

УДК 551.46.077:629.584

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНОГО РОБОТА

И.В. Бычков, Н.Н. Максимкин,
С.А. Ульянов, А.Е. Хмельнов,
П.Э. Андреев

Институт динамики систем и теории
управления СО РАН, Иркутск

В статье представлены результаты исследований, связанных с разработкой базы данных пространственных наблюдений (БДПН) для системы управления АНПА. База данных предназначена для сбора информации о состоянии внешней среды и ее последующего встраивания в систему управления. Рассматриваются следующие задачи:

- представление информации о рельефе с использованием триангуляции;
- поиск кратчайшего пути на триангуляции с учетом ограничений на допустимые для АНПА траектории;
- выбор порядка выполнения задач с учетом информации о внешней среде.

В рассматриваемых алгоритмах планирования используются оценочные функции, позволяющие учесть ограничение на допустимый дифферент при движении подводного аппарата и оценить степень пересеченности рельефа в неисследованных областях. Работа прототипа БДПН была протестирована в вычислительных экспериментах на модели АНПА, в ходе которых была показана возможность перепланирования миссии с учетом накопленной в БДПН информации.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко используются для изучения Мирового океана автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). Автономность и неопределенность среды предъявляют высокие требования к системе управления АНПА в части ее интеллектуализации [1, 2]. Целью данной работы является рассмотрение алгоритмов и структур данных, которые позволят организовать использование на борту подводного аппарата информации о состоянии внешней среды, о простран-

ственном расположении объектов, и в том числе информации, полученной ранее. Реализация таких функций памяти с возможностью обработки в текущем времени собранной ранее пространственной информации является необходимым условием для применения алгоритмов искусственного интеллекта, которые должны повысить автономность и эффективность исследовательских групп АНПА.

В качестве примера интеллектуального алгоритма рассматривается задача планирования и перепланирования последова-

тельности обхода целей с учетом информации о подводном рельефе и состоянии оборудования на борту АНПА. Представлены результаты моделирования для этой задачи, полученные на разработанном в ИДСТУ СО РАН имитаторе внешней среды подводного аппарата.

■ 1. Сбор и использование информации о внешней среде в ходе выполнения миссии

Задача сбора информации об окружающей среде при выполнении миссии широко представлена в публикациях по робототехнике. Для этой задачи существует устоявшийся англоязычный термин SLAM (Simultaneous Localization And Mapping – одновременное обнаружение и картографирование) [3, 4]. При этом в большинстве работ по SLAM рассматривается двумерная постановка задачи, например обследование помещения роботом на колесах в поисках некоторого объекта, в ходе которого формируется карта помещения, облегчающая дальнейший поиск (см. [5, 6]).

При решении задачи SLAM на борту АНПА необходимо учитывать физические ограничения функционирования АНПА, делающие эту задачу более сложной по сравнению как с вышеупомянутым двумерным случаем, так и трехмерным (при управлении летательным аппаратом). Особенности задачи SLAM для АНПА:

- задача является трехмерной, при этом большую часть времени аппарат может работать вблизи дна, что требует учета информации о рельефе;
- в водной среде, в отличие от воздушной, существенно ограничена область видимости и точность датчиков, позволяющих получать информацию о внешней среде. Например, эхолоты действуют на расстоянии

в несколько десятков метров; фото- и видеотехника – на расстоянии нескольких метров при условии включения освещения; радиосигналы не распространяются; гидролокаторы бокового (ГБО) и секторного обзора (ГСО) имеют ограничения по точности, дают только двумерные координаты откликов и могут содержать фантомные изображения, являющиеся следствием отражения сигнала;

- неточность в определении положения аппарата в пространстве, поскольку координаты аппарата получаются только в результате счисления;
- ограниченная пропускная способность каналов связи между АНПА и их оператором.

Таким образом, для решения задачи сбора и использования информации о внешней среде в ходе выполнения миссии АНПА необходимо разработать специальные структуры данных и соответствующие алгоритмы, позволяющие собирать информацию о рельефе и других характеристиках внешней среды с учетом неидеальности датчиков аппарата и надежно работать с большими объемами собранных данных в реальном времени.

■ 2. Представление пространственной информации о состоянии внешней среды

Для автоматического планирования действий подводного робота система управления должна использовать разнообразные имеющиеся сведения о внешней среде в районе работ:

- априорные и собираемые в ходе выполнения работ сведения о рельефе морского дна;
- сведения о состоянии различных физических полей;
- сведения о течениях, температуре, солености морской воды;
- сведения о расположении в пространстве точечных и про-

тяженных ориентиров (обнаруженных объектов, трубопроводов, кабелей).

Среди этой информации наиболее объемным массивом данных является информация о рельефе дна.

Для получения информации о районе работ могут использоваться различные источники:

- морские карты;
- обработанные результаты предшествующих миссий в этом районе;
- результаты текущей миссии.

Необходимо отметить, что при выполнении глубоководных работ морские карты будут содержать очень неточную информацию. Поэтому необходимо реализовать механизм использования информации морских карт таким образом, чтобы он допускал последующее уточнение по результатам сделанных наблюдений для тех районов, где такая информация была получена.

Для представления различного вида пространственной информации необходимо использовать соответствующие форматы:

- векторные карты могут использоваться для представления информации о положении подводных объектов, ориентиров, мест выполнения работ и т.д.;
- цифровая модель рельефа, представленная на регулярной сетке (Grid) может использоваться для хранения заранее подготовленных данных (см. далее). Этот же формат может быть использован для представления заранее подготовленных карт физических полей;
- цифровая модель рельефа на нерегулярной сетке (TIN – Triangular Irregular Network) позволяет постепенно уточнять модель в ходе выполнения миссии (см. далее), может включать информацию о точности координат точек. На не-

регулярной сетке также может быть представлена информация о значениях физических полей, измеряемых в ходе выполнения миссии.

То есть для представления информации о подводном рельефе и состоянии физических полей могут использоваться как регулярные, так и нерегулярные сетки. Для выбора подходящего представления необходимо учитывать преимущества и недостатки от использования каждой из структур данных.

Преимущества нерегулярных сеток:

- позволяют работать с данными, собранными с переменным разрешением;
- интерполируют информацию на необследованные участки;
- содержат сведения о степени исследованности участков местности (можно судить о степени исследованности по размерам треугольников);
- поддерживают быстрое добавление новой информации.

Таким образом, структура данных, основанная на использовании нерегулярных сеток, позволяет организовать сбор и использование информации в ходе выполнения миссии.

Преимущества регулярных сеток:

- не требуют явного хранения координат точек (координаты каждой точки задаются ее местом в массиве, хранится только высота);
- данные могут быть эффективно сжаты, что обеспечивает компактность при равномерном заполнении;
- быстрое извлечение информации о высоте в заданной точке;
- позволяют представить результаты более сложных нелинейных алгоритмов интерполяции, чем линейная интерполяция, применяемая на триангуляции.

Таким образом, регулярные сетки хорошо подходят для представления уже обработанной информации и в том числе могут быть использованы для результатов обработки информации, собранной в ходе выполнения предыдущей миссии.

■ 3. Сбор и использование информации о рельефе

Анализ предыдущей главы показывает, что для представления информации о рельефе, собираемой при выполнении миссии, лучше подходят нерегулярные сетки (TIN). Для работы с этой структурой данных в ИДСТУ СО РАН реализованы программные модули, обеспечивающие высокую эффективность их обработки и хранения.

Разработанная библиотека для построения триангуляций обладает следующими особенностями:

- используется алгоритм триангуляции с динамическим кэшированием, обеспечивающий при равномерном пространственном распределении точек генерацию триангуляции за линейное по числу этих точек время, т.е. на добавление одной точки в среднем расходуется постоянное время [7];
- в алгоритме используются робастные предикаты ("против часовой" и "в круге") [8], что препятствует возникновению ошибок, связанных с округлением координат. При этом координаты точек представлены действительными числами, а вычисления предикатов выполняются с необходимой точностью (которая может превышать точность одного действительного числа);
- допускается добавление точек в произвольном порядке;
- реализовано удаление точек, что может использоваться, например, для уточнения информации (могут удаляться менее точные данные при появлении

в их окрестности, размер которой определяется сведениями о точности измерения, более точных);

- реализовано построение триангуляции с ограничениями, при котором некоторые ребра включаются в триангуляцию, независимо от того, нарушается ли при этом условие Делоне – эта возможность может потребоваться, например, чтобы связать ребрами отсчеты, получаемые последовательно вдоль траектории.

В ходе планирования, выполнения и перепланирования миссии модель рельефа должна решать следующие задачи:

- сбор информации о рельефе от датчиков аппарата;
- оценка стоимости (трудоемкости) пути между двумя точками;
- поиск наилучшего пути между двумя точками (для выбора направления движения).

В первую очередь информацию о рельефе предполагается получать от установленных на борту АНПА эхолотаторов. В зависимости от конфигурации на борту АНПА может быть установлено несколько эхолотаторов с фиксированными диаграммами направленности [1] либо многолучевая эхолотационная система. Данные эхолотационной системы используются для построения триангуляционной модели рельефа.

Оценки стоимости перехода между двумя точками с учетом информации о рельефе требуются для работы алгоритмов планирования (стратегический уровень управления). Изменение этих оценок в результате корректировки модели рельефа может служить причиной запуска процесса перепланирования.

Построенная модель рельефа может использоваться и на тактическом уровне управления для выбора текущего направления движения. В этом случае определяется наилуч-

ший путь до конечной точки с учетом имеющихся сведений о рельефе, после чего в качестве направления движения используется направление вдоль найденной траектории, пока ожидаемый вдоль этого направления рельеф не начнет существенно противоречить наблюдаемым данным. Таким образом, корректировка модели рельефа может приводить к изменению направления движения к той цели, которая была выбрана стратегическим уровнем планирования.

■ 4. База данных пространственных наблюдений (БДПН)

С использованием программного модуля для построения и обработки триангуляции Делоне в ИДСТУ СО РАН разработан прототип подсистемы для представления пространственных наблюдений в системе управления модели АНПА (БДПН). БДПН предназначена для сбора информации, замеряемой в различных точках траектории АНПА, и выборки этой информации по заданным координатам (при запросе информации в точках, отличных от тех, которые были занесены в БДПН, здесь используется интерполяция).

Текущая версия БДПН разработана в предположении о точной пространственной привязке всей собираемой информации. Реализация БДПН делает возможным непосредственное использование информации, собираемой на борту в ходе выполнения миссии. Применение БДПН для оценки стоимости перехода между двумя точками позволяет учесть накопленную информацию при перепланировании миссии АНПА. Заметим, что без учета накопленной информации сама постановка задачи о перепланировании не имеет

смысла, поскольку для того, чтобы появилась потребность в изменении плана действий, необходим какой-либо механизм изменения представлений о внешней среде.

На рис. 1 показана схема, иллюстрирующая использование БДПН в системе управления АНПА. После получения информации о текущей задаче блок тактического планирования вырабатывает текущий план ее выполнения, используя информацию из БДПН о состоянии внешней среды. В результате блок исполнения получает команды на движение в определенном направлении и выполнение других операций, например фотосъемки. В ходе своей работы блок исполнения использует информацию от датчиков. Кроме того, часть полученной от датчиков информации используется для пополнения и корректировки БДПН. При этом наблюдаемые результаты сравниваются с ожидаемыми (которые использовались при планировании). В случае существенного расхождения происходит прерывание, вызывающее перепланирование.

■ 5. Задача поиска плана перехода над триангуляцией

При стратегическом планировании (миссии в целом) и тактическом планировании (выборе направления движения) необходимо решать задачу поиска кратчайшего пути между двумя точками с учетом информации о подводном рельефе.

Задача выбора пути широко представлена в литературе (см., например, [1, 9–14]. В данной главе будут рассмотрены предположения и подходы, использованные для решения этой задачи в БДПН.

При решении задачи поиска пути для АНПА следует учитывать ограничение на дифферент, с которым может двигаться аппарат: по модулю он не должен превышать α_{\max} из-за остойчивости корпуса аппарата. Также предполагается, что угол дифферента должен совпадать с углом наклона траектории, поскольку движение с нарушением этого требования приводит к большим затратам энергии. С учетом сделанных предположений для оценки стоимости

перехода из точки a в точку b (без обхода препятствий) используется функция:

$$D(a,b) = \begin{cases} |a,b|, & \alpha \leq \alpha_{\max} \\ |a_z - b_z| / \sin(\alpha_{\max}), & \alpha > \alpha_{\max} \end{cases}$$

Таким образом, в алгоритмах планирования, с одной стороны, не используются точные уравнения динамики АНПА, но, с другой стороны, применяется функция расстояния, которая отличается от евклидовой.

Можно выделить два варианта постановки задачи поиска кратчайшего пути с учетом рельефа: движение по эквидистанте и движение, ограниченное рельефом. Все рассматриваемые в статье исследования проводились для первой из этих постановок.

■ 6. Модуль поиска кратчайшего пути на триангуляции

Для решения вспомогательной задачи поиска пути между двумя точками на триангуляции реализован программный модуль, решающий эту задачу с использованием алгоритма типа A*. Помимо вершин триангуляции алгоритм рассматривает вспомогательные точки, расположенные на ребрах треугольников, полученные разбиением ребер на короткие отрезки с заданным шагом. Рассматриваются траектории, состоящие из отрезков, вершинами которых могут являться: начальная и конечная точки (вершины триангуляции) и расположенные на ребрах вспомогательные точки. Каждый отрезок траектории проходит по одному треугольнику, и для определения расстояния вдоль этого отрезка используются свойства треугольника. Например, при использовании расстояния, учитывающего

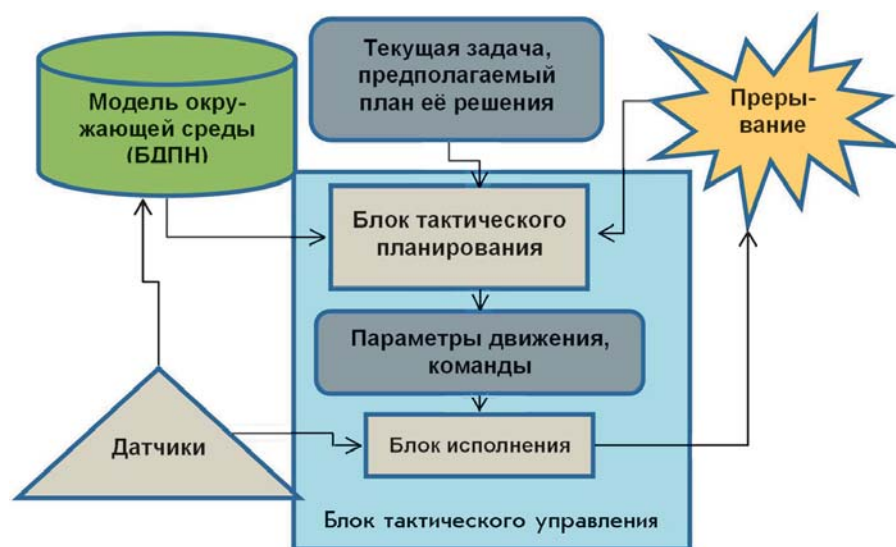


Рис. 1. Блок тактического управления

ограничения по дифференту, расстояние зависит от угла наклона отрезка, т.е. угла между отрезком и горизонтальной плоскостью.

На рис. 2, 3 приведены некоторые результаты работы программы, предназначенной для тестирования алгоритма (синим обозначены точки,

рассмотренные при поиске, красным – найденная траектория). Видно, что наиболее сложной из рассмотренных оказалась задача обхода препятствия, представленная на рис. 4, поскольку в этом случае между собой конкурировали два возможных направления обхода.

■ 7. Вычислительный эксперимент на модели внешней среды

С использованием разработанной в ИДСТУ СО РАН модели внешней среды подводного аппарата (программный комплекс UWEM) были выполнены вычислительные эксперименты, демонстрирующие изменение плана обхода целевых точек в результате обнаружения препятствия.

В эксперименте были использованы: модель окружающей среды, кинематическая модель подводного аппарата и система логического планирования действий, разработанных ранее.

В ходе рассматриваемого эксперимента использовалась схема расположения областей выполнения задач, представленная на рис. 5.

Положение и вес целевых областей выбраны таким образом, чтобы первоначальный план, построенный без учета дополнительной информации о внешней среде, ставил задачу первоочередного достижения цели № 1. При этом между местом расположения аппарата и этой целью имеется препятствие (рис. 6). На этом рисунке изображение (б) ориентировано так же, как на рис. 5, а изображение (а) получено при съемке справа относительно рис. 5.

После выбора плана действий аппарат начинает движение к цели № 1. В ходе движения информация от датчиков (в качестве которых в эксперименте выступает упрощенная модель эхолота) собирается в модели рельефа. На рис. 7 и рис. 8 показана модель рельефа, полученная после завершения эксперимента. После того как в модели рельефа собирается информация, позволяющая оценить величину препятствия,

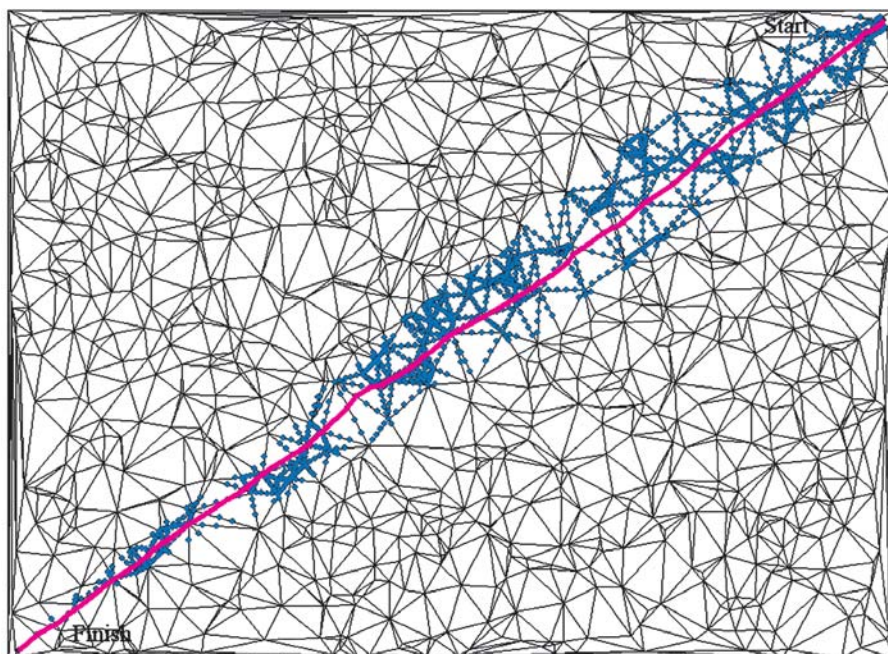


Рис. 2. Поиск пути на ровной местности

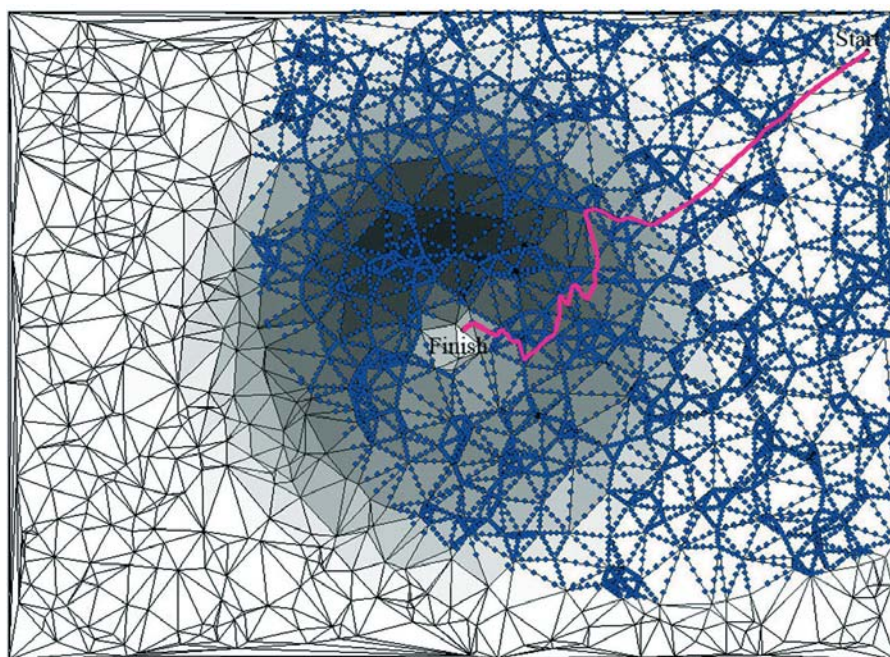


Рис. 3. Подъем на возвышенность

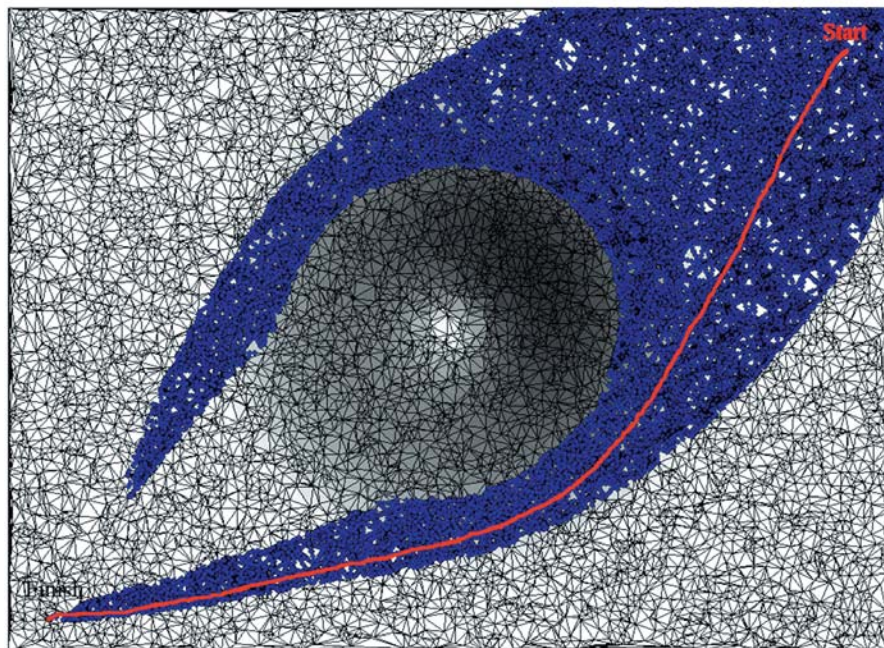


Рис. 4. Обход возвышенности

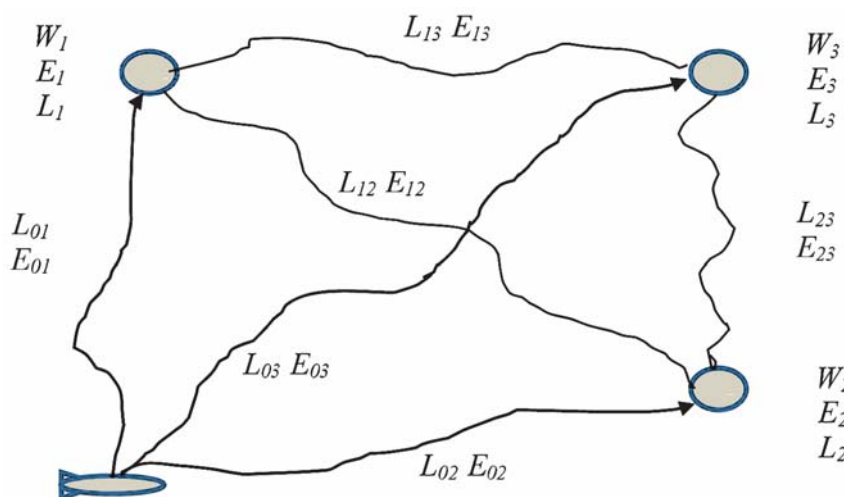
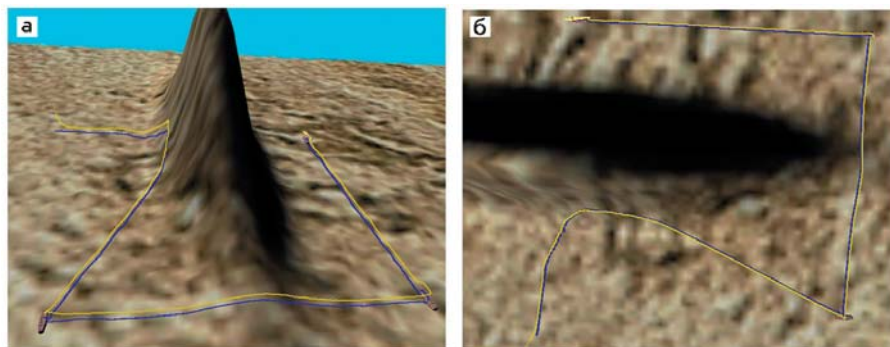
Рис. 5. Схема расположения областей выполнения задач: W_i – “вес” (ценность) задачи, E_i – энергозатраты на выполнение задачи, E_{ij} – энергозатраты на переход $i \rightarrow j$, L_i – время выполнения задачи, L_{ij} – время перехода $i \rightarrow j$ 

Рис. 6. Пример траектории с изменением плана (а – вид сбоку, б – вид сверху). Желтым цветом показана траектория аппарата, синим – ее проекция на дно. Для обозначения целевых точек в эти места помещены объекты (бочки)

оценка стоимости перехода к цели № 1 меняется настолько, что она начинает существенно отличаться от использовавшейся при выборе плана. В этот момент возникает прерывание и включается процесс перепланирования. В результате система планирования с учетом новых оценок стоимости перехода выбирает новый план, по которому следует в первую очередь перейти к цели № 2.

Выполненный на модели эксперимент позволил обнаружить ряд особенностей рассматриваемой задачи, которые необходимо учесть для того, чтобы БДПН можно было использовать на практике. Так, эксперимент продемонстрировал важность учета степени изученности фрагментов рельефа. На рис. 7 видно, что, поскольку аппарат прекратил движение в гору, полученная модель рельефа не содержит всесторонних сведений об этом препятствии. При этом в модели сделаны слишком «оптимистичные» предположения о том, что в необследованной области препятствие сразу заканчивается. Поэтому алгоритм планирования иногда продолжает пытаться преодолеть препятствие, «расчитывая», что в неисследованной области оно сразу закончится. Таким образом, необходима разработка алгоритмов поиска наилучшей траектории, которые используют триангуляцию не только для интерполяции значений высот, но и для оценки вида рельефа на неисследованной территории.

8. Оценка стоимости перехода над рельефом «по Фонгу»

Для того чтобы получить более близкую к действительности оценку стоимости перехода, предлагается использовать

метод, который, по аналогии с моделью освещения Фонга, используемой в трехмерной графике, будем называть оценкой расстояния по Фонгу. Согласно методу построения модели освещения Фонга в вершинах треугольника определяются векторы нормалей к поверхности, после чего вектор нормали в любой точке поверхности, расположенной на этом треугольнике, определяется путем линейной интерполяции векторов нормалей вершин треугольника (рис. 9).

В компьютерной графике с помощью нормали в точке определяется освещенность этой точки. Сама форма поверхности при этом не изменяется (поверхность остается многогранником), но плавное изменение нормали от точки к точке позволяет получить значительно более реалистичное изображение, которое воспринимается как изображение гладкого объекта.

В предлагаемом подходе подобный метод будем использовать для оценивания расстояния по поверхности. При этом мы так же, как и в трехмерной графике, не изменяем саму поверхность, а лишь пересчитываем стоимость прохождения единицы длины для каждой точки с учетом интерполированного значения нормали в этой точке.

Таким образом, в БДПН необходимо рассчитать нормали к поверхности в вершинах триангуляции. При этом используются нормали треугольников, которые построены на данной вершине:

$$\vec{n}(v) = \sum_{t \in T(v)} w(t, v) \vec{n}(t),$$

где $T(v)$ – множество треугольников с вершиной v ; $n(t)$ – нормаль треугольника; $w(t, v)$ – вес треугольника для вершины v .

Вес треугольника может быть использован для того, чтобы отразить степень его изучен-

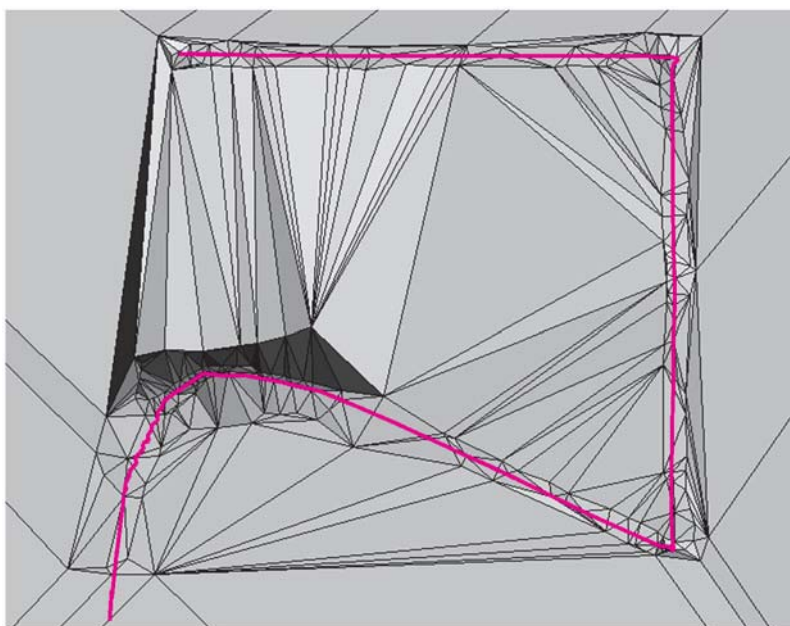


Рис. 7. Полученная в ходе выполнения эксперимента модель рельефа (красной линией обозначена траектория движения аппарата)

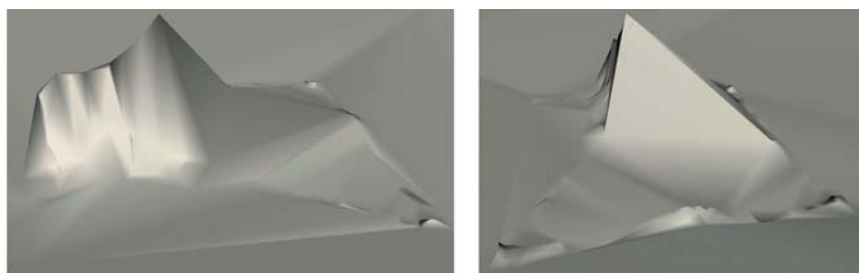


Рис. 8. Полученная модель рельефа в 3D

ности с тем, чтобы при вычислении нормали в вершине более мелкие треугольники вносили более существенный вклад.

Все предлагаемые алгоритмы будут построены для оценивания расстояния вдоль отрезка прямой. Поэтому возможно, что с учетом нелинейности используемых функций эти алгоритмы будут давать оценки

расстояний, слегка превышающие результат минимизации интеграла скорректированного расстояния вдоль траектории, поскольку минимум может достигаться на криволинейной траектории.

Рассмотрим некоторый отрезок d в треугольнике t , имеющий длину L (рис. 10). При движении в направлении отрезка важен наклон поверхности в вертикальной плоскости, в которой расположен отрезок, поэтому для оценки расстояния будем также использовать проекцию интерполированного вектора нормали на вертикальную плоскость. Перейдем в систему координат в вертикальной плоскости, связанной с отрезком, установив начало координат по

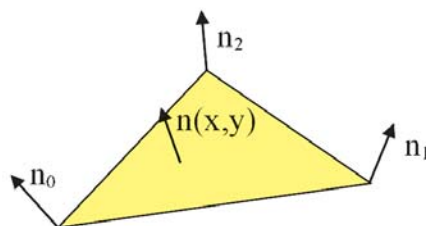


Рис. 9. Линейная интерполяция нормали в методе Фонга

оси X в начало отрезка. При этом L – длина проекции отрезка на ось OX .

Обозначим $t = x/L$. Для определения вектора $n(t)$ нормали в вертикальной плоскости в точке t сначала вычислим единичные векторы нормалей в вертикальной плоскости n_0 и n_1 для начальной и конечной точек отрезка, тогда

$$\vec{n}(t) = \vec{n}_0 + (\vec{n}_1 - \vec{n}_0) \cdot t$$

(вектор $n(t)$ не нормирован).

Коэффициент увеличения длины в точке $k(t)$ определим как

$$k(t) = \frac{1}{|\cos(\vec{n}(t), \vec{b})|} = \frac{|\vec{n}(t)|}{|(\vec{n}(t), \vec{b})|},$$

т.е. считаем, что любые различия между нормалью к отрезку b и нормалью к поверхности $n(t)$ означают, что поверхность проходит под углом к отрезку, поэтому для получения длины участка пути по поверхности длину участка пути по отрезку необходимо поделить на косинус угла между нормальями.

При этом

$$\vec{n}^2(t) = 1 - 2(1 - (\vec{n}_0, \vec{n}_1))t(1-t) = 1 - Kt(1-t),$$

$$(\vec{n}(t), \vec{b}) = (\vec{n}_0, \vec{b}) + ((\vec{n}_1, \vec{b}) - (\vec{n}_0, \vec{b}))t = b + (a-b)t,$$

где

$$K = 2(1 - (\vec{n}_0, \vec{n}_1)), \quad 0 \leq K \leq 4, \\ a = (\vec{n}_0, \vec{b}), \quad b = (\vec{n}_1, \vec{b}).$$

Таким образом, среднее увеличение длины отрезка с учетом интерполяции нормалей можно определить как

$$M(a, b, K) = \int_0^1 \frac{\sqrt{1 - Kt(1-t)}}{(a-b)t + b} dt = \\ = \int_{-0,5}^{0,5} \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{4}K + Kt^2}}{(a-b)t + \frac{1}{2}(a+b)} dt.$$

Интеграл для M может быть вычислен аналитически:

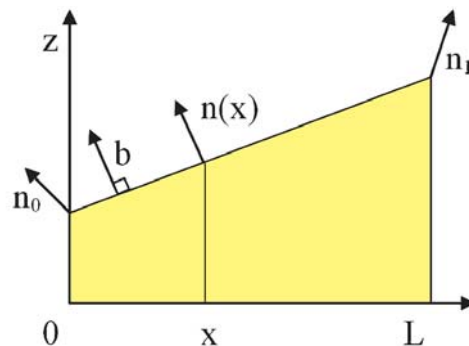
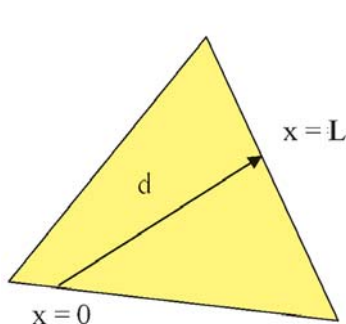


Рис. 10. Отрезок в треугольнике и его вид в вертикальной плоскости

$$M(a, b, K) =$$

$$= \left(\sqrt{\frac{K}{4-K} + \frac{(a-b)^2}{(a+b)^2}} \ln \left(\left(\sqrt{\frac{4}{4-K} + \frac{K}{4-K} + \frac{(a-b)^2}{(a+b)^2}} \right) / \sqrt{1 - \frac{(a-b)^2}{(a+b)^2}} \right) - \sqrt{\frac{K}{4-K}} \ln \left(\sqrt{\frac{4}{4-K} + \frac{K}{4-K}} \right) \right) \frac{(a+b)\sqrt{4-K}}{(a-b)^2}.$$

Заметим, что величину K можно выразить через a и b с точностью до знака:

$$K = 2 \left(1 - ab \pm \sqrt{(1-a^2)(1-b^2)} \right).$$

Знак в формуле определяется знаками проекций векторов \vec{n}_1 и \vec{n}_0 на отрезок d : если эти знаки отличаются, то «+», иначе «-».

Таким образом, предложенное расстояние «по Фонгу» можно использовать в алгоритмах поиска кратчайшего пути для прогнозирования рельефа на плохо исследованных участках. Так, в рассмотрен-

ном примере (рис. 8) стоимость перехода по большим треугольникам возрастет за счет того, что углы между нормальями к поверхности в их вершинах и нормалью самого треугольника будут велики (что и человека заставляет предположить о продолжении препятствия в неисследованной области).

Заметим, что предложенное расстояние целесообразно применять только для больших треугольников, для более мелких можно использовать евклидово расстояние и расстояние с учетом ограничения по дифференту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена реализация некоторых программных модулей в модели базы данных пространственных наблюдений АНПА. Приведены результаты вычислительных экспериментов, выполненных с использованием модуля поиска кратчайшего расстояния на триангуляции и модели внешней среды АНПА. Проведенный вычислительный эксперимент продемонстрировал работу системы перепланирования при появлении новых данных.

С учетом выявленной в ходе выполнения эксперимента необходимости в более точном оценивании рельефа в неисследованных областях предложен способ учета особенностей рельефа с использованием расстояния «по Фонгу».

Первоочередным направлением дальнейших исследований в рассматриваемом проекте является объединение всех предложенных механизмов в единый комплекс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 400 с.
2. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В. Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 1. С. 6–17.
3. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous Localization and Mapping: Part I // IEEE Robotics & Automation Magazine. June, 2006. P. 99–108.
4. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous Localization and Mapping: Part II // IEEE Robotics & Automation Magazine. Sept., 2006. P. 108–117
5. Choset H., Nagatani K. Topological Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Toward Exact Localization Without Explicit Localization // IEEE Transactions on Robotics and Automation. April, 2001. V. 17, N 2. P. 125–137.
6. Wesley Huang K. Complete Topological Mapping with Sparse Sensing. – <http://citeseer.ist.psu.edu/750927.html>
7. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002.
8. Shewchuk J.R. Adaptive Precision Floating-Point Arithmetic and Fast Robust Predicates for Computational Geometry. – <http://www.cs.cmu.edu/~quake/robust.html>
9. Инзарцев А.В. Исследование и разработка программной среды системы управления автономного необитаемого подводного аппарата: дис. ... канд. техн. наук / ИАПУ ДВО РАН. 06.11.1999.
10. Кирильченко А.А., Зуева Е.Ю., Платонов А.К., Соколов С.М. Формальные подходы к проектированию алгоритмов информационного обеспечения мобильных систем (выбор пути, навигация, надежность). Препр. М.: Ин-т прикл. матем. им. М.В. Келдыша РАН, 2008. 32 с.
11. Платонов А.К., Кирильченко А.А., Колганов М.А. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы. Препр. М.: Ин-т прикл. матем. им. М.В. Келдыша РАН, 2001. № 40. 32 с.
12. Барбашова Т.Ф., Кирильченко А.А., Колганов М.А. Некоторые аспекты использования метода потенциалов при управлении мобильными роботами. Препр. М.: Ин-т прикл. матем. им. М.В. Келдыша РАН, 2004. № 21. 26 с.
13. Кирильченко А.А., Платонов А.К., Соколов С.М. Теоретические аспекты организации интерпретирующей навигации мобильного робота. Препр. М.: Ин-т прикл. матем. им. М.В. Келдыша РАН, 2002. № 5. 40 с.
14. Платонов А.К., Зуева Е.Ю., Кирильченко А.А., Соколов С.М. Логический подход к проектированию алгоритмов информационного обеспечения мобильных систем. 1. Основные понятия. Препр. М.: Ин-т прикл. матем. им. М.В. Келдыша РАН, 2006. 34 с.

