трубопроводов с помощью гидролокатора бокового обзора* // Подводные исследования и робототехника. – 2011. – №1. – С. 17–23.

### Об авторах

Морозов Михаил Александрович - ведущий инженер-программист лаборатории машинной графики Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

E-mail: morozov@iacp.dvo.ru

Туфанов Игорь Евгеньевич - аспирант Института проблем морских технологий ДВО РАН.

E-mail: ituphanov@gmail.com