

Моделирующий комплекс для исследования методов управления движением автономного подводного аппарата¹

В.А. Бобков, Ю.С. Борисов, С.В. Мельман, Ю.И. Роншин
Институт автоматики и процессов управления
Владивосток, Россия
{bobkov, borisoff, gruzd, ronshin,}@iacp.dvo.ru

Аннотация

Работа направлена на создание моделирующего комплекса для исследования методов управления сложными пространственными движениями автономного подводного аппарата. В основу комплекса положен принцип виртуальной реальности и имитационное моделирование основных систем аппарата. Описана структура комплекса и схема его функционирования. Акцент сделан на использовании оптической информации для целей навигации. Предложена модель виртуального оптического дальномера с использованием метода уточнения траектории аппарата и алгоритма восстановления 3D точек подводной среды. Алгоритм обеспечивает плотное 3D покрытие с восстановлением нормалей поверхностей по трем последовательным калиброванным изображениям. Приведены результаты вычислительных экспериментов для синтетических сцен разной глубины. В ближайшей перспективе развития комплекса предполагается разработка методов, алгоритмов планирования траекторий АПА по данным сонаров и видеокамер и с учетом его миссии.

Ключевые слова: виртуальная реальность, автономный подводный аппарат, моделирование, визуализация, сонар, эпиполярные ограничения, кросскорреляция, 3D восстановление.

1. ВВЕДЕНИЕ

Создание систем виртуальной реальности, компьютерных тренажеров и разного рода систем моделирования стало уже традиционным подходом к решению многих серьезных прикладных задач, связанных с проведением дорогостоящих натурных экспериментов. В данной работе рассматривается разработка моделирующего комплекса применительно к исследованию методов управления движением автономного подводного аппарата (АПА). Создаваемый моделирующий комплекс должен обеспечить в наглядной графической форме проверку эффективности различных методов/алгоритмов управления, закладываемых в программно-алгоритмический интеллект ПА. Принципиальной основой его реализации является применение виртуальной реальности, имитационное моделирование и высокая степень модульности. При разработке комплекса учитывался опыт создания аналогичных систем [1-4]. Вместе с тем, его отличительными особенностями являются: расширенные возможности

визуализации для исследования различных режимов управления движением АПА; возможности редактирования моделей среды и ПА; возможности моделирования пространственной окружающей среды по данным виртуальных сенсоров для планирования траектории движения АПА; возможности распределенных/параллельных вычислений на кластере ЭВМ. Важную часть "интеллекта" АПА составляет его способность решать задачу планирования траектории с учетом сложной подводной обстановки и его прикладной миссии на основе данных сенсоров (гидроакустические локаторы и фото/видеокамеры). Основной для целей навигации является гидроакустическая информация. Потребность в использовании оптической информации возникает при обходе близких препятствий, при работе с манипуляторами и в некоторых других случаях, когда нужна точная координация движений АПА. Поэтому, наряду с моделированием работы гидроакустических сонаров, здесь рассматривается и понятие виртуального "оптического дальномера", под которым понимается программно-алгоритмическая реализация измерителя расстояний до объектов сцены вдоль задаваемых лучей. А для его реализации необходимо решать фундаментальную задачу компьютерного зрения "восстановление структуры и движения", именуемую в робототехнике SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Развиваемые в настоящее время подходы к ее решению основываются на определении проективной / аффинной структуры для некалиброванной последовательности изображений с последующим уточнением евклидового координатного описания положения камеры и реперных точек сцены. В данной работе прикладной контекст постановки задачи позволяет использовать два упрощающих решения предположения. Первое - известна математическая модель движения АПА и имеется бортовая навигационная система, определяющая ориентацию аппарата и глобальные координаты (недостаточно точные для описания положения камеры, но пригодные в качестве начального приближения в используемом методе решения). Второе состоит в том, что на аппарат устанавливаются внутренне откалиброванные камеры. С учетом этого наш подход ориентирован на режим реального времени и основывается на двухэтапном решении задачи определения движения и реконструкции обстановки. На первом этапе с учетом указанных предположений решается классическая задача определения движения камеры по реперным точкам среды на ограниченной последовательности изображений. Для ее решения

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №05-07-90027, №04-07-90287) и грантов ДВО РАН (разделы 1,3).

разработан метод с использованием расширенного фильтра Калмана (см. доклад настоящего сборника Борисов Ю.С. "Решение задачи навигации подводного аппарата по последовательности изображений"). На втором этапе решается задача 3D реконструкции в постановке "оптический дальномер" (определение расстояний по множеству лучей внутри заданного конуса/пирамиды) с учетом уже вычисленных (на первом этапе) положений калиброванной камеры. Разработанный алгоритм восстановления 3D точек, в отличие от традиционных алгоритмов, ориентирован не на поиск характерных "особенностей" (точки, линии и др.), а на идентификацию локальных участков поверхностей объектов с использованием гомографии и вычислением нормалей. В первой части доклада рассматривается структура и основные принципы функционирования моделирующего комплекса. Во второй части описан алгоритм 3D восстановления точек сцены, лежащий в основе реализации виртуального "оптического дальмера".

2. СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

Структура программного моделирующего комплекса представлена на рис.1. Положенный в основу модульный принцип обеспечивает универсальность и гибкость, необходимые для модернизации и адаптации комплекса к расширяемому кругу прикладных задач. В структуре выделены три основных блока: блок взаимодействия с пользователем, блок хранения данных и блок моделирования. На втором уровне иерархии каждый из основных блоков разделен на локальные блоки (модули). Такая структура предполагает при развитии комплекса локальную модификацию на уровне замены отдельных модулей с согласованием входной и выходной информации. Дополнительное преимущество - возможность нетрудоемкой адаптации к распределенной / параллельной многопроцессорной обработке.

Блок взаимодействия с пользователем обеспечивает ввод/вывод информации в удобной для пользователя форме. Он позволяет оператору определять задачи движения АПА, наблюдать в реальном масштабе времени за показаниями его приборов и сенсоров, а также контролировать в интерактивном режиме выполнение поставленных задач. Блок моделирования обеспечивает расчет движения АПА по сформированной пространственной траектории в среде с заданными параметрами. Здесь также моделируется работа сенсоров и датчиков, систем управления движением АПА и алгоритмов формирования траектории. Блок хранения данных обеспечивает хранение и передачу данных между основными блоками комплекса с помощью специально разработанного интерфейса. В процессе работы системы весь обмен данными между блоками осуществляется через блок хранения данных. В режиме визуализации движения АПА блок взаимодействия с пользователем получает из блока хранения данных информацию о текущем состоянии АПА, его реальном положении и ориентации в пространстве, трехмерную модель рельефа, планируемую траекторию и реально пройденный путь, а также данные с его сенсоров. В обратном направлении поступают данные о параметрах среды и аппарата, введенные пользователем. Предусматривается также ввод пользователем задания для АПА и его сохранение в формализованном виде. Из блока моделирования в блок хранения данных поступает:

информация о расчетном положении АПА в пространстве, показания навигационных приборов и датчиков параметров его движения, а также информация о кинематических параметрах подвижных частей АПА (манипулятор, движитель с изменяемой ориентацией вектора тяги и т.д.); сформированная траектория движения АПА; данные, полученные с сенсоров, установленных на АПА. Из блока хранения данных в блок моделирования поступают данные о целях и задачах АПА, информация об окружающей среде и параметрах модели аппарата, а также о параметрах воздействия окружающей среды на АПА (подводные течения и т.д.). Помимо указанных основных предусмотрены два вспомогательных блока: генератор среды и редактор аппарата. Генератор среды предназначен для создания виртуального испытательного полигона, где и будет происходить движение АПА. Он позволяет загрузить данные о рельефе, расположить различные дополнительные объекты в испытательной области, задать физические параметры среды (подводные течения, плотность воды, ее соленость, а также освещенность дна и т.д.), наложить на рельеф текстуры для более реалистичной визуализации, сформировать и наложить карты звукопоглощения и звукоотражения для донного рельефа и придонных объектов. Результатом его работы является построение полигональной текстурированной сцены с дополнительными физическими характеристиками, которая сохраняется в специальном формате для использования в моделирующем комплексе. Запланированы два режима работы комплекса – режим моделирования и режим тренажера. В первом режиме комплекс моделирует автономную работу АПА. На основании показаний датчиков и информации, выдаваемой системой распознавания, формируется желаемая траектория движения аппарата в соответствии с заданием, введенным пользователем перед началом процесса моделирования. Для отработки заданной траектории блок расчета управляющих воздействий формирует сигналы управления движительным комплексом на основании показаний датчиков, информации о текущем состоянии АПА и о его желаемом положении. Информация о величине этих сигналов поступает в математическую модель АПА, где рассчитываются силы, действующие на АПА, и моделируется динамика его движения. Режим тренажера обеспечивает оператору моделирующего комплекса возможность управления аппаратом в режиме реального времени, используя ручное управление. Основная информация для управления – показания приборов и картина виртуального движения АПА.

3. АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ 3D ТОЧЕК СЦЕНЫ

Задача восстановления 3D структуры сцены по изображениям (видам) для откалиброванных камер с использованием эпиполярных ограничений и методики корреляционного сравнения растровых площадок изображений давно известна и хорошо исследована на сегодняшний день. Применительно к навигации роботов первые результаты были получены уже в работах [5-7]. Для пары изображений эпиполярные ограничения реализуются с помощью фундаментальной матрицы, для трех видов рассматривается трифокальная геометрия с вычислением трифокусного тензора. Для 3D восстановления используются также и множественные последовательности изображений, как, например, в известном алгоритме Okutami и Kanade [8]. В отличие от

многочисленных алгоритмов, направленных на идентификацию "особенностей" на изображениях, предлагаемый алгоритм планировался для восстановления плотного покрытия точек видимых гладких участков текстурированных поверхностей объектов сцены (т.е. на фрагментах изображения, где отсутствуют "линии горизонтов" и изломы поверхности) с восстановлением нормалей. Это требует предварительной процедуры выделения на изображениях "граничных" областей, которые не обрабатываются при работе алгоритма. В контексте рассматриваемого приложения (оптический дальномер) предполагается обработка алгоритмом небольшого количества лучей без вычисления нормалей, но в задаваемых направлениях. Используются три последовательные, полностью калиброванные изображения (т.е. заданы и положения камер, которые, как было отмечено выше, вычисляются на предварительном этапе методом фильтра Калмана). Множественное покрытие точками обеспечивается работой двух последовательных алгоритмов. Первый определяет т.н. затравочные точки с вычислением в них нормалей. Второй алгоритм, используя эти затравочные точки с нормальными, определяет соседние точки с существенно меньшими вычислительными затратами. Рассмотрим работу первого (основного) алгоритма, который может использоваться и самостоятельно для 3D восстановления отдельных точек. Для заданной на 1-ом изображении точки p выпускается луч из центра проекций 1-й камеры C (см. рис.2). Построим эпиполярную плоскость, определяемую этим лучом и центром 2-й камеры C' . Пересечение плоскости с локальным участком поверхности (surfel) дает пространственный отрезок S_{12} (ввиду малости surfela считаем его плоским), проекции которого s и s' на экраны $I, 2$ лежат на соответствующих эпиполярных линиях l и l' . Фиксируя длину s на 1-м изображении, осуществляем поиск s' на эпилинии l' с помощью кросскорреляционной методики сравнения двух растровых площадок-полосок вдоль s и s' , варьируя два параметра - положение центра s' и его длину (см. рис.3). В процессе корреляционного сравнения отбрасываются варианты с кросскорреляционной оценкой меньше заданного порога, из остальных в качестве решения выбирается отрезок s' с максимальной корреляционной оценкой. Длина s , а также ряд других параметров алгоритма являются настроечными и определяются автоматически из двух базовых характеристик сцены: расстояние между камерами; средняя глубина сцены и ее размер по глубине. Применительно к реализации оптического дальномера это означает, что на входе дальномера определяется слой сцены по глубине, для объектов которого необходимо выполнять 3D восстановление. Настройка параметров описана ниже. Зафиксировав в результате указанного поиска проекцию s' , путем простых геометрических вычислений (строим лучи из C и C' через концевые точки отрезков-проекций) определяем положение S_{12} . Заметим, что соотношение длин s и s' определяет ориентацию S_{12} по отношению к экранам. Теперь повторим описанную процедуру применительно к камерам $I, 3$. В результате получим отрезок S_{13} , который является пересечением новой эпиполярной плоскости с рассматриваемым surfel-ом. Два полученных отрезка S_{12} и S_{13} определяют плоскость surfel-a и позволяют вычислить нормаль к нему. Поскольку идентификация s' выполняется с некоторой ошибкой, отрезки S_{12} и S_{13} , как правило, не пересекаются в пространстве. Поэтому в качестве точки пересечения, и, соответственно, результирующей точки

центра surfel-a берется (если расстояние между отрезками не превышает заданного порога) средняя точка отрезка, соединяющего S_{12} и S_{13} . Известна и более точная процедура вычисления этой точки с проведением уточненной эпиполярной плоскости при минимизации суммарной репроекционной ошибки, но она и более затратная.

В реализации описанного алгоритма были применены несколько оптимизационных решений, направленных на сокращение вычислительных затрат. Во-первых, для кросскорреляционного сравнения использовался известный принцип очищенных изображений, который заключается в том, что оба рассматриваемых изображения проецируются на некоторую общую плоскость изображения, параллельную линии, соединяющей центры камер. Тогда обе эпиполярные линии l и l' проецируются на общую линию сканирования и вычисления упрощаются. Во-вторых, диапазон сканирования по эпилинии l' вычисляется исходя из задаваемой $\{min, max\}$ глубины сцены. Если рассматривается сцена без ограничений по глубине, то в качестве минимальной точки на l' берется проекция на l' положения экрана I на луче из C , а в качестве максимальной точки вычисляется точка, соответствующая бесконечному удалению по лучу. Еще одно ограничение вводится на диапазон вариации $k=s/s'$ из учета прикладного контекста. Входными параметрами к алгоритму являются: характерное, минимальное и максимальное расстояния до объектов - соответственно, R, R_{min}, R_{max} [см]; расстояние между камерами - d [см].

Настраиваемые параметры: погрешность вычисления расстояний (вычисляется из R, d и разрешения используемой камеры) - [см]; длина отрезка на 1-ом изображении - $=2f/R*c$ [пикс], где f - фокусное расстояние, c - число пикселей на см.; шаг центра отрезка по 2-й эпилинии = 1 [пикс]; диапазон длин отрезка на 2-й эпилинии - $[min, max]$ (вычисляется с учетом некоторых геометрических допущений) [пикс]; шаг вариации длины в пределах $[min, max]$ = 2 [пикс]; ширина полосы изображения для кросскорреляционного сравнения h = 7 [пикс]; пороговое расстояние между восстановленными точками S_{12} и S_{13} - $D = 15$ [см]; порог для кросскорреляционной оценки - $DV = 0.9$ (в диапазоне $[0-1]$);

Вторая часть алгоритма восстановления, названная выше вторым алгоритмом, направлена на плотное 3D восстановление соседних точек в окрестности затравочных. В его работе используется предположение о гладкости поверхности в окрестности затравочной точки. Реализуется оно с использованием гомографии при построении корреляционной площадки на втором изображении (гомографической плоскостью является плоскость surfel-a). В результате, соседние точки вычисляются существенно быстрее затравочных.

3.1 Результаты вычислительных экспериментов.

Работа основного алгоритма (восстановление затравочных точек) тестировалась на 3-х синтетических сценах, (см. рис. 4), с глубиной сцены (расстояние до ближних объектов сцены) от 1 м, от 5 м и от 10 м. Использовался компьютер AMD Athlon 64 3200+. Для ускорения работы алгоритма был опробован вариант с исключением предварительного этапа выделения "граничных" областей.

Оказалось, что и в этом случае алгоритм дает приемлемые результаты, что можно объяснить хорошей работой порогов.

При этом проверялись два варианта обработки сцены: а) $R_{max}=const$ (т.е. фиксируется слой по глубине сцены); б) $R_{max}=\infty$. В первом случае, естественно, время обработки несколько меньше. Результаты для варианта а) приведены в таблице 1.

| Сцена | R_{min} (м) | R (м) | R_{max} (м) | Найдено точек из 3400 | Общее время работы (сек) | Среднее отклонение (м) | Макс ошибка (м) |
|---------|---------------|---------|---------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| от 1 м | 0.8 | 1.5 | 5 | 543 | 45.78 | 0.002 | 0.023 |
| от 5 м | 2.4 | 7 | 12 | 1433 | 42.67 | 0.069 | 0.33 |
| от 10 м | 2.4 | 9 | 30 | 383 | 40.22 | 0.18 | 0.83 |

Таблица 1. Результаты работы алгоритма для 3-х сцен разной удаленности

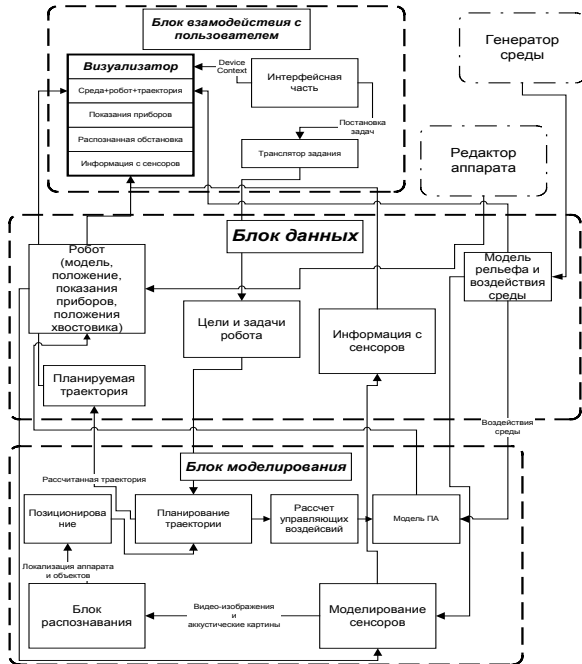


Рис. 1. Структура программного моделирующего комплекса

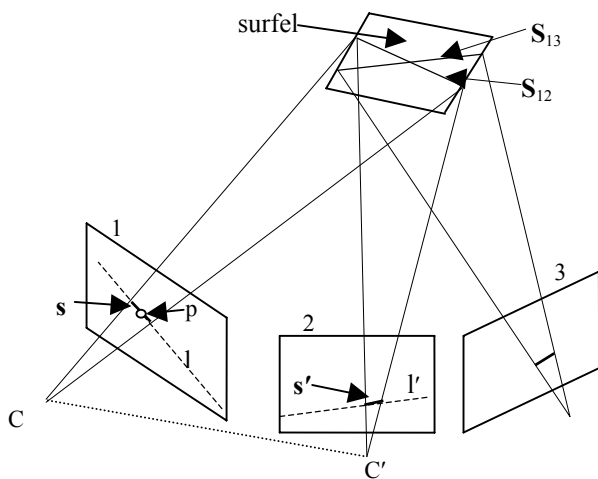


Рис. 2. Вычисление отрезков пересечения surfel-а с эпиллярными плоскостями $l, 2$ и $l, 3$

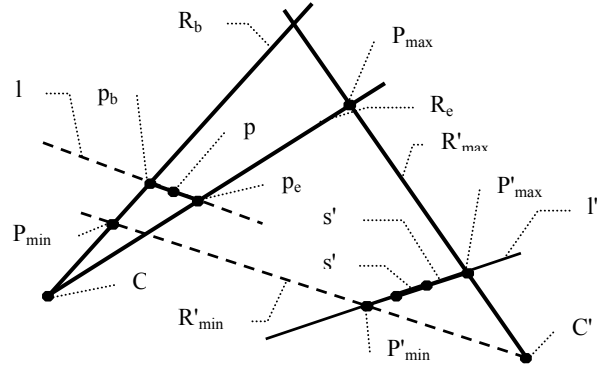


Рис. 3. Определение области поиска. Рисунок в эпиллярной плоскости. C, C' – центры 1-й и 2-й камер; l, l' – эпиллярные линии; p – исходная точка; p_b, p_e – начало и конец отрезка s ; R_b, R_e – лучи для p_b и p_e ; P_{min} – точка на R_b на расстоянии R_{min} ; P_{max} – точка на R_e на расстоянии R_{max} ; R'_{min}, R'_{max} – лучи из C' через P_{min} и P_{max} ; P'_{min}, P'_{max} – пересечение l' с R'_{min} и R'_{max} ; $s'r$ – область поиска; $s'r$ – найденный отрезок.

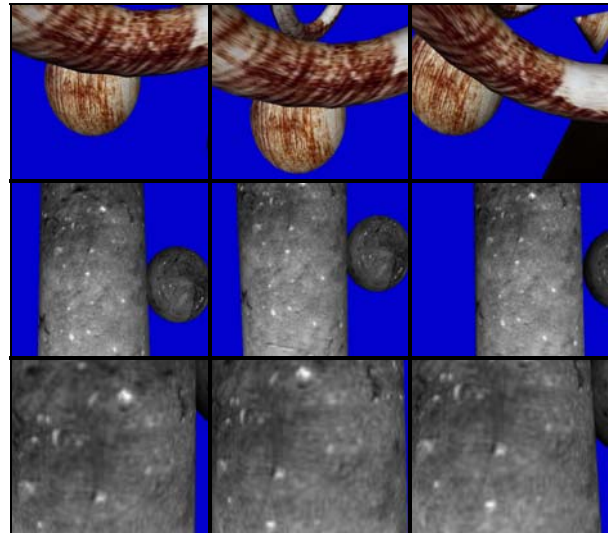


Рис. 4 Тестируемые сцены: а) от 10 м; б) от 5 м; в) от 1 м.

Для каждой сцены на вход алгоритма подается 3400 точек, задаваемых на 1-ом изображении. Расстояние между камерами 0.346 м . Алгоритм восстанавливает пространственные координаты только для части указанных точек. Точность вычисления пространственного положения точек находится в пределах потенциальной погрешности вычислений (см. настройка параметров). Ложных решений (т.е. точек с большой ошибкой координат) при правильной настройке параметров алгоритма практически не возникает за счет срабатывания порогов (D и DV). Однако вопрос автоматической настройки параметров пока окончательного решения не получил. Как видно из таблицы время, затрачиваемое на одну выходную точку – от 30 мс до 100 мс. Время обработки одной точки вторым алгоритмом (соседней к затравочной) в пределах 2 мс. Вычисления нормалей также дало ошибку в пределах от 5% до 20%.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В текущей версии моделирующего комплекса реализованы компоненты, обеспечивающие: а) генерацию виртуальной среды и редактирование характеристик АПА; б) визуализацию движения АПА по предварительно заданной траектории (с реализацией метода управления вектором тяги АПА); в) моделирование работы гидроакустических сонаров; г) метод решения задачи "восстановления движения и структуры" (метод с использованием фильтра Калмана + алгоритм восстановления 3D точек среды по изображениям калиброванной камеры). Последнее требует более всестороннего тестирования и оптимизации в контексте задачи планирования траекторий, для решения которой будет создаваться алгоритмическая база с учетом возможных миссий АПА. В том числе необходимо также более эффективное решение вопроса автоматической настройки параметров в алгоритме 3D восстановления точек среды.

5. БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Tuohy S. T., "A Simulation Model for AUV Navigation," *IEEE Oceanic Engineering Society Conference Autonomous Underwater Vehicles, Cambridge (USA), pp. 470-478, July 1994.*
- [2] D. Brutzman. *Virtual world visualization for an autonomous underwater vehicle. In Proceedings of the IEEE Oceanic Engineering Society Conference OCEANS 95, pages 1592-1600, San Diego, CA, October 1995.*
- [3] Borges de Sousa J. and Gill A. "A Simulation Environment For The Coordinated Operation Of Multiple Autonomous Underwater Vehicles", *Winter Simulation Conference, Atlanta (USA), pp. 1169-1175, December 1997.*
- [4] Bruzzone Ga., et al. "A Simulation Environment for Unmanned Underwater Vehicles Development", *MTS/IEEE Oceans 2001, Honolulu (USA), pp. 1066-1072, November 2001.*
- [5] C.G. Harris and J.M. Pike.. *3D positional integration from image sequences. In the Third Always Vision Conference, 1987, p. 147-151.*
- [6] N. Ayache. *Artificial vision for mobile robots. MIT Press, Cambridge, 1991.*
- [7] Z. Zhang and O. Faugeras. *3D dynamic Scene Analysis. Springer-Verlag, 1992.*
- [8] Okutami M. and Kanade T. *A multiple baseline stereo system. IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, 15(4), 1993, p. 353-363.*

Об авторах

Бобков Валерий Александрович - д.т.н, зав. лабораторией машинной графики Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Адрес: г. Владивосток, 690090, ул. Радио,5, ИАПУ.

Телефон: (4232)313776

E-mail: bobkov@iacp.dvo.ru

Борисов Юрий Сергеевич, аспирант, м.н.с. лаборатории машинной графики Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Адрес: Владивосток, 690090, ул. Радио, 5, ИАПУ

E-mail: borisoff@dvo.ru

Мельман Сергей Владимирович – аспирант, м.н.с. лаборатории машинной графики Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Адрес: г. Владивосток, 690090, ул. Радио,5, ИАПУ.

Телефон: (4232)313776

E-mail: gruzd@dvo.ru

Роншин Юрий Иванович - вед. инж.-программист лаборатории машинной графики Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Адрес: г. Владивосток, 690090, ул. Радио,5, ИАПУ.

Телефон: (4232)313776

E-mail: ronshin@iacp.dvo.ru

The simulation system for investigation of control methods of autonomous underwater vehicle

Abstract

The paper is devoted to creation of the simulation system for investigation of control methods with complex spatial movements of the autonomous underwater vehicle. The principle of a virtual reality and simulation of the basic systems of the vehicle is put in a basis of the system. The structure of the system and the scheme of its operation are described. The use of the optical information for the purposes of navigation was underlined. The model of a virtual optical range finder with use of a vehicle's trajectory correction method and algorithm of restoration of 3D points of the underwater environment are offered. The algorithm provides dense 3D covering with restoration of normal-vectors of surfaces from three consecutive calibrated images. Results of computing experiments for synthetic scenes of different depth are presented. The future works aimed to development of methods and algorithms AUV trajectories planning according to sonar and video data with taking its mission into account.

Keywords: *Virtual reality, autonomous underwater vehicle, modeling, visualizing, sonar, epipolar constraints, cross-correlation, 3D-reconstructions.*

About the authors

Valery Bobkov is a professor at Institute for Automation and Control Processes, Department of Computer Graphics. His contact email is: bobkov@iacp.dvo.ru

Yuriy Borisov is a junior research assistant and a Ph.D. student at Institute for Automation and Control Processes. His contact email is borisoff@dvo.ru

Sergey Melman is a Ph.D. student at IACP. His contact email is: gruzd@dvo.ru

Yurij Ronshin is an engineer at Institute for Automation and Control Processes, Department of Computer Graphics. His contact email is: ronshin@iacp.dvo.ru