

СИСТЕМА НАВИГАЦИИ АНПА, ОСНОВАННАЯ НА РАСПОЗНАВАНИИ ИСКУССТВЕННЫХ МАРКЕРОВ НА АКУСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

А.И. Боровик

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Рассматривается навигационная задача, решение которой состоит в повышении точности определения координат автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) путем детектирования размещенных на дне объектов на гидролокационных изображениях. В качестве распознаваемых объектов используются специально спроектированные маркеры с заданными технологическими характеристиками. Алгоритмы размещения маркеров в рабочей акватории и движения аппарата обеспечивают гарантированное обнаружение маркеров гидролокаторами бокового или секторного обзора. Навигационный алгоритм интегрирован в систему управления АНПА и работает в режиме реального времени.

■ Постановка задачи

В настоящее время появляется все больше задач, для решения которых используются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). Одной из главных проблем при использовании подводных роботов является обеспечение эффективной навигации при продолжительном времени работы, когда накопленная ошибка бортовой навигационной системы (БНС) выходит за допустимые границы точности [1, 2]. Для решения данной проблемы обычно используются гидроакустические навигационные системы с длинной или ультракороткой базой (ГАНС ДБ, ГАНС УКБ), принцип действия которых, достоинства и недостатки детально описаны в указанных работах.

В данной работе предложен метод решения задачи навигации АНПА, основанный на размещении в районе работ заранее изготовленных пассивных маркеров с их дальнейшей фиксацией на акустических изображениях. В качестве подобных пассивных маркеров предлагается использовать дешевые невозвратные металлические конструкции, спускаемые в воду в заранее определенных точках рабочей зоны. При необходимости позиция маркеров после постановки на грунт может быть уточнена, например, с использованием возвращаемого акустического пингера. Предложенный метод уточнения навигации может быть применен в задачах патрулирования конкретной акватории, при работах на полигоне, при навигации АНПА на дальние и сверхдальние дистанции, а также для решения задачи обследования местности в

случае, когда использование других методов затруднено или невозможно по каким-либо соображениям.

Рассмотрим задачу уточнения координат АНПА, работающего на некотором расстоянии от дна и использующего бортовую навигационную систему, погрешность которой оценивается как $p\%$ от пройденного пути. Требуется обеспечить навигацию аппарата в определенной зоне работ с заданной точностью m метров. Во время выполнения миссии исходя из поставленной задачи необходимо вносить поправки в работу БНС каждые $s = \frac{100 \times m}{p}$ метров пути. Кроме того,

необходимо предусмотреть механизм прецизионного определения начальных координат, в особенности если работа происходит на большой глубине. Механизм определения точных координат также может потребоваться каждые s метров пути, если реальная погрешность работы БНС окажется выше оценочной.

Для определения координат АНПА с помощью размещенных на дне пассивных маркеров разработан алгоритм распознавания изображений, поступающих в режиме реального времени от гидролокаторов бокового или секторного обзора (ГБО, ГСО). Маркеры размещаются в акватории так, чтобы обеспечить их захват фиксирующей аппаратурой с частотой, соответствующей необходимости внесения навигационных поправок, т.е. каждые s метров пути. Предусматриваются несколько вариантов конструк-

¹ 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: +7 (423) 243-25-78.
E-mail: alexeyborovick@ya.ru

ции невозвращаемых маркеров, акустические изображения которых отличаются друг от друга. Таким образом, рассматриваемая задача для данного метода решения включает следующие подзадачи:

- выбор формы, материала и габаритов маркеров;
- описание алгоритма размещения маркеров в рабочей акватории, обеспечивающего внесение поправок в работу ИНС с нужной частотой;
- выбор алгоритма движения аппарата в режиме уточнения координат;
- выбор алгоритма распознавания образов, его подстройка под решение конкретной задачи и обучение на реальных данных;
- создание навигационного алгоритма, вырабатывающего поправки для ИНС на основе отчета алгоритма распознавания.

■ Варианты решения подзадач

Проектирование маркеров

Исходя из постановки задачи маркеры должны обладать следующими характеристиками:

- форма и материал маркеров, выполненных в нескольких вариантах, должны обеспечивать их уверенное распознавание в автоматическом режиме на акустическом изображении;
- маркеры должны сохранять свои свойства после продолжительного времени нахождения под водой для обеспечения возможности их повторного использования;
- маркеры должны быть максимально дешевыми в производстве.

Как показывает практика использования маркеров, наиболее хорошо распознаются на акустических изображениях уголкового отражателя.

Алгоритм размещения маркеров

Требуется разместить маркеры так, чтобы обеспечить их гарантированный захват фиксирующей аппаратурой каждые s метров пути аппарата и минимизировать их количество. В качестве фиксирующей аппаратуры в рассматриваемой задаче используются акустические средства: ГСО или ГБО. Важными для задачи параметрами являются ширина полосы съемки, мертвая зона прибора d и радиус разворота аппарата r , измеряемые в метрах. Алгоритм должен гарантировать, что через s метров пути маркер будет находиться на планируемой траектории аппарата и при этом не попадать в мертвую зону d . Для удовлетворения этому требованию маркеры должны размещаться сбоку от планируемой траектории движения,

на расстоянии от центра d метров, через каждые s' метров пути, где:

$$s' = \frac{100 \times \min \left[\frac{w}{2} - d; m \right]}{p}, s' \leq s.$$

Траектория АНПА в относительных координатах состоит из отдельных отрезков вида $[(x_{0n}; y_{0n}); (x_{1n}; y_{1n})]$ на плоскости $xу$. Длина каждого отрезка (галса) l_n :

$$l_n = \sqrt{(x_{1n} - x_{0n})^2 + (y_{1n} - y_{0n})^2}. \text{ Пусть } S_n = \sum_{i=1}^n l_i - \text{совокупность длин всех отрезков траектории до } n \text{ включительно, } M_n - \text{число маркеров, размещенных на отрезках траектории до } n \text{ включительно, } E_n - \text{общая накопленная к окончанию отрезка } n \text{ разница в метрах, учитывающая неравномерность размещения маркеров. В этом случае на отрезке необходимо разместить}$$

$$M_{s_n} = \left\lfloor \frac{S_n - (M_{n-1} \times s' - E_{n-1})}{s'} \right\rfloor \text{ маркеров, } M_n = M_{n-1} + M_{s_n}.$$

Первый маркер на отрезке n будет размещен на расстоянии

$$mpos_{n_1} = l_n - (S_n - ((M_{n-1} + 1) \times s' - E_{n-1}))$$

от точки $(x_{0n}; y_{0n})$, последующие (если их на траектории помещается несколько) – на расстояниях

$$mpos_{n_{i \in [2; M_{s_n}]}} = mpos_{n_{i-1}} + s'. \text{ Координаты каждого маркера на отрезке } n \text{ для случая } x_{1n} \neq x_{0n} \ \& \ y_{1n} \neq y_{0n} \text{ вычисляются из отношения:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{mn_i} = \frac{mpos_{n_i}}{\sqrt{1 + \frac{(y_{1n} - y_{0n})^2}{(x_{1n} - x_{0n})^2}}} + x_{0n}; \\ y_{mn_i} = \frac{mpos_{n_i}}{(x_{1n} - x_{0n})} \times (y_{1n} - y_{0n}) + y_{0n} \end{array} \right.$$

Для случая $x_{1n} = x_{0n}$, очевидно, $x_{mn_i} = x_{0n}, y_{mn_i} = mpos_{n_i}$, а для случая $y_{1n} = y_{0n}$: $y_{mn_i} = y_{0n}, x_{mn_i} = mpos_{n_i}$. При этом все позиции маркеров должны находиться на расстоянии не менее r до ближайшего разворота. В случае, если точка $i: (x_{mn_i}; y_{mn_i})$ оказывается в зоне разворота, необходимо вместо нее выбрать точку $i': (x'_{mn_i}; y'_{mn_i})$. Если $mpos_{n_i} \leq r$, то в качестве точки i' выбирается точка, находящаяся на отрезке $n - 1$ на расстоянии $r + 1$ до точки конца отрезка $(x_{1n-1}; y_{1n-1})$. Данная точка находится на траекторном расстоянии $j_n = r + 1 + mpos_{n_i}$ до оригинальной точки i . В случае, если $l_n - mpos_{n_i} \leq r$, в качестве точки i' выбирается точка, находящаяся

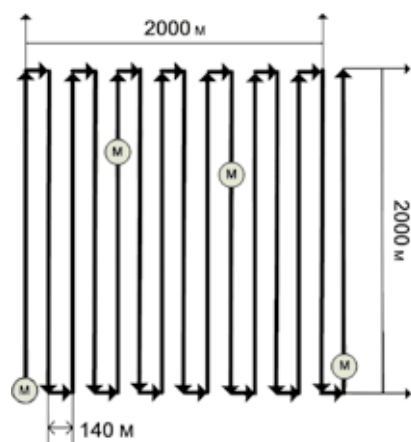
на расстоянии $j_n = r - (l_n - mpos_{n_i}) + 1$ до точки i . В случае использования альтернативной точки размещения маркера накопленную разницу расстояний необходимо учесть: $E_n = E_{n-1} + j_n$.

Рассмотрим несколько примеров:

1. Рассмотрим задачу патрулирования акватории размером 2×2 км с использованием ГБО, имеющего ширину полосы съемки $w = 160$ м (по 80 м на борт) с мертвой зоной $d = 7$ м. Пусть погрешность БНС составляет $p = 0,1\%$ от пройденного пути, при этом требуется обеспечить точность привязки ГБО-изображений к реальным координатам $m = 10$ м. Для съемки ГБО с 10%-ным перекрытием ширины полосы в качестве траектории движения выбран меандр с междугалсовым расстоянием 140 м. Пусть радиус разворота АНПА $r = 10$ м. Исходя из условий задачи получим, что маркеры должны быть размещены через каждые s' метров, где:

$$s' = \frac{100 \times \min \left[\frac{160}{2} - 7; 10 \right]}{0,1} = 10000 \text{ м.}$$

Общая длина выбранной траектории составляет $15 \times 2000 + 14 \times 140$ м, или около 32 км. Для решения задачи потребуется 3 маркера, размещение которых показано на рисунке.



Размещение маркеров на траектории

пути (подобной погрешностью обладает, например, Phins 6000 при использовании совместно с доплеровским лагом Teledyne DVL Pioneer при движении по прямой [3]). Для уточнения навигации будем использовать ГБО с полосой съемки 200 м (по 100 м на борт) и мертвой зоной $d = 10$ м. Исходя из условий задачи получим, что маркеры должны быть размещены каждые s' метров траектории, где:

$$s' = \frac{100 \times \min \left[\frac{200}{2} - 10; 100 \right]}{0,05} = 180000 \text{ м.}$$

Для решения задачи, таким образом, потребуется 27 маркеров. При прохождении от одного маркера до другого АНПА сместится не более чем на 90 м, таким образом, маркер гарантированно попадет на изображение ГБО.

Алгоритм распознавания маркеров

Задача детектирования объектов является одной из классических задач компьютерного зрения. В общем виде задача сводится к детектированию заданного объекта на изображении и определению прямоугольной области исходного изображения с искомым объектом. К настоящему времени разработано достаточно большое количество подходов к решению данной задачи. Существуют методы, основанные на сопоставлении градиентов, статистические методы на основе гистограмм, методы, основанные на поиске особых точек и другие. Наилучшие результаты по детектированию объектов показывают алгоритмы, основанные на применении сверхточных нейронных сетей (СНС). Решение задачи детектирования маркеров на акустическом изображении с использованием СНС сводится к задаче машинного обучения, а именно [5]:

- подготовке набора данных для обучения,
- выбору метрик оценки качества архитектуры СНС и оптимальных гиперпараметров,
- обучению СНС на тренировочной выборке,
- проверке качества на валидационной и тестовой выборках и финальному экспорту модели в формат, подходящий для использования на встраиваемых системах.

Существует достаточно большое количество архитектур СНС, которые могут использоваться на устройствах с небольшой вычислительной мощностью (к которым относятся и промышленные одноплатные компьютеры, применяемые в системах управления современных АНПА). Из наиболее известных можно выделить Inception v4 [5], MobileNet v2 [6], Inception-Resnet v2 [5]. Единой методики подбора оптимальной модели для решения конкретной задачи на основе теоретических изысканий не существует – нужно тестировать работу каждой из архитектур с разными оптимизаторами на подготовленном наборе данных.

Важно отметить, что ни одна СНС не обладает 100%-ной точностью и не защищена от ложного срабатывания. В описываемой навигационной системе планируется использовать следующий подход

для увеличения надежности распознавания. Систему распознавания предполагается разделить на 2 работающих независимо друг от друга модуля: модуль алгоритма распознавания образов, занимающийся только задачей распознавания, и модуль вычисления навигационных поправок, в который будут заранее занесены глобальные координаты и типы установленных маркеров. Модуль вычисления навигационных поправок будет следить за реальным положением аппарата по данным БНС и выполнять учет результатов алгоритма распознавания образов только тогда, когда по данным БНС аппарат находится недалеко от маркера и если алгоритм распознавания смог точно определить его тип. Модуль поправок также должен запускать алгоритм поиска маркера в случае невозможности его детектирования по ходу штатного выполнения миссии.

Следует также отметить, что такие акустические средства, как ГСО переднего обзора, допускают многократный захват одного и того же объекта. В этом случае повысить надежность детектирования можно за счет требования нескольких распознаваний объекта на последовательно идущих кадрах.

Навигационный алгоритм

Рассмотрим алгоритм вычисления навигационных поправок для БНС. Одновременно и параллельно на компьютере в системе управления АНПА должны работать следующие модули:

- драйвер, публикующий координаты, рассчитанные БНС в понятном для остальных модулей виде;
- драйвер комплексированной навигационной системы (КНС), осуществляющий синтез итоговых координат аппарата на основе данных БНС и других источников, в частности, рассматриваемого алгоритма навигационных поправок;
- драйвер гидроакустической аппаратуры (ГА), публикующий с заданной частотой кадры в виде картинок некоторого пригодного для анализа формата (например, bmp, jpeg и т.п.) с примечаниями (индекс кадра, размер пикселя в метрах, координаты одного из углов по данным КНС);
- модуль алгоритма распознавания образов, получающий от драйвера ГА кадры, детектирующий на них известные объекты и публикующий, в случае успешного обнаружения маркера, номер кадра, индекс найденного объекта, пиксельные координаты центра объекта на снимке;
- модуль вычисления навигационных поправок, который, на основе данных от драйвера ГА и модуля алгоритма распознавания образов, вычисляет и публикует навигационные поправки для драйвера КНС.

Рассмотрим алгоритм работы модуля вычисления навигационных поправок. Модуль в реальном времени получает данные от драйвера КНС и отслеживает положение аппарата относительно известных координат размещения маркеров. При получении отчета от алгоритма распознавания образов с типом маркера и его позицией на акустическом кадре (в пиксельных координатах) модуль осуществляет расчет позиции маркера в глобальных координатах, на основе данных о кадре (координаты угла по данным КНС, размер пикселя в метрах). Затем алгоритм вычисляет расхождение полученной позиции маркера с заранее известной позицией и вырабатывает навигационную поправку, привязанную ко времени получения рассматриваемого акустического кадра. Поправка и ее временная метка затем публикуются для КНС и учитываются ею при определении глобальных координат аппарата. Поправка также может быть направлена в ИНС посредством существующих у конкретного прибора механизмов. Как и было отмечено ранее, расчет поправки не выполняется, если по данным КНС аппарат находится далеко от маркера или если распознанный тип маркера не совпадает с реально размещенным. Если при прохождении аппарата в районе маркера детектировать его не удастся, модуль должен посредством механизмов системы управления приостановить работу миссии и запустить агента поиска маркера.

Состояние работы и перспективы

В настоящее время разработаны навигационный алгоритм, алгоритм поиска маркера и алгоритм размещения маркеров. Необходимо подготовить набор данных для обучения алгоритма распознавания. Для этого нужно собрать несколько маркеров, разместить их на морском полигоне и выполнить несколько проходов АНПА над ними с использованием ГБО и ГСО. Полученные данные нужно аргументировать (в частности, изменяя цветовую схему, нанося искусственно некоторые типичные для акустических изображений искажения и т.п.) для улучшения качества обучения сверхточной нейронной сети. После выполнения тестирования можно выбрать конкретную архитектуру СНС и создать модуль алгоритма распознавания образов для системы управления АНПА. Разработанные алгоритмы будут интегрированы в систему управления АНПА и использованы в тестовом режиме во время выполнения реальных работ по обследованию акваторий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под общей ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 400 с.
2. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение [отв.ред.Л.В.Киселев]. Владивосток: Дальнаука, 2018. 368 с.
3. iXblue INS and DVL tight coupling performance improvements // ROV Planet №17 (Oct 30, 2018). P. 19–21. – URL: <https://www.nortekgroup.com/assets/documents/Nortek-iXblue-ROV-Planet-04.2018.pdf> (дата обращения: 10.11.2020).
4. Фомин Я. А. Распознавание образов: теория и применения. 2-е изд. М.: ФАЗИС, 2012. 429 с. ISBN 978-5-7036-0130-4.
5. Szegedy C., Ioffe S., Vanhoucke V., Alemi A. Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning // Proceedings of the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI'17). San Francisco, USA, 2017. P. 4278–4284
6. Sandler M., Howard A., Zhu M., Zhmoginov A., Chen L. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks // Proceedings 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City, US, 2018. P. 4510–4520. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00474.

