



УДК 004.021, 004.415

© 2016 г. С.В. Мельман, канд. техн. наук,

В.А. Бобков, д-р техн. наук,

А.П. Кудряшов, канд. техн. наук

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ*

В статье описывается применение имитационного программного моделирующего комплекса для исследования и отладки методов визуальной навигации автономного подводного робота и 3D реконструкции подводной обстановки.

Ключевые слова: автономный подводный робот, моделирующий комплекс, виртуальная реальность, визуальная навигация, реконструкция.

DOI: 10.22250/isu.2016.50.115-123

Введение

В последнее время активно развиваются методы визуальной навигации автономных роботов и 3D реконструкции окружающей обстановки по изображениям [1 – 3].

Для повышения эффективности исследований в этом направлении, тестирования и оценки создаваемых программных средств целесообразно использовать системы компьютерного имитационного моделирования. Такого рода системы должны обеспечивать не только виртуальную среду, но и имитировать движение робота и работу его подсистем, включая сенсорные измерения. Примерами таких систем являются [4, 5].

В предыдущих работах авторов описан имитационный программный моделирующий комплекс (МК) [6, 7] для автономных подводных роботов, который реализует широкий спектр возможностей имитационного моделирования по управлению движением робота, функционированию сенсорного оборудования и выполнению рабочих миссий. В данной работе рассматриваются вопросы применения развиваемого авторами МК для исследования и отладки методов визуальной навигации автономного подводного робота и 3D реконструкции подводной обстановки.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-07-00350, № 15-07-00341).

Моделирующий комплекс. Функциональные возможности

Подробное описание ранее разработанного авторами МК можно найти в работах [6, 7]. Применение МК значительно упрощает решение задач по разработке, исследованию и отладке алгоритмов и методов, образующих программный интеллект робота. Примерами таких задач могут служить: отладка алгоритмов управления движением АПР; автоматическая навигация; отладка алгоритмов машинного зрения – поиск, распознавание, исследование объектов подводной обстановки; отладка алгоритмов «интеллектуального поведения».

Это возможно благодаря имитации бортовых систем подводного аппарата, действующих в подводной среде. Другие функциональные возможности позволяют использовать МК в качестве тренажерного комплекса для операторов АПР, задавать и исследовать миссии АПР с учетом возникновения нештатных ситуаций и обстоятельств, тестировать работоспособность оборудования и бортового ПО подводного аппарата при его подключении к виртуальной среде моделирующего комплекса в режиме НПЛ (Hardware-in-The-Loop).

МК предоставляет развитые инструменты визуализации результатов моделирования, позволяя выбрать любой момент миссии для изучения как информации с сенсоров, так и визуальной информации в 3D. Наличие централизованной БД позволяет реализовать многопользовательский доступ к результатам моделирования для совместного анализа результатов моделирования миссии несколькими операторами.

Предложенная ранее архитектура МК описывает процесс моделирования робота в среде как циклическую последовательность «действие робота – реакция среды». Такая схема моделирования позволяет учитывать современные требования к моделирующим комплексам, встречающиеся в литературе, а именно: учет нелинейного влияния окружающей среды и работа роботов в группе. Также в состав системы входит база данных для выполнения задач: интеграция в единую структуру хранилища всех данных о всех процессах моделирования; получение немедленного доступа к упорядоченной по времени информации; извлечение исторических данных, информации о конфигурации, событиях и других данных. Такая архитектура позволяет реализовать гибридную схему параллелизма, основанную на распределенных вычислениях на множестве узлов и параллельных вычислениях в рамках каждого узла с применением GPGPU вычислений на графических ускорителях. Схема распределенных вычислений реализована с использованием клиент-серверной модели.

В основу архитектуры заложен модульный принцип, который реализован с использованием технологии plug-in. Каркас моделирующего комплекса состоит из:

- сервера – состоящего из супервизора и БД, предназначенного для координации действий всего МК;

- диспетчеров – отдельных программных приложений, посредников между сервером и отдельными модулями, ответственными за имитацию бортового оборудования;

интерфейсных программных приложений, предназначенных для работы пользователя с МК и визуализации процессов или результатов моделирования.

Реализация программного обеспечения позволяет запускать приложения также и на кластере.

Для исследования методов/алгоритмов визуальной навигации в МК предусмотрены возможности создания виртуальной среды, виртуального АПР, движущегося по запланированной траектории с учетом модели динамики реального подводного аппарата, а также возможности визуальной и количественной сравнительной оценки, вычисляемой 6DOF локализации АПР.

Моделирование подводной обстановки

Имитационное моделирование подводной обстановки в МК осуществляется на основе моделирования показаний бортового оборудования АПР с максимально возможным реализмом. Для отладки алгоритмов визуальной навигации, необходимо моделирование работы видеокамеры. Для качественной имитации нужно учесть следующее:

геометрические искажения оптики негативно влияют на работу алгоритмов визуального позиционирования;

неоднородность освещения реальной подводной обстановки негативно сказывается на работе алгоритмов сопоставления особенностей на изображениях.

Современная технология производства оптики сводит к минимуму геометрические искажения, а с другой стороны, существует математический аппарат калибровки внутренних параметров видеокамеры, предназначенный для устранения геометрических искажений, вносимых оптикой камеры, в том числе и эффекта «рыбий глаз». Кроме того, при создании АПР подбирается наиболее надежное и качественное оборудование, которое калибруется на подготовительном этапе; таким образом при моделировании видеооборудования АПР на этом аспекте не делается акцент.

Имитация условий плохой видимости является наиболее существенным фактором для отладки и проверки качества алгоритмов визуальной навигации. При имитации учитываются такие факторы как:

освещенность – чем глубже, тем меньше естественного света и тем больше спектр сужается к зеленому или синему цвету в зависимости от химического состава воды (вода является светофильтром);

замутненность воды (песок, ил, простейшие водоросли, ракообразные, планктон);

шум светочувствительных сенсоров;

потеря кадров в видеопоследовательности (нештатные ситуации);

поднятие придонного ила от работающих ходовых и маневровых движителей;

движение в кадре (не связанное с движением АПР): пузырьки, колыхание морских водорослей и мусора, движение морских животных и рыб, блики от осветителей и эффекты поверхностного линзирования.

Кроме стерео видеокамеры, на виртуальном испытательном АПР были установлены магнитный компас, доплеровский лаг и 3D дальномер.

Модель динамики АПР. Движение аппарата определяется планируемой траекторией, заданной набором целевых точек. Есть два основных режима движения аппарата: кинематический и динамический. Кинематический позволяет задать движение аппарата с определенной скоростью и не накладывает ограничений на форму траектории. При таком типе движение безынерционно и конфигурация траектории может быть произвольной.

При втором режиме расчет движения производится с учетом реальной динамики аппарата: его массы (инерции), тяги двигателей, плавучести, остойчивости и сопротивления воды. Поэтому траектория, рассчитанная модулем динамики, совпадает с запланированной лишь с некоторой точностью. Но такой подход позволяет имитировать более реалистичное движение. Процедура расчета такова, что целевая точка движется по заданной траектории на расстоянии. Чем ближе целевая точка к АПР, тем точнее движение по заданной траектории. Для обеспечения большой точности движения по заданной траектории модуль динамики значительно снижает скорость движения АПР. Чем дальше целевая точка, тем больше скорость движения АПР и возможное отклонение динамической траектории от заданной, но это позволяет исключить резкие маневры. Расстояние до целевой точки определяется на этапе проектирования траектории исходя из предполагаемой миссии.

Захват снимков видеопоследовательности. Камера моделируется средствами OpenGL (ссылка на работы). Положение камеры жестко привязано к системе координат аппарата, и изображения формируются через заданные интервалы модельного времени согласно спецификации установленного бортового оборудования. Таким образом, мы имеем последовательность изображений, полученную в процессе движения по траектории. Параллельно с изображением камеры сохраняются буфер глубины, матрица камеры и матрица перехода из МСК в текущее положение АПР. Это позволяет нам получить 3D координаты любой точки изображения в мировой СК для задачи оценки качества алгоритмов навигации.

Передача данных из МК в программу навигации. Как было описано в предыдущей работе [6, 7], все модули моделирующего комплекса работают независимо, а обмен данными происходит через базу данных. Все данные сгенерированные модулями моделирующего комплекса, в том числе и модулями видеокамер, по сети отправляются в базу данных, откуда модуль визуальной навигации их может получить.

Компас и доплеровский лаг. Моделирующий комплекс в процессе моделирования обладает точной информацией о положении и ориентации аппарата, но реальные датчики всегда выдают показания с погрешностью. Эта погрешность может быть описана как шум. Для более точной имитации необходимо заранее подобрать параметры модели шума, вносимого измерительными устройствами. Модель компаса вносит в реальные показания шум с гауссовым распределением, причем математическое ожидание и дисперсия, могут меняться в ходе моделирования. Так как в реальных условиях на показания компаса способны влиять окру-

жающие предметы (металлические корпуса затонувших кораблей, трубопровод, магнитные породы донного грунта), то возможные искажения необходимо учитывать при компоновке виртуальной среды моделирования. Механизм изменения базовых параметров шума, заложенных на этапе проектирования сенсора, в моделирующем комплексе реализован с помощью набора скалярных полей с географической привязкой. Параметр (математическое ожидание и дисперсия) удобно задавать плоской 2D-битовой картой в виде растрового изображения RGB. R-компонента задает изменение математического ожидания, G – дисперсии, B – глубина максимального влияния, так как в основном аномалии, влияющие на показания магнитного компаса, находятся на дне, компонента B обычно содержит карту высот. Аномалии, находящиеся в одной географической точке, но на разных глубинах, в данной реализации не учитываются.

Пример. Так как на показания компаса влияет только положение АПР, то для определения поправки к базовым параметрам «шума» прибора можно поступить следующим образом:

$P(t)$ – 3D точка, положение АПР в МСК в момент времени t ;

$(x, y)^T = M * P$, где M – матрица 3×2 , переводящая положение АПР в 2D координаты скалярного корректирующего поля (содержит только сдвиг и масштабирование по XY и отбрасывает Z);

$(E, A, R) = S_{RGB}(x, y)$ – извлечение значений из растрового изображения с применением билинейной интерполяции;

$E_{rez} = E_{bas} + k_E * E * d$ – вычисленное математическое ожидание;

$A_{rez} = A_{bas} + k_A * A * d$ – вычисленная дисперсия;

E_{bas}, A_{bas} – базовое математическое ожидание и дисперсия, заложенные на этапе проектирования сенсора;

$d = 1/(1 + (z - k_R * R)^2)$ – коэффициент влияния глубины;

k_E, k_A, k_R – константы преобразования значений битовой карты, заложены на этапе проектирования (нужно учесть, что $E = [-128, 127]$; $A, R = [0, 255]$);

$AZ = AZ_{real} + GAUSS(E_{rez}, A_{rez})$ – показание компаса с учетом гауссова шума с вычисленными параметрами.

Подобный механизм изменения базовых параметров может быть применен к большинству бортовых сенсоров, но некоторые – такие как доплеровский лаг – требуют учета дополнительных обстоятельств. Например, на показания доплеровского лага (ДЛ) практически не влияет положение в пространстве, но может оказывать влияние донная поверхность. Эти эффекты учитываются описанной моделью. Так же незначительно влияет скорость движения АПР, но в значительной мере подвержены шуму при наличии ненулевых угловых скоростей АПР. Этот эффект вводится в модель путем добавления дополнительных слагаемых к дисперсии шума:

$A_{rez} = A_{bas} + k_A * A * d + k_w * w + k_V * V$, где k_w, k_V – константы при функциях влияния (w) угловых скоростей, (V) – линейной.

Данная модель не описывает реального взаимодействия элементов прибора с окружающей средой на физическом уровне. Такое упрощение делается в связи с тем, что на АПР ставится известное, протестированное и откалиброванное оборудо-

дование. Для решения задачи обкатки/отработки алгоритмов навигации такая модель позволяет учесть отклонения показаний приборов, не связанных с их конструкцией и физическими эффектами, на которых эти приборы основаны.

3D дальномер

Задача визуальной навигации – определение местоположения АПР по последовательности изображений, получаемых с бортовых видеокамер. Одним из современных методов решения этой задачи является вычисление относительных перемещений АПР на основе совмещения двух облаков 3D точек, построенных в локальных СК по стереоизображениям, относящимся к соседним позициям траектории. Таким образом, процесс вычисления параметров траектории (6DOF) можно разделить на два: построение облаков точек и вычисление матрицы локального геометрического преобразования на основе совмещения облаков. Эффективность визуального метода в целом зависит как от точности построенных 3D облаков, так и от эффективности алгоритма совмещения облаков. Другой важной задачей, связанной с обработкой последовательности стереоизображений, является задача 3D реконструкции окружающей обстановки. Она решается объединением отдельных видов сцены, получаемых по 3D облакам точек, с использованием результатов локализации АПР. Поэтому для целей исследования, тестирования, а также оценивания алгоритмов навигации и алгоритмов реконструкции была разработана модель виртуального 3D дальномера, позволяющего получать из виртуальной обстановки 3D облака точек любой плотности.

В основу работы дальномера заложен тот же принцип, что и формирования изображения виртуальной видеокамеры. Необходимо задать точку привязки прибора на АПР, его ориентацию и параметры конуса видимости – т.е. настроить камеру в терминах OpenGL. После этого штатными средствами OpenGL выполняется рендеринг виртуальной среды и считывается Z-буфер. Далее с помощью проекционной матрицы классический Z-буфер преобразуется в расстояния, т.е. в каждом пикселе значение Z-буфера заменяется на расстояние от точки положения камеры до точки поверхности.

$D_{x,y} = |M_{prj}^{-1} \cdot (x, y, z_{buf})^T|$ – расстояние от точки положения камеры до точки на поверхности, пересекаемой лучом, проходящим через точку (x, y) на экранной плоскости.

Оценка качества построения облаков по стереопаре выполняется следующим образом. Будем называть облако точек, полученное 3D дальномером, – идеальным, а получаемое с помощью алгоритма по стереопаре – вычисленным. Виртуальный дальномер совмещается с одной из видеокамер стереопары (для простоты можно просто брать Z-буфер при получении изображения этой камерой). Затем вычисленное облако точек проецируется на экранную плоскость дальномера и для тех пикселей, в которые попали проекции точек из вычисленного облака, рассчитывается расстояние описанным выше способом. В остальные пиксели заносится расстояние равное нулю. Качество алгоритма построения облаков точек по стереопаре может оцениваться тремя параметрами. Первый – плотность построения облака точек как отношение числа точек вычисленного облака к числу

пикселей (камеры из стереопары). Второй и третий параметры – математическое ожидание и дисперсия отклонений расстояний спроецированного вычисленного облака и расстояний, вычисленных 3D дальномером. При этом: N – количество точек в облаке; W, H – ширина и высота изображения камеры из стереопары в пикселях; $D(x, y) = D(x, y)_{\text{выч}} - D(x, y)_{\text{идеал}}$ – разница расстояний; $O_1 = \frac{N}{W \cdot H}$ – оценка плотности облака; $O_2 = \frac{1}{N} \sum_{x,y}^{W,H} D(x, y)$, для всех $D(x, y)_{\text{выч}} \neq 0$ – оценка смещения вычисленного облака; $O_3 = \frac{1}{N} \sum_{x,y}^{W,H} (O_2 - D(x, y))^2$, $\forall D(x, y)_{\text{выч}} \neq 0$ – дисперсия смещения. В идеальных условиях $O_1 \rightarrow 1$; $O_2, O_3 \rightarrow 0$.

Отметим, что облака, получаемые 3D дальномером, могут быть как идеальными, так и зашумленными для оценки устойчивости тестируемых алгоритмов.

Оценка точности локализации АПР

Оценка точности локализации АПР осуществляется путем сравнения параметров (6DOF) вычисленной (с помощью визуального метода) и идеальной (смоделированной) траектории. Движение АПР по заданной траектории в виртуальной сцене обеспечивается средствами МК. Оцениваются положение и ориентация АПР в МСК. Согласно методу визуальной одометрии эти параметры вычисляются путем последовательного объединения локальных перемещений, т.е. матрица геометрического преобразования H_i , связывающая локальную систему координат в позиции i с МСК, вычисляется следующим образом: $H_i = \prod_{k=0}^i H_{i-1,k}$, где $H_{i-1,k}$ – локальная матрица. Моделирующий комплекс обеспечивает передачу идеальных матриц H_{id_i} связи локальных СК с МСК в каждой позиции траектории. Поэтому при тестировании визуального метода достаточно просто оценивать величину ошибки как при вычислении 6DOF локальных перемещений (из позиции $(i-1)$ в позицию i), так и при вычислении абсолютной ошибки 6DOF отклонения вычисленной траектории от идеальной. Ошибка в вычислении положения или оценка (смещение) вычисленной позиции определяются в виде: $\varepsilon = |\hat{X}_i - X_i|$ где $\hat{X}_i = H_{id_i} \cdot (0,0,0,1)^T$ – истинное положение АПР в момент времени t_i в МСК; $X_i = H_i \cdot (0,0,0,1)^T$ – вычисленное положение в МСК.

Усредненное расхождение по углам ориентации камеры (ПА) на i -м шаге вычисляется по формуле $da_i = \frac{1}{3} \sum D\alpha_n$, где $D\alpha_n$ – угол между вычисленным ортом и идеальным ортом для ортов i, j, k .

Следует отметить, что тестирование выполняется для двух режимов функционирования алгоритмов – режима реального времени и режима постобработки видеoinформации.

Эксперименты

Моделирующий комплекс применялся для отладки ряда модификаций визуального метода навигации, основанного на визуальной одометрии, с использованием стереоизображений. Для более полной и надежной оценки эффективности тестируемых алгоритмов создавались сцены с разным рельефом и текстурой дна,

и с разными траекториями виртуального АПР (по форме и высоте прохождения над дном). Примеры сцен и траекторий показаны на рис. 1.

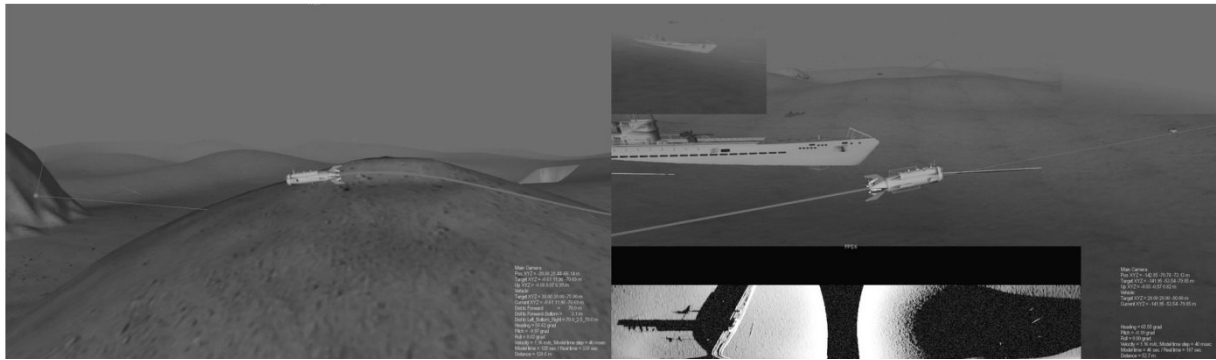


Рис. 1. Сцены подводной обстановки в МК.

Пример результатов оценки эффективности для одного из вариантов визуальной навигации приведен на рис. 2.



Рис. 2. Восстановление траектории движения методом визуальной навигации. Реальная траектория ПР и вычисленное положение очень близки.

Пример сцены, сгенерированный 3D дальномером для отладки и тестирования алгоритмов 3D реконструкции сцен подводной обстановки, показан на рис. 3.

Заключение

Опыт применения разработанного МК показал его эффективность при исследовании методов управления движением АПР как в целом, так и в частности, при исследовании методов визуальной навигации и 3D реконструкции сцен подводной обстановки. Следует отметить, что функциональные возможности МК и его вычислительная производительность (благодаря распределенно-параллельной архитектуре) позволяют выполнять в приемлемое время большой объем тестиро-

вания с вариацией параметров и характеристик алгоритмов, сцен и траекторий АПР, что важно для исследования эффективности алгоритмов/методов и их устойчивости к ошибкам.

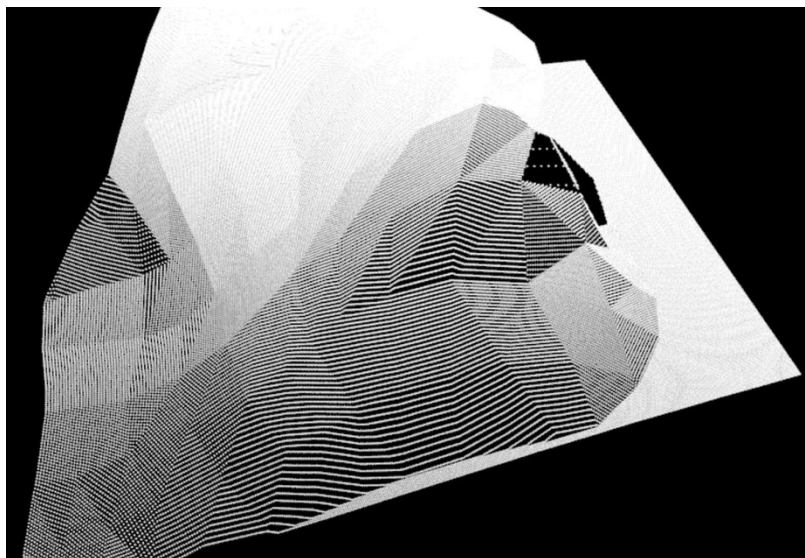


Рис. 3. Поверхность дна, сгенерированная виртуальным 3D дальномером.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Salvi J., Petillot Y., Battle E.* Visual SLAM for 3D Large – Scale Seabed Acquisition Employing Underwater Vehicles // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2008. – P. 1011-1016.
2. *Kim A., Eustice R.M.* Real-Time Visual SLAM for Autonomous Underwater Hull Inspection Using Visual Saliency // IEEE Transactions on Robotics. – 2013. – № 29(3). – P. 719-733.
3. *Бобков В.А., Машенцев В.Ю.* Навигация подводного робота по стереоизображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т.17, №2. – С. 101-109.
4. *Parodi O., Lapiere L., Jouvencel B.* Hardware-in-The-Loop Simulators for multi-vehicles scenarios: survey on existing solutions and proposal of a new architecture // Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009, – September 2009, – St Louis, MO, USA. – P. 225-230.
5. *Sehgal A., Cernea D.* A multi-AUV missions simulation framework for the USARSim Robotics Simulator // Proc. of the 18th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED) – 23-25 June 2010 – P. 1188-1193.
6. Программный моделирующий комплекс для автономных подводных аппаратов на базе многопроцессорной архитектуры / С.В. Мельман, В.А. Бобков, А.В. Инзарцев и др. // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – №1(19) – С. 23-32.
7. Distributed simulation framework for investigation of autonomous underwater vehicles' real-time behavior / S. Melman, A. Pavin, V. Bobkov, Al. // OCEANS 2015 – MTS/IEEE Washington – 19-22 Oct. 2015 – P. 1-8..

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.И. Абакумовым.

E-mail:

Мельман Сергей Владимирович – melman@dvo.ru;

Бобков Валерий Александрович – bobkov@dvo.ru;

Кудряшов Алексей Павлович – kudryashova@dvo.ru.