СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИНСПЕКЦИИ ПРОБЛЕМНЫХ УЧАСТКОВ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ АНПА

М.О. Панчук, А.П. Юрманов, А.Ю. Коноплин

Статья посвящена разработке системы автоматической инспекции проблемных участков протяженных объектов с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащенных системами технического зрения (СТЗ), в частности многолучевыми гидроакустическими сонарами. Предложенная система позволяет в режиме реального времени на бортовом ЭВМ АНПА динамически строить трехмерную модель трубопровода на основе облаков точек, получаемых от СТЗ. На основе указанной модели автоматически определяются положение протяженного объекта в пространстве и его кривизна, а также уровень погружения трубы в донный грунт. Вычисленные параметры позволяют выявлять потенциально опасные участки, подверженные деформациям или повреждениям. Полученные данные должны использоваться для корректировки миссии аппарата с целью проведения детального дообследования выявленных зон интереса, а также могут быть отправлены на пост оператора с использованием гидроакустического канала связи с аппаратом.

Программная реализация системы выполнена на языке Python с использованием открытых библиотек для обработки трёхмерных данных. Численное моделирование процесса инспекции трубопровода проводилось в среде CoppeliaSim, полученные результаты подтвердили работоспособность и эффективность предложенной системы.

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, инспекция протяженных объектов, облака точек, математическая модель, система технического зрения, подводный трубопровод, многолучевой сонар, подводные операции.

Введение

Магистральные подводные трубопроводы представляют собой важнейшую часть современной транспортной инфраструктуры. С ростом их протяжённости возрастает потребность в проведении регулярного технического обслуживания функционирующих объектов. Обеспечение надёжной и безопасной эксплуатации трубопроводов требует систематического контроля их целостности, степени заглубления в донный грунт, геометрических отклонений, а также выявления трещин, утечек и следов коррозии.

Одним из распространённых подходов к обследованию трубопроводов является внешняя инспекция, традиционно осуществляемая с использованием телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) [1-3]. Хорошо известно, что системы ТНПА могут быть очень дорогими в эксплуатации, поскольку требуют использования крупных судов-носителей и многочисленного обеспечивающего персонала. Также с увеличением глубины погружения и удлинением трос-кабеля значительно возрастают трудности в эксплуатации комплекса «судно–аппарат», увеличиваются массогабаритные характеристики судового оборудования.

С целью повышения эффективности и снижения затрат на подводное обследование в настоящее время начинают активно использоваться автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), оснащённые системами технического зрения (СТЗ). Наиболее широко применяются СТЗ на основе стереокамер [4, 5], многолучевых сонаров и гидролокаторов [6, 7]. В частности, в работе [8] реализован подход, предполагающий управление АНПА на основе видеоинформации, получаемой от камеры. Однако весь анализ полученных данных происходит уже непосредственно на судне-носителе. Недостатком подобной системы является то, что при определении «проблемных» участков вдоль протяженного объекта необходимо дополнительно погружать ТНПА для проведения дообследования проблемных зон. Данная процедура усложняет проводимый технологический процесс и повышает его стоимость.

Для задачи распознавания и автоматического следования вдоль маршрута трубопровода применяются различные подходы, рассмотренные в работах [9-11]. В работе [10] описана система навигации, основанная на использовании камеры и многолучевого сонара, что позволяет выделять контуры трубопровода и определять направление его пролегания. Однако данный метод требует значительных вычислительных ресурсов и не учитывает возможность частичной или полной погруженности объекта в грунт. В работе [9] приведён подробный обзор существующих технологий обнаружения подводных трубопроводов, охватывающий визуальные, акустические, магнитные и мультисенсорные методы. При этом подчёркиваются основные ограничения таких систем, включая их высокую стоимость, продолжительность процедур обнаружения, а также неспособность эффективно функционировать в условиях, когда объект частично или полностью скрыт под донным грунтом либо заилен.

Существуют также подходы [12, 13], направленные на оценку профиля донной поверхности вдоль исследуемого объекта. Однако данные методы, как правило, основаны на усреднённом значении высоты дна, что не позволяет получить информацию о рельефе с каждой стороны протяженного объекта. Это ограничивает возможность выявления ситуаций с неравномерным засыпанием, например, когда одна сторона трубопровода погружена в грунт, а противоположная подверглась подмыву. Кроме того, в большинстве существующих решений полученные данные сохраняются на борту АНПА без последующего анализа в режиме реального времени, что снижает оперативность принятия решений во время выполнения миссии.

Анализ большинства существующих методов указывает на то, что АНПА используются лишь для первоначального инспектирования и автономного позиционирования вдоль трубопровода [14, 15]. При этом вся обработка данных выполняется оператором на судне-носителе. Таким образом, анализ литературных источников показывает, что проблема создания эффективных систем для автоматической инспекции проблемных участков протяженных объектов с использованием АНПА решена не в полной мере. Поэтому в статье решается задача разработки и программной реализации такой системы, которая на основе обработки облаков точек, получаемых в реальном времени от бортовых многолучевых гидроакустических сонаров АНПА, будет автоматически распознавать «проблемные» участки трубопроводов. Полученные данные должны использоваться для корректировки миссии аппарата с целью проведения детального дообследования выявленных зон интереса. Кроме того, эти данные могут передаваться посредством гидроакустического канала связи на обеспечивающее судно для оценки оператором текущего состояния трубопровода. В некоторых случаях рассматриваемая система может быть использована для устранения «проблемных» участков с помощью АНПА, оснащённого многозвенным манипулятором [16], исключая необходимость использования дорогостоящих ТНПА.

Для создания вышеуказанной системы в первом разделе статьи описана разработка алгоритма построения трехмерной модели протяжённого объекта; в разделе 2 приводится описание разработанной подсистемы анализа уровня грунта вдоль трубопровода и его кривизны; в разделе 3 представлены результаты проведенного моделирования.

1. Разработка алгоритма построения трехмерной модели трубопровода

Перед началом инспекции АНПА осуществляет поиск трубопровода и при его обнаружении переходит в режим обследования. В этом режиме аппарат движется вдоль протяжённой конструкции с заданной постоянной скоростью и поддерживает фиксированную высоту над поверхностью дна [9]. В процессе движения АНПА выполняет непрерывное сканирование донной поверхности с использованием установленной СТЗ – многолучевого гидроакустического сонара, формируя последовательные облака точек. Все данные, полученные от СТЗ в ходе перемещения аппарата вдоль участка, на котором расположен трубопровод, записываются в единое облако точек W (рис. 1).

Первоочередной целью инспекции является построение точной трёхмерной модели трубопровода, отражающей его пространственную кривизну. Такая модель может быть сформирована на основе получаемых облаков точек, при этом необходимо учитывать, что область действия рассматриваемых СТЗ представляет собой сектор, а сам трубопровод может быть частично заилен, деформирован или обладать неизвестной траекторией пролегания. При этом на каждом полученном новом секторе в виде облака точек необходимо точно определить текущее положе-



Рис. 1. Облако точек трубопровода

ние участка трубопровода. Для этого используется модернизированный алгоритм совмещения облаков точек ICP [17]. В результате работы алгоритма определяются матрица поворота $R_{icp} \in \mathbb{R}^{3\times 3}$ и вектор смещения $p_{icp} \in \mathbb{R}^3$, которые задают пространственное положение сектора трубопровода в жестко связанной с центром водоизмещения АНПА системе координат (СК), где ось Z направлена вверх, Y – вдоль продольной оси симметрии АНПА, X дополняет Y и Z до правой тройки.

Таким образом, найденные матрица R_{icp} и вектор p_{icp} минимизируют расстояние между парами точек двух облаков (рис. 2) и доставляют минимум целевой функции вида:

$$J(R_{icp}, p_{icp}) = \sum_{j=1}^{M} \left\| (R_{icp}H_j + p_{icp}) - G_j \right\|^2,$$

где G – идеальное облако, количество точек (M) которого соответствует облаку H, полученному от СТЗ.



Рис. 2. Результат совмещения облаков точек

На основе критерия $J(R_{icp,}p_{icp})$ определяются точки P_i (где $i = \overline{1, s}$, где s – количество полученных секторов):

> 1) Если $J(R_{icp}, p_{icp}) \le b, b$ – определяется экспериментально исходя из плотности по

лучаемых облаков точек и оценки величины шумов используемой СТЗ, P_i – точка из облака G текущего сектора с максимальной координатой по оси Z (далее – высота).

2) Если (*J*(*R_{icp}*, *p_{icp}*) > *b*), *P_i* – точка с максимальной высотой из облака текущего сектора *H*, так как при несоблюдении первого условия невозможно однозначно найти точку, принадлежащую трубопроводу. Данная точка в большинстве случаев будет соответствовать точке, лежащей в непосредственной близости от поверхности трубопровода в тех случаях, когда сканируемый участок засыпан грунтом.

На основе полученных точек формируются трехмерные вектора наращивания $\overline{P_{N_{start}}} P_{N_{finish}}$, $(N = \overline{1, n}, r)$ где n – количество фрагментов наращивания), описывающих направление пролегания трубопровода между секторами. Так как кривизна трубопровода на коротких участках мала, целесообразно вычислять вектор $\overline{P_{N_{start}}} P_{N_{finish}}$ не для соседних секторов, а для участка трубопровода длиной D_{lim} . Длина необходимого участка выбирается исходя из требуемой точности соблюдения кривизны трубопровода на протяжении всего обследуемого участка трубопровода. Для этого сначала вычисляется дистанция между двумя точками P_i и $P_{N_{start}}$ в начальный момент времени $P_{N_{start}} = P_1$:

$$d = \sqrt{(P_{i_X} - P_{N_{start_X}})^2 + (P_{i_Y} - P_{N_{start_Y}})^2 + (P_{i_Z} - P_{N_{start_Z}})^2}.$$
(1)

Если $d \ge D_{lim}$, вычисление $P_{N_{finish}}$ выполняется согласно выражению:

$$P_{N_{finish}} = \left(P_{N_{start_{\chi}}} + d\sin(\theta_1);\right.$$

$$\frac{P_{N_{start_{\chi}}} + d\cos(\theta_1) + P_{N_{start_{\chi}}} + d\cos(\theta_2)}{2}\right);$$

$$P_{N_{start_{\chi}}} + d\sin(\theta_2)\Big),$$

где углы θ_1 и θ_2 определяются с помощью формул [18] линейной аппроксимации всех точек P, принадлежащих диапазону от $P_{N_{truer}}$ до P_i :

$$\theta_{1} = arctg\left(\frac{\sum_{m=i-j}^{i} P_{m_{X}} \sum_{m=i-j}^{i} P_{m_{Y}} - j \sum_{m=i-j}^{i} P_{m_{X}} P_{m_{Y}}}{\left(\sum_{m=i-j}^{i} P_{m_{X}}\right)^{2} - j \sum_{m=i-j}^{i} P_{m_{X}}^{2}}\right),$$

$$\theta_{2} = arctg\left(\frac{\sum_{m=i-j}^{i} P_{m_{Z}} \sum_{m=i-j}^{i} P_{m_{Y}} - j \sum_{m=i-j}^{i} P_{m_{Z}} P_{m_{Y}}}{\left(\sum_{m=i-j}^{i} P_{m_{Z}}\right)^{2} - j \sum_{m=i-j}^{i} P_{m_{Z}}^{2}}\right), \quad (2)$$

где j – количество точек P между $P_{N_{start}}$ и P_i . Далее происходит вычисление угла α между векторами $P_{N_{start}}P_{N_{finish}}$ и $P_{N-1_{start}}P_{N-1_{finish}}$, если N=1, то $\alpha = 0$:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{(P_{N_{start}}P_{N_{finish}})}(\overrightarrow{P_{N-1_{start}}P_{N-1_{finish}})}}{\left|\overrightarrow{P_{N_{start}}P_{N_{finish}}}\right|\left|\overrightarrow{P_{N-1_{start}}P_{N-1_{finish}}\right|}\right)$$

Если угол α превышает заданное оператором значение максимального углового отклонения $E_{\rm lim}$ ($E_{\rm lim}$ – определяется экспериментально исходя из выбранного D_{lim}), то точки, на основе которых была получена аппроксимация и соответствующий вектор $P_{N_{start}}P_{N_{finish}}$ пересчитываются. Данный пересчет обусловливается соблюдением требования динамического наращивания трехмерной модели протяженного объекта в режиме реального времени. Как было упомянуто ранее, считается, что на коротком участке кривизна трубопровода мала, вследствие чего вектор $P_{N_{start}}P_{N_{finish}}$, характеризующий направление пролегания этого участка, не может резко изменить свое направление. Пересчет происходит на основе переноса точек в направлении пролегания предыдущего вектора $P_{N-1_{start}}P_{N-1_{finish}}$.

Завершающим этапом в работе предложенного алгоритма является построение сегмента трубопровода с длинной $L_N = \left| \overline{P_{N_{start}}} P_{N_{finish}} \right|$. Для построения сегмента трубопровода рассчитываются точки C_{N_S} и $C_{N_{r}}$, которые являются центром объекта в начале и в конце сегмента соответственно:

$$C_{N_{S}} = (P_{N_{start_{X}}}; P_{N_{start_{Y}}}; P_{N_{start_{Z}}} - D / 2),$$

$$C_{N_{F}} = (P_{N_{finish_{X}}}; P_{N_{finish_{Y}}}; P_{N_{finish_{Z}}} - D / 2),$$

где *D* – заданный (известный) диаметр трубопровода.

Далее из точки C_{N_c} строится сегмент объекта длиной L_N в виде облаков точек цилиндра в направлении полученного ранее вектора $P_{N_{start}}P_{N_{finish}}$. Следовательно, построенный сегмент будет соединять полученные ранее точки C_{N_s} и C_{N_F} , а центром сегмента N называется точка C_N , лежащая между началом и концом построенной идеальной модели этого сегмента:

$$C_N = \frac{C_{N_S} + C_{N_F}}{2}.$$

Таким образом, набор всех точек C_{N_s} и C_{N_r} , полученных в ходе работы системы, представляет собой траекторию пролегания объекта $T_{p_{\nu}} \in \mathbb{R}^{3\nu}$, где v = 1,2N - количество точек траектории в соответствии с количеством полученных сегментов N. А также набор всех полученных идеальных сегментов N будет представлять собой динамически наращиваемую модель трубопровода в виде облака точек Q.

После каждого успешного наращивания модели выполняется переход к расчету нового сегмента (N = N + 1), для этого (при получении последующей точки P_i) происходит расчет начальной точки вектора $P_{N_{start}}P_{N_{finish}}$. Данный расчет выполняется на основе поиска пересечения вектора $P_{N-1_{start}}P_{N-1_{start}}$ и сферы радиуса $R_{sp} = D_{lim}$, проведенной из точки P_i . Для этого задается параметрическое уравнение отрезка $P_{N-1_{start}}P_{N-1_{finish}}$ и подставляется в уравнение сферы:

$$P(t) = (1-t)P_{N-1_{start}} + tP_{N-1_{finish}},$$

$$\begin{cases} x(t) = P_{N-1_{start_X}} + t(P_{N-1_{finish_X}} - P_{N-1_{start_X}}) \\ y(t) = P_{N-1_{start_Y}} + t(P_{N-1_{finish_Y}} - P_{N-1_{start_Y}}), \\ z(t) = P_{N-1_{start_Z}} + t(P_{N-1_{finish_Z}} - P_{N-1_{start_Z}}) \end{cases}$$

$$(x(t) - P_{i_X})^2 + (y(t) - P_{i_Y})^2 + (z(t) - P_{i_Z})^2 = R_{sp}^2,$$

В результате искомая точка находится посредством подстановки в уравнения x(t), y(t), z(t) или P(t) параметра t:

$$t = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A},$$

где А, В, С – коэффициенты квадратного уравнения вида $At^2 + Bt + C = 0$. Для упрощения записи примем следующие сокращения: $d_x = P_{N-1_{finishy}} - P_{N-1_{starty}}$, $d_y = P_{N-1_{\text{finishy}}} - P_{N-1_{\text{starty}}}, \ d_z = P_{N-1_{\text{finishz}}} - P_{N-1_{\text{startz}}},$ $f_x = P_{N-1_{starty}} - P_{i_x}, f_y = P_{N-1_{starty}} - P_{i_y}, f_z = P_{N-1_{startz}} - P_{i_z},$ тогда $A = d_x^2 + d_y^2 + d_z^2$, $B = 2(d_x f_x + d_y f_y + d_z f_z)$, $C = f_x^2 + f_y^2 + f_z^2$.

Как показано на рис. 3, существует только одно искомое пересечение, следовательно:

$$t \in [0,1],$$
$$D = B^2 - 4AC = 0,$$
$$P_{N_{start}} = P\left(t = \frac{-B}{2A}\right) = \left(1 - \frac{-B}{2A}\right)P_{N-1_{start}} + \frac{-B}{2A}P_{N-1_{finish}}.$$



Рис. 3. Анализ данных, полученных от СТЗ для построения идеальной модели объекта на различных этапах работы алгоритма

Таким образом, после расчета $P_{N_{start}}$ происходит новая итерация работы алгоритма построения трехмерной модели протяженного объекта начиная с (1). Графическое изображение описанного выше алгоритма представлено на рис. 3.

На этом рисунке введены следующие обозначения: 1 – точки P_i , удовлетворяющие условию $J(R_{icp}, p_{icp}) \leq b$; 2 – $\overline{P_{N_{start}}} P_{N_{finish}}$; 3 – точки P_i , удовлетворяющие условию $(J(R_{icp}, p_{icp}) > b)$; 4 – точки P_i , перенесенные в направлении пролегания предыдущего вектора $\overline{P_{N-1_{start}}} P_{N-1_{finish}}$.

Рисунки 3, *a* и 3, *б* демонстрируют распознавание первого и последующего сегментов протяженного объекта соответственно. На рис. 3, *в* показано, что трубопровод не мог быть однозначно идентифицирован, поэтому записывались точки с максимальной глубиной. Однако при анализе этих данных в соответствии с (2) точки были перенесены, т.к. превышали заданное отклонение, поэтому в дальнейшем (рис. 3, *г*) учитывались уже пересчитанные точки – 4.

В результате выполнения вычислений в каждый момент времени определяется траектория пролегания трубопровода T_{p_v} (рис. 4, *a*), а также облако точек с динамически наращива-емой моделью трубопровода Q (рис. 4, *б*, *в*).

Полученные в ходе идентификации протяженного объекта данные также могут быть использованы для позиционирования АНПА вдоль этого объекта. Поскольку эти данные вычисляются в режиме реального времени, на их основе можно вычислить желаемое положение АНПА и направление его движения в процессе инспектирования.



Рис. 4. Траектория трубопровода (а); идеальная модель трубопровода (б); положение модели трубопровода (в)

После расчета первого вектора $P_{N_{starr}}P_{N_{finish}}$ направления пролегания сегмента трубопровода желаемое положение АНПА будет находиться в точке, лежащей в направлении этого вектора. Эта точка должна быть удалена от конца вектора пролегания сегмента для возможности получения последующих точек P_i . Также необходимо отметить, что желаемая точка должна иметь смещение по оси Z, чтобы АНПА двигался вдоль трубопровода с заданной высотой. В результате искомая точка будет определяться с помощью выражения:

$$T_{R} = P_{N_{finish}} + \frac{\left|\overline{P_{N_{starr}}P_{N_{finish}}}\right|}{K_{R}} \overline{P_{N_{starr}}P_{N_{finish}}}$$

$$T_{R_{T}} = T_{R_{T}} + Z_{offest},$$

где T_R – желаемое положение АНПА; K_R – коэффициент отдаления желаемой точки от конечной точки вектора (определяется экспериментально исходя из скорости получения данных от СТЗ и скорости движения аппарата); Z_{offest} – желаемое расстояние от трубопровода до АНПА (определяется экспериментально исходя из профиля сканирования используемой СТЗ и желаемой полосой покрытия СТЗ).

После каждой итерации работы алгоритма (после каждого расчета вектора $\overline{P_{N_{start}}}P_{N_{finish}}$ пролегания сегмента трубопровода) происходит расчет новой желаемой точки T_R положения АНПА, что позволит двигаться аппарату в непосредственной близости от объекта, сохраняя желаемое расстояние до него.

Для определения требуемой пространственной ориентации АНПА на основе вектора $\overrightarrow{P_{N_{start}}} P_{N_{finish}}$ в режиме реального времени вычисляются углы курса α_R и дифферента γ_R , описывающие поворот АНПА в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно.

1. Угол курса определяет отклонение направления движения в горизонтальной плоскости относительно оси *OY* глобальной системы координат:

$$\alpha_{R} = \arctan 2(\overline{P_{N_{start}}P_{N_{finishy}}}, \overline{P_{N_{start}}P_{N_{finish\chi}}}).$$

2. Угол дифферента описывает угол подъёма или снижения вдоль вектора $\overrightarrow{P_{N_{start}}P_{N_{finish}}}$:

$$\gamma_{R} = \arctan 2 \left(-\overline{P_{N_{start}} P_{N_{finish_{Z}}}}, \sqrt{\overline{P_{N_{start}} P_{N_{finish_{Y}}}}^{2} + \overline{P_{N_{start}} P_{N_{finish_{X}}}}^{2} \right).$$

Полученные углы α_R и γ_R позволяют задать желаемую ориентацию АНПА в пространстве для автономного следования вдоль трубопровода.

2. Анализ уровня грунта вдоль трубопровода и его кривизны

Одним из ключевых подходов к внешнему инспектированию подводных трубопроводов является анализ уровня донной поверхности вдоль их пролегания. Существующие методы позволяют оценивать высоту дна относительно трубопровода [12, 13], однако в большинстве случаев такие подходы ограничиваются вычислением усреднённого значения уровня грунта. Полученные при этом данные сохраняются на борту АНПА и становятся доступными для анализа только после завершения всей инспекционной миссии и всплытия аппарата. Кроме того, данные методы не учитывают асимметрию положения трубопровода, возникающую, например, при его частичной засыпанности с одной стороны и размыве с противоположной. Это ограничивает возможности точной оценки состояния объекта. В связи с этим предлагается производить отдельную оценку уровня дна по обе стороны от трубопровода, а также определять кривизну полученной пространственной модели. Расчёты уровня донной поверхности и кривизны объекта должны осуществляться по завершении каждой итерации работы алгоритма, то есть после формирования нового сегмента трубопровода.

На основе информации о пролегании трубопровода сначала удаляются все точки, принадлежащие поверхности трубопровода, а также точки, лежащие не вдоль трубопровода из облака V_N , принадлежащего сегменту N из облака W. Следовательно, отбрасывается каждая точка, для которой выполняются условия (рис. 5):

$$C'_{N_{k}} = (C_{N_{X}}, V_{N_{k_{Y}}}, C_{N_{Z}}),$$

$$\left|C'_{N_{k}} - V_{N_{k}}\right| \le \frac{D}{2} + e_{son},$$
(3)

$$\left|C'_{N_{k}}-V_{N_{k}}\right| > \frac{D}{2} + e_{son} + L_{r},$$
 (4)

где $V_{N_k} \in \mathbb{R}^3 - k$ -тая точка облака V_N ($k = \overline{1, K}$, где K – количество точек в облаке V_N), e_{son} – оценка величины шумов сонара, L_r – максимальная дистанция наиболее удалённой от объекта точки.

Таким образом формируется облако точек U_N , лежащее вдоль трубопровода. Для отдельного анализа уровня поверхности дна с каждой стороны трубопровода облако точек U_N разделяется на два облака U_{N_I} и U_{N_R} :

1) если
$$U_{N_{i_X}} < C_{N_X}$$
, то $U_{N_i} \in U_{N_L}$,
2) если $U_{N_{i_X}} > C_{N_X}$, то $U_{N_i} \in U_{N_R}$.



Рис. 5. Облака точек без трубопровода (а); облака точек для оценки дна трубопровода (б)

Для проведения анализа уровня дна относительно двух сторон сегмента трубопровода строятся графики зависимости высоты полученных облаков точек U_{N_t} и $U_{N_{n}}$ от координаты по оси Ү АНПА. Таким образом, получившиеся графики показывают динамическое изменение уровня дна относительно трубопровода. При этом в процессе работы в автоматическом режиме на ЭВМ АНПА отмечаются критические зоны в соответствии с информацией о высоте уровня грунта. Данные критические зоны подразделяются на два типа: первый тип – «желтая зона» – свидетельствует о том, что высота уровня грунта (справа или слева) превышает отметку центра протяженного объекта ($U_{N_{R_v}} \ge C_{N_y}$ и $U_{N_{I_v}} \ge C_{N_y}$ соответственно); второй тип – «красная зона» – показывает участки, где уровень грунта (справа или слева) превышает уровень верхней границы трубопровода ($U_{N_{R_{\rm v}}} \geq C_{N_{\rm Y}} + D \,/\, 2$ и $U_{N_{I_{y}}} \ge C_{N_{y}} + D/2$ соответственно), что говорит о его полной погруженности в грунт и невозможности обнаружить объект бортовыми СТЗ. Оператор на основе полученных данных о критических зонах посредством гидроакустического канала связи может подать команду АНПА на дополнительное обследование этого участка или на проведение манипуляционной операции.

Для оценки кривизны трубопровода можно использовать облака точек протяженного объекта Q, преобразовав их в триангуляционную поверхность [19], однако данный метод имеет большую вычислительную сложность. Поэтому указанный анализ предлагается выполнять на основе траектории T_p трубопровода, вычисляемой в процессе работы алгоритма. Так как полученная траектория T_p представляет собой набор точек, то для вычисления кривизны данные представляются в виде некоторой функции y = f(x). Для получения искомой функции используется метод интерполяции сплайном 3-го порядка [20]. Кривизна объекта вычисляется по формуле [21]:

$$K = \frac{|y''(x_i)|}{(1 + y'(x_i)^2)^{\frac{3}{2}}}$$

где x_i – координата X *i*-ой точки, принадлежащей полученному ранее сплайну.

Полученная траектория объекта в виде сплайна, а также соответствующая этому сплайну кривизна и уровень грунта вдоль объекта могут передаваться по гидроакустическому каналу связи оператору для визуальной оценки.

3. Численное моделирование разработанной системы

Предложенная система реализована на языке программирования Python. Моделирование работы АНПА и многолучевого сонара выполнено в виртуальной среде CoppeliaSim. Для этого была сформирована сцена, содержащая протяженный трубопровод – 3, погруженный в грунт, и АНПА – 2 с установленным на нем многолучевым сонаром – 1 (рис. 6). Работа сонара моделировалась с разрешением 128 точек и углом сканирования 90 градусов. При этом для данного моделирования были установлены соответствующие параметры, описанные в разделе 1 данной работы: $b = 0.02 \text{ м}^2$; D = 0.5 м; $D_{lim} = 0.4 \text{ м}$; $E_{lim} = 0.1 \text{ рад.}$; $K_R = 4$; $Z_{offest} = 10 \text{ м}$.



Puc. 6. Модель аппарата над объектом в среде CoppeliaSim

Во время проведенного моделирования АНПА непрерывно двигался вдоль протяженного объекта, получая при этом облака точек от установленной на борту СТЗ. В процессе работы предложенной системы определялось положение трубопровода и строилась его точная трехмерная модель (рис. 4).

На рис. 7, *а* показана траектория движения АНПА вдоль протяжённого объекта без коррекции положе-



Рис. 7. Траектория движения АНПА: а – без учета ориентации, б – с учетом ориентации

ния и ориентации аппарата (T_r , α_r , γ_r), описанной в разделе 1. В данном случае движение осуществляется вдоль заранее заданной траектории, построенной в предполагаемом месте пролегания объекта.

На рис. 7, *б* продемонстрирована траектория движения АНПА, сформированная с помощью представленного в работе алгоритма. В данном случае вектор направления пролегания сегмента используется для формирования траектории движения АНПА, а также для определения требуемых углов курса и дифферента.

Результаты моделирования показали, что алгоритм расчета желаемого положения и ориентации АНПА позволяет этому аппарату двигаться вдоль объекта с сохранением пространственной ориентации, необходимой для корректной работы СТЗ и эффективного выполнения инспекционных задач. При этом моделирование без учета ориентации и положения показало, что в случае изменения направления пролегания трубопровода происходит полная или частичная потеря протяженного объекта из зоны сканирования СТЗ. В этом случае дальнейшее инспектирование становится невозможным.

Также, используя вычисленную информацию о протяженном объекте, в режиме реального времени выполнялся анализ уровня грунта вдоль объекта и его кривизны в соответствии с описанным в разделе 2 данной работы алгоритмом (рис. 8, 9).

На рис. 8 введены следующие обозначения: 1, 3, 2 - положения верхней, нижней границ и центра трубопровода соответственно; 4, 5 – зависимость уровня грунта облаков точек U_{N_L} и U_{N_R} от расстояния,



Рис. 8. Результаты оценки уровня грунта относительно трубопровода

пройденного вдоль оси *Y* АНПА, соответственно. При этом в процессе работы подсистемы анализа уровня грунта в автоматическом режиме были отмечены критические зоны в соответствии с критериями, введенными во втором разделе статьи.

Также были получены траектория пролегания объекта, интерполированная сплайном, и вычисленная на основе этого сплайна кривизна объекта (рис. 9).

При этом, как уже было отмечено ранее, все полученные данные анализа протяженного объекта, вычисляемые на ЭВМ АНПА, могут быть переданы на пост оператора с использованием гидроакустического канала связи [22, 23]. В свою очередь, оператор



с помощью соответствующего графического интерфейса может визуально оценить получаемые данные и, при необходимости, отправить команду на ЭВМ АНПА на выполнение дополнительного сканирования или на выполнение манипуляционной операции, в частности, по отчистке объекта.

Заключение

Разработанная система инспекции протяжённых подводных объектов позволяет в режиме реального времени на бортовом ЭВМ АНПА динамически строить трехмерную модель трубопровода на основе облаков точек, получаемых от СТЗ, а также выполнять оценку уровня донной поверхности по обе стороны от протяженного объекта и анализировать кривизну протяженного объекта. Полученные данные могут быть использованы для корректировки миссии аппарата с целью проведения детального дообследования выявленных потенциально опасных участков трубопровода. Кроме того, эти данные могут передаваться посредством гидроакустического канала связи на обеспечивающее судно для оценки оператором текущего состояния трубопровода

Результаты проведенного моделирования предложенной системы в виртуальной среде позволили оценить качество идентификации подводного трубопровода в процессе движения АНПА. Вычисляемые в реальном масштабе времени текущее желаемое положение и ориентации АНПА позволяют этому аппарату двигаться вдоль объекта с сохранением пространственной ориентации, необходимой для корректной работы СТЗ и эффективного выполнения инспекционных задач. В процессе перемещения АНПА над объектом строились графики, отображающие уровень дна, а также кривизну исследуемого объекта. При этом в соответствии с введёнными критериями автоматически определялись критические зоны.

Дальнейшие исследования, планируемые авторами, будут направлены на усовершенствование алгоритма анализа кривизны с переходом от двухмерной оценки траектории к полноценному трёхмерному анализу пространственного положения объекта. Кроме того, предполагается развитие методов автоматической идентификации ключевых элементов протяжённых объектов, таких как аноды и манифольды, что позволит не только передавать информацию о расположении этих элементов оператору, но и использовать их в качестве дополнительных ориентиров для уточнения текущих координат АНПА в инерциальной навигационной системе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038, https://rscf.ru/ project/23-71-10038/.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shukla A., Karki H. Application of robotics in offshore oil and gas industry - A review Part II // Robotics and Autonomous Systems. 2016. Vol. 75. P. 508-524.

2. Zingaretti P., Zanoli S.M. Robust real-time detection of an underwater pipeline // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 1998. Vol. 11, Issue 2. P. 257–268.

3. Kim M.-G., Kang H., Lee M.-J., Cho G. R., Li J.-H., Yoon T.-S., Ju J., Kwak H.-W. Study for Operation Method of Underwater Cable and Pipeline Burying ROV Trencher using Barge and Its Application in Real Construction // J. Ocean Eng. Technol. 2020. Vol. 34 (5). P. 361–370.

4. Martin-Abadal, Miguel & Piñar-Molina, Manuel & Martorell, Antoni & Oliver, Gabriel & Cid, Yolanda. Underwater Pipe and Valve 3D Recognition Using Deep Learning Segmentation // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 9 (5).

5. Bobkov V., Shupikova A., Inzartsev A. Recognition and Tracking of an Underwater Pipeline from Stereo Images during AUV-Based Inspection // J. Mar. Sci. Eng. 2023. Vol. 11.

6. Xiong C.-B., Li Z., Zhai G.-J., Lu H.-L. New method for inspecting the status of submarine pipeline based on a multi-beam bathymetric system // Journal of Marine Science and Technology. 2016. Vol. 24.

7. Jacobi M., Karimanzira D. Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs $\prime\prime$ 2014 Oceans. St. John's, NL, Canada, 2014. P. 1–6.

8. Midtgaard Øivind, Krogstad Thomas, Hagen Per Espen. Sonar detection and tracking of seafloor pipelines // Underwater Acoustic Measurements (UAM). Kos, Greece, 2011.

9. Mai C., Pedersen S., Hansen L., Jepsen K.L., Yang Z., Subsea Infrastructure Inspection: A Review Study // IEEE International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS). 2016. P. 71–76.

10. Sang I-C., Norris W.R. An Autonomous Underwater Vehicle Simulation with Fuzzy Sensor Fusion for Pipeline Inspection // IEEE Sensors Journal. 2023. Vol. 23, No. 8. P. 8941–8951.

11. Jacobi M., Karimanzira D., Underwater pipeline and cable inspection using autonomous underwater vehicles // MTS/IEEE OCEANS. Bergen, 2013. P. 1–6.

12. Ghis S., Fischer E. Record-Setting AUV Pipeline Inspection in Deepwater West Africa // Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA. 2017, P. 20–26.

13. Chen H., Zhu C., J. Chen, Y. Peng and J. Yao. Design of Unmanned Surface Vehicle for Submarine Pipeline Detection $\prime\prime$ IEEE 4th

Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2018. P. 198–202.

14. Xiang X, Jouvencel B, Parodi O. Coordinated Formation Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles for Pipeline Inspection // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2010. Vol. 7(1).

15. Reid A. Rov market prospects. URL: http://www.subseauk.com/ documents/presentations/ssuk%20%20rov%20event%20%20sep%20 2013%20%5Bweb%5D.pdf. 2016

16. Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю., Шувалов Б.В. Подход к выполнению АНПА технологических манипуляционных операций с различными подводными объектами // Подводные исследования и робототехника. 2019. №. 1. С. 31–37.

17. Segal A., Haehnel D., Thrun S. Generalized-ICP // Robotics: Science and Systems V. 2010. Vol. 2, No. 4. P. 435.

18. Аппроксимация функции. URL: https://planetcalc.ru/5992/

19. Sacchi R., Poliakoff J. F., Thomas P. D. and Hafele K-H. Curvature estimation for segmentation of triangulated surfaces // Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. Ottawa, ON, Canada, 1999. P. 536–543.

20. Стронгина Н.Р. Численные методы: Интерполяция кубическими сплайнами. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2021. С. 1–35 с.

21. Erich Hartmann, On the curvature of curves and surfaces defined by normalforms // Computer Aided Geometric Design. 1999. Vol. 16, Issue 5. P. 355–376.

22. Underwater Acoustic Modems 18/34 URL: https://evologics.de/acoustic-modem/18-34.

23. Catipovic J., Brady D., Etchemendy S. Development of underwater acoustic modems and networks // Oceanography. 1993. Vol. 6. P. 112–119.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПАНЧУК Максим Олегович, младший научный сотрудник **Место работы**: Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, системы технического зрения, подводные операции

Тел. (раб.): 89996170369

E-mail: my_panchuk@mail.ru

ORCID: 0009-0006-2738-6347

ЮРМАНОВ Александр Павлович, научный сотрудник

Место работы: Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, системы технического зрения, подводные операции

Тел. (раб.): 89146786060

E-mail: yurmanov_a@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6849-3700

КОНОПЛИН Александр Юрьевич, ведущий научный сотрудник

Место работы: Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, системы технического зрения, подводные операции Тел. (раб.): 89244298396

E-mail: kayur-prim@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7554-1002



Для цитирования:

Панчук М.О., Юрманов А.П., Коноплин А.Ю. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИНСПЕКЦИИ ПРОБЛЕМНЫХ УЧАСТ-КОВ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ АНПА // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХ-НИКА. 2025. № 2 (52). С. 41–52. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_52_02_04. EDN: QMEQLB.

AUTOMATIC INSPECTION SYSTEM FOR PROBLEM SECTIONS OF EXTENDED OBJECTS USING AUV

M.O. Panchuk, A.P. Yurmanov, A. Yu. Konoplin

The article is focused on the development of a system of automatic inspection of problematic sections of extended objects using autonomous unmanned underwater vehicles (AUVs) equipped with technical vision systems (TVS), in particular, multibeam hydroacoustic sonars. The proposed system allows to dynamically build a three-dimensional model of the pipeline in real time on the onboard computer of the AUV on the based-on point clouds received from the STS. Based on this model, the position of the extended object in space and its curvature, as well as the level of pipe sinking into the sea bottom ground are automatically determined. The calculated parameters make it possible to identify potentially dangerous areas subject to deformation or damage. The data obtained should be used to adjust the vehicle mission in order to conduct a detailed follow-up survey of the identified areas of interest, and can also be sent to the operator's post using the hydroacoustic communication channel with the vehicle.

The software implementation of the system is performed in the Python language using open libraries for processing three-dimensional data. Numerical modeling of the pipeline inspection process was carried out in CoppeliaSim environment, the obtained results confirmed the performance and efficiency of the proposed system.

Keywords: unmanned underwater vehicle, inspection of extended objects, point clouds, mathematical model, technical vision system, underwater pipeline, multibeam sonar, underwater operations.

References

1. Shukla A., Karki H. Application of robotics in offshore oil and gas industry - A review Part II // Robotics and Autonomous Systems. 2016. Vol. 75. P. 508-524.

2. Zingaretti P., Zanoli S.M. Robust real-time detection of an underwater pipeline // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 1998. Vol. 11, Issue 2. P. 257–268.

3. Kim M.-G., Kang H., Lee M.-J., Cho G. R., Li J.-H., Yoon T.-S., Ju J., Kwak H.-W. Study for Operation Method of Underwater Cable and Pipeline Burying ROV Trencher using Barge and Its Application in Real Construction // J. Ocean Eng. Technol. 2020. Vol. 34 (5). P. 361–370.

4. Martin-Abadal, Miguel & Piñar-Molina, Manuel & Martorell, Antoni & Oliver, Gabriel & Cid, Yolanda. Underwater Pipe and Valve 3D Recognition Using Deep Learning Segmentation // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 9 (5).

5. Bobkov V., Shupikova A., Inzartsev A. Recognition and Tracking of an Underwater Pipeline from Stereo Images during AUV-Based Inspection // J. Mar. Sci. Eng. 2023. Vol. 11.

6. Xiong C.-B., Li Z., Zhai G.-J., Lu H.-L. New method for inspecting the status of submarine pipeline based on a multi-beam bathymetric system // Journal of Marine Science and Technology. 2016. Vol. 24.

7. Jacobi M., Karimanzira D. Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs // 2014 Oceans. St. John's, NL, Canada, 2014. P. 1–6.

8. Midtgaard Øivind, Krogstad Thomas, Hagen Per Espen. Sonar detection and tracking of seafloor pipelines // Underwater Acoustic Measurements (UAM). Kos, Greece, 2011.

9. Mai C., Pedersen S., Hansen L., Jepsen K.L., Yang Z., Subsea Infrastructure Inspection: A Review Study // IEEE International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS). 2016. P. 71–76. 10. Sang I-C., Norris W.R. An Autonomous Underwater Vehicle Simulation with Fuzzy Sensor Fusion for Pipeline Inspection // IEEE Sensors Journal. 2023. Vol. 23, No. 8. P. 8941–8951.

11. Jacobi M., Karimanzira D., Underwater pipeline and cable inspection using autonomous underwater vehicles // MTS/IEEE OCEANS. Bergen, 2013. P. 1–6.

12. Ghis S., Fischer E. Record-Setting AUV Pipeline Inspection in Deepwater West Africa // Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA. 2017, P. 20–26.

13. Chen H., Zhu C., J. Chen, Y. Peng and J. Yao. Design of Unmanned Surface Vehicle for Submarine Pipeline Detection // IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2018. P. 198–202.

14. Xiang X, Jouvencel B, Parodi O. Coordinated Formation Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles for Pipeline Inspection // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2010. Vol. 7(1).

15. Reid A. Rov market prospects. URL: http://www.subseauk.com/ documents/presentations/ssuk%20%20rov%20event%20%20sep%20 2013%20%5Bweb%5D.pdf. 2016

16. Konoplin A.Ju., Konoplin N.Ju., Shuvalov B.V. Podhod k vypolneniju ANPA tehnologicheskih manipuljacionnyh operacij s razlichnymi podvodnymi ob#ektami // Podvodnye issledovanija i robototehnika. 2019. № 1. S. 31–37. [In Russ.]

17. Segal A., Haehnel D., Thrun S. Generalized-ICP // Robotics: Science and Systems V. 2010. Vol. 2, No. 4. P. 435.

18. Approksimacija funkcii. URL: https://planetcalc.ru/5992/ [In Russ.]

19. Sacchi R., Poliakoff J. F., Thomas P. D. and Hafele K-H. Curvature estimation for segmentation of triangulated surfaces // Second Inter-

SYSTEMS, TECHNOLOGIES AND EXPERIMENTS

national Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. Ottawa, ON, Canada, 1999. P. 536–543.

20. Strongina N.R. Chislennye metody: Interpoljacija kubicheskimi splajnami. Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij gosuniversitet, 2021. P. 1-35. [In Russ.]

21. Erich Hartmann, On the curvature of curves and surfaces defined by normalforms // Computer Aided Geometric Design. 1999. Vol. 16, Issue 5. P. 355–376.

22. Underwater Acoustic Modems 18/34 URL: https://evologics.de/ acoustic-modem/18-34.

23. Catipovic J., Brady D., Etchemendy S. Development of underwater acoustic modems and networks // Oceanography. 1993. Vol. 6. P. 112–119.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

PANCHUK Maksim Olegovich, junior researcher

Job: Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;

Far Eastern Federal University

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Research interests: automatic control of underwater robots and manipulators, technical vision systems, underwater operations **Phone**: 89996170369

E-mail: my_panchuk@mail.ru **ORCID**: 0009-0006-2738-6347

YURMANOV Aleksandr Pavlovich, scientific researcher

Job: Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;

Far Eastern Federal University

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Research interests: automatic control of underwater robots and manipulators, technical vision systems, underwater operations **Phone**: 89146786060

E-mail: yurmanov_a@mail.ru ORCID: 0000-0001-6849-3700

KONOPLIN Aleksandr Jurevich, leading researcher

Job: Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;

Far Eastern Federal University

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Research interests: automatic control of underwater robots and manipulators, technical vision systems, underwater operations **Phone**: 89244298396

E-mail: kayur-prim@mail.ru ORCID: 0000-0001-7554-1002

Recommended citation:

Panchuk M.O., Yurmanov A.P., Konoplin A.Yu. AUTOMATIC INSPECTION SYSTEM FOR PROBLEM SECTIONS OF EXTENDED OBJECTS USING AUV. UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS. 2025. No. 2 (52). P. 41–52. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_52_02_04. EDN: QMEQLB.

