

Алгоритм динамического окна для навигации автономных подводных аппаратов¹

Аннотация. Среди множества навигационных методов подводных аппаратов можно выделить подход Динамического окна, впервые предложенный ученым Фоксом и его соавторами.

В данной статье предложена доработка алгоритма динамического окна (АДО), ориентированного на морскую среду, расширенного до метода манипулирования аппаратом в трехмерном пространстве (3D). Эксперименты проводились с использованием среды MATLAB для подтверждения эффективности алгоритма.

Ключевые слова: алгоритм динамического окна, автономный неуправляемый подводный аппарат, 3D-пространство, обход препятствий.

Введение

Автономный неуправляемый (беспилотный) подводный аппарат (АНПА) представляет собой морского робота, перемещающегося под водой с целью сбора необходимых данных о различных условиях океанского дна, структуре верхнего слоя осадка или наличии объектов и препятствий [1]. Интеллектуализация системы управления машиной очень важна для достижения цели в условиях плохой видимости и при других непредвиденных обстоятельствах [2]. В связи с этим самой главной проблемой, имеющей отношение ко всем существующим мобильным устройствам, движущимся независимо от контроля со стороны человека, является навигация. Одно из исследований, проделанных разработчиками для решения задачи навигации нескольких аппаратов, описано в работе [3].

В ней описывается метод безопасного движения большого числа независимых подводных аппаратов в открытом море. Для тех же целей в статье [4] был использован генетический алгоритм, а сама группа роботов была охарактеризована как мульти-агентная система.

Для успешного передвижения в подводном мире бортовая система робота должна уметь строить маршрут, контролировать параметры движения и придерживаться курса и траектории в режиме реального времени. Одно из решений для выполнения вышеизложенных критериев является внедрение относительно нового подхода контроля движением аппарата, именуемого алгоритмом динамического окна. Фокс, Бургард и Трун были первыми учеными, предложившими его в 1995 г. [5]. Это событие привело к тому, что представление об автоматическом контроле робота в непостоянной среде изменилось, и у робота появилась возможность двигаться на высоких скоростях. Таким образом, само динамическое окно может быть охарактеризовано как область на карте, отображающая препятствия, зависящая от скорости аппарата и изменяющаяся динамически.

В первом разделе статьи представлен обзор некоторых существующих работ и описаны их основные идеи, во втором - рассмотрены автономные подводные аппараты, их характеристики и роль в робототехнике, в третьем - подробная информация о предлагаемом подходе.

¹ Исследование выполнено при поддержке Программы фундаментальных научных исследований при Национальном исследовательском фонде Республики Корея (National Research Fund), финансируемой Министерством образования, науки и технологии (№ 2012R1A1A2038601).

И, наконец, результаты экспериментов показаны в конце статьи.

1. Обзор состояния

На сегодняшний день существует множество методов и подходов, применяемых в робототехнике, которые обеспечивают безопасное движение объектов от начальной точки до цели с возможностью обходить препятствия. Большинство из них было разработано для редко меняющейся среды, поэтому было невозможно управлять и принимать решения в тех случаях, когда приходится сталкиваться с изменчивыми условиями. Подход Динамического окна, который впервые был предложен учеными Фоксом, Бургардом и Тринном в 1997 г. [5], изменил представление об автоматическом управлении объектов в нестабильных условиях, обеспечивая при этом возможность перемещения робота на высоких скоростях.

Динамическое окно - это область обнаружения препятствий, отображение которого меняется динамически в зависимости от скорости судна. Остальная часть поверхности на карте, на расстоянии нескольких метров от судна, будет неясной и даже невидимой до определенного момента времени по мере продвижения робота [6]. Этот метод основан на подсчете и изменении всех значений после заданного короткого промежутка времени, что позволяет роботу менять направление и скорость движения очень быстро, в соответствии с изменением ситуации вокруг, а также с учетом окружающего пространства (названным «поисковым пространством»). Это пространство зависит от скорости робота и времени обновления видимой области.

Алгоритм динамического окна не только выбирает и строит наиболее подходящие траектории движения от начальной до конечной точки, но также контролирует скорость аппарата. Это осуществляется следующим образом: когда робот должен остановиться в связи с появлением препятствий на пути, алгоритм снижает скорость робота. В то же время, когда есть возможность ускориться - скорость увеличивается при необходимости, в зависимости от маршрута следования и наличия предметов и одушевленных объектов на своем пути. Все это должно быть сделано динамически, т.е. на ходу.

Изначально предполагалось, что данная технология будет использована в роботах, обслуживающих персонал в офисах [5, 7]. Другой практический пример реализации приведен в [8], где робот с интегрированной системой был испытан во время его эксплуатации в музее, с целью проведения различных экскурсий для посетителей. В этом проекте АДО был разработан в комбинации с алгоритмом локализации Маркова с целью избегания столкновений с тяжело сканируемыми препятствиями, такими как стекло, гладкий металл и другие виды мебели и оборудования, которые не видны для большинства датчиков.

Число ученых, заинтересованных в этом методе увеличилось в течение нескольких десятилетий. Этот факт свидетельствует об эффективности алгоритма. Среди этих исследователей можно выделить инженеров Брука и Хатиба, работа которых [6] отличается от исследований Фокса и многих других в способе разработки алгоритма АДО для голономных роботов, в то время как Фокс изначально применил этот метод для роботов с синхронным приводом [7]. Также пространство поиска в подходе Фокса было квадратной формы, тогда как в подходе Брука, это была окружность.

Исследователи стали совершенствовать вычисления и уравнения АДО после того, как заметили тот факт, что робот, скорее всего, уйдет далеко от цели и увеличит скорость в некоторых случаях при максимизации целевой функции. Именно поэтому подход в работе [9] был изменен четырехступенчатым алгоритмом. Такой подход должен быть более эффективным по сравнению с первоначальным АДО, так как робот с планированием целевого движения может уменьшить свою скорость до изменения направления во время обнаружения препятствий. В то время как робот с начальной версией АДО движется слишком быстро, чтобы иметь возможность остановиться перед препятствием в некоторых ситуациях.

Отличие исследования, проведенного Демистером и пр. [10] от многих других в том, что они взяли под рассмотрение кинодинамические ограничения и геометрию робота, но, как и в других методах, они попытались предотвратить появление проблемы локальных минимумов. Алгоритм предупреждения столкновений был интегрирован в робота инвалидной коляски, некруглой и неголономной по своей природе.

Окружающая среда была представлена в форме сетки (местная оккупированная C-shape форма) во время построения свободного пространства конфигурации.

Цель алгоритма OAWPF с 3D-интеграцией, представленная в [11], была предложена для того, чтобы справиться с динамикой всей окрестности в связи с изменчивыми условиями среды Средиземноморского дна. Одной из главных особенностей предлагаемого алгоритма является то, что он предоставил возможность судну огибать препятствия, двигаясь вверх или вниз (в 3D виртуальной среде), вместо того чтобы двигаться только вправо или влево.

Авторы Седер и Петрович [12] выделили различия между глобальным и локальным путями планирования и описали идею объединения этих двух методов в одном алгоритме безопасного движения, свободного от столкновений. Идея предлагаемого подхода включала в себя комбинирование целенаправленной D* и АДО алгоритмов, чтобы сделать результаты обхода препятствий более эффективными. Исследование было основано на их предыдущей работе [13], но она была улучшена с некоторыми изменениями, которые дали роботам возможность избежать столкновения даже с динамически движущимися объектами.

Еще одна попытка улучшения глобального АДО была сделана исследователями [14], которые пытались использовать клотоидные кривые, а не круг, что сделало процесс планирования движения более реальным и близким к модели движущейся машины.

Виртуальный алгоритм Field Force был изменен и развернут на MVFF исследователями в другой статье [15]. Развертывание было сделано путем добавления нечеткой логики для того, чтобы обеспечить безопасное отслеживание без столкновений. Традиционная VFF основана на двух векторах силы: притяжения (по направлению к цели) и отталкивания (против препятствий), однако, в предлагаемом MVFF был интегрирован дополнительный вектор силы. Этот метод имеет большое сходство с предложенным в этой статье способом обнаружения препятствий: оба этих подхода используют сферу (в 3D-измерении), как пространство для управления, контроля и обнаружения препятствий вокруг судна на расстоянии, равном радиусу круга.

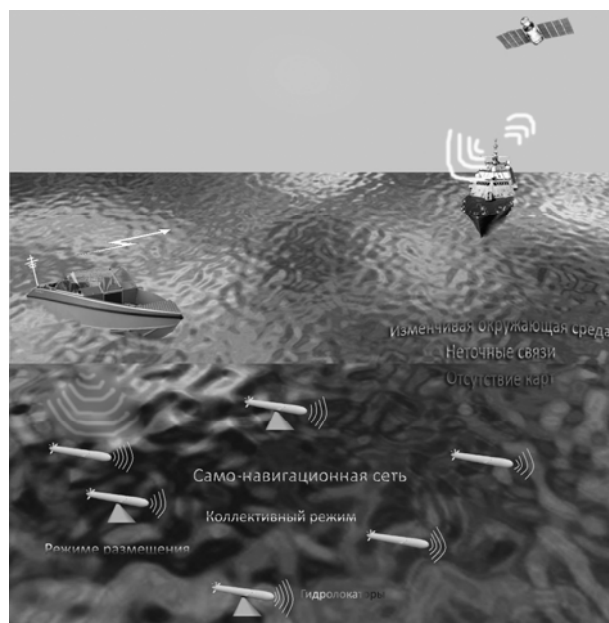


Рис. 1. Динамический подводный мир

2. Автономные подводные аппараты и их роль

Для описания предложенного алгоритма будет представлена общая информация о морском мире и навигационных системах, чтобы доказать эффективность и надежность алгоритма, а также показать значимость научного распространения.

Автономный неуправляемый подводный аппарат (АНПА) - это морской робот, автоматическая самодвижущаяся машина с некоторым исследовательским оборудованием на борту, которое движется под водой с целью сбора информации о топографии дна и наличии каких-либо объектов. АНПА имеет возможность выполнять предложенные миссии в режиме автоматического управления, используя необходимое программное обеспечение (ПО) и планируя свое поведение на основании информации, полученной с корабля через гидроакустический канал связи (Рис.1).

Гидролокаторная система связи отвечает за передачу команд на борт машины и переправку информации обратно на корабль. Обычно океанская среда очень опасна и полна объектами, передвигающимися независимо друг от друга от одной точки к другой. Поэтому одной из главных способностей, присущих роботу, должна быть функция безопасного обхода этих объектов. Одна из работ по этой теме [3]

описывает решение проблемы навигации много аппаратных систем, используя неопределенную логику и подсчет ТСРА, ДСРА и bearing для успешного передвижения роботов под водой без каких-либо столкновений между собой.

2.1. Представление автономных подводных роботов в 3D измерении

Для симуляции и отображения поведения физических систем, относящихся к робототехнике, используется аналитическая модель. Этот процесс отвечает за операции анализа сцены и окружающей ситуации в общем, навигации, передвижения, сохранения данных о среде. Степени свободы (СВ) на основании кинематической модели используются для отображения и анализа предлагаемых форм и представлений движения робота.

Кинематическая модель 6-СВ основана на поступательном движении, представленном координатной системой XYZ, совместно с фреймом углов Эйлера, и вращательным движением, включая крен, тангаж и рыскание. Эти движения управляются с помощью моделирования динамического движения в трехмерном представлении, где АНПА принимает форму строго нелинейного аспекта. Оценка навигационных показателей имеет высокий приоритет в системе навигации. Среди них: поступательная и вращательная скорости (v^b , w^b), являющиеся основой координат скоростей v ; поступательная и вращательная позиции (p^n , θ), являющиеся основой для координат позиции и ориентации η , и как заключительная переменная - навигационная позиция x [16]:

$$\begin{aligned} v^b &= \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad w^b = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \quad p^n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}, \\ v &= \begin{bmatrix} v^b \\ w^b \end{bmatrix}, \quad \eta = \begin{bmatrix} p^n \\ \theta \end{bmatrix}, \\ x &= \begin{bmatrix} v \\ \eta \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

В формуле (1) переменные b и n обозначают системы отсчета, называемые BODY и NED.

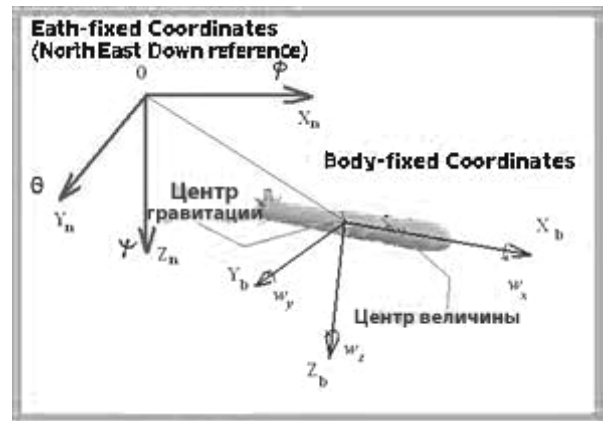


Рис. 2. Системы отсчета NED и BODY

Первая система (Body-fixed frame), относящаяся к роботу, описывает его динамику, в то время как система NED (North East Down reference frame), используемая для небольших расстояний, упрощает подход к координатам, считая Землю плоской (Рис. 2).

Для определенных параметров кинематики можно вычислить уравнения движения в режиме компьютерного дизайна [17]. Следующая формула описывает кинематическую модель аппарата в 3D-пространстве:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \cos \psi \\ v \cos \theta \sin \psi \\ -v \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix},$$

где ϕ , θ , ψ - координаты позиций вращения; ω_x , ω_y , ω_z - угловые скорости вокруг трёх неподвижных осей (body reference frame).

Существует множество алгоритмов для управления роботами в трехмерном пространстве [18-20]. Один из них будет предложен в статье.

3. Новый навигационный подход

3.1. Алгоритм динамического окна

Ограничения автономных навигационных методов привели к тому, что ученые стали уделять больше внимания планированию в режиме реального времени. Такой вид проектирования

основан на знаниях, полученных от зондирования локальной территории для обработки неизвестных препятствий по мере передвижения робота в той среде, в которой он находится. Похожие характеристики относятся и к предложенному нами подходу, который описан в данной статье. Он основан на алгоритме динамического окна (АДО). Сначала мы опишем начальный вариант АДО, затем в следующем разделе изложим новый подход, названный Глобальный 3D АДО.

АДО предназначен для предотвращения столкновений робота, передвигающегося на большой скорости в опасной и тесной среде, причем решалась проблема динамики робота, с учетом лишь скорости аппарата.

АДО вырабатывает пути расширения ограничений скорости и ускорений и предоставляет возможность генерировать команды управления за короткий промежуток времени. Этот подход основан на двумерном пространстве, основываясь на двух видах скоростей. Пара величин (v, w) используется для установки скорости, где v - поступательная скорость, а w - вращательная. Множество значений (v, w) включает в себя некоторый набор скоростей, при которых робот может затормозить в случае предотвращения столкновений. Эти пары значений названы допустимыми скоростями, образующими Динамическое окно с текущей скоростью в центре.

Допустимые скорости, обозначенные на Рис. 3 как множество V_a , высчитываются по следующей формуле:

$$V_a = \left\{ (v, w) \left| v \leq \sqrt{2 \cdot \text{dist}(v, w) \cdot \dot{v}_b} \wedge w \leq \sqrt{2 \cdot \text{dist}(v, w) \cdot \dot{w}_b} \right. \right\} \quad (3)$$

где (v, w) - это набор поступательных и вращательных скоростей, которые могут также быть выражены в виде вектора скорости $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$; $\dot{v}_b$ и $\dot{w}_b$ - ускорения при повороте; $\text{dist}(v, w)$ - расстояние между аппаратом и ближайшим препятствием вдоль траектории, по которой движется робот.

Для поиска множества допустимых скоростей используется целевая функция, путем увеличения ее до предела:

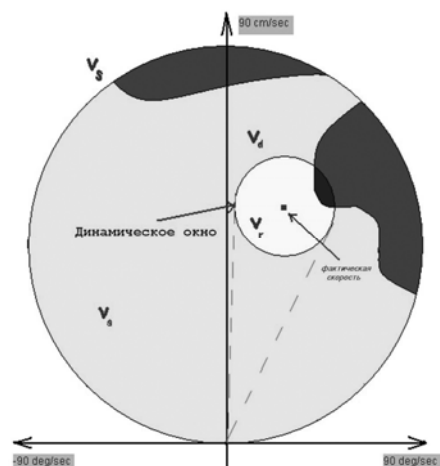


Рис. 3. Динамическое окно

$$G(v, w) = \delta(\alpha \cdot \text{heading}(v, w) + \beta \cdot \text{dist}(v, w) + \gamma \cdot \text{vel}(v, w)), \quad (4)$$

где $\text{heading}(v, w)$ - переменная, указывающая на процесс движения робота к цели; $\text{vel}(v, w)$ - поступательная скорость, обеспечивающая быстрое передвижение робота.

Общее пространство поиска V_s сводится к Динамическому окну, содержащему набор скоростей V_d , которые могут быть достигнуты в течение следующего интервала времени t . Это пространство скоростей Динамического окна высчитывается по формуле:

$$V_d = \left\{ (v, w) \left| v \in \left[v - \dot{v}_b \cdot t, v + \dot{v}_a \cdot t \right] \wedge w \in \left[w - \dot{w}_b \cdot t, w + \dot{w}_a \cdot t \right] \right. \right\} \quad (5)$$

где v и w - фактические скорости, а $\dot{v}_a$ и $\dot{w}_a$ - значения ускорений поступательного и вращательного движений.

Как показано на Рис.3, область скоростей V_s включает в себя скорости V_a , в то время как пространство V_d охватывает скорости из множества V_r . Следовательно, результирующая область поиска может быть представлена в виде обхождения по ограниченному пространству:

$$V_r = V_s \cap V_a \cap V_d. \quad (6)$$

Для наглядного описания логики АДО мы построили UML-диаграмму, отражающую процесс навигации робота (Рис. 4). Во-первых, высчитываем желаемую скорость аппарата для

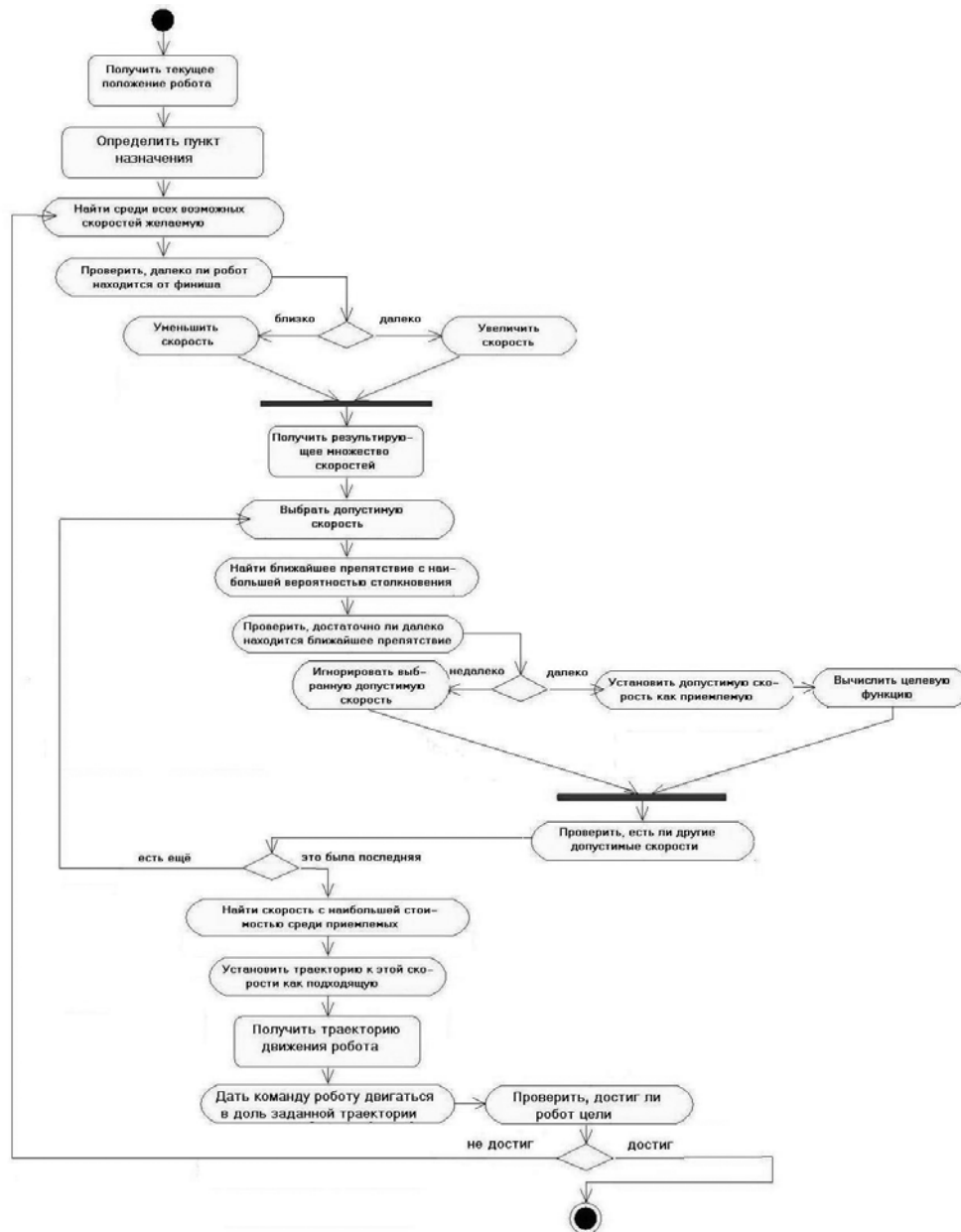


Рис. 4. Схема технологического управления (UML) предлагаемого подхода

достижения целевой точки, при этом учитывая текущее положение робота. Во-вторых, алгоритм находит допустимые линейную и угловую скорости, основываясь на динамике робота. Следующий процесс должен повторяться в цикле для всех допустимых скоростей: определить ближайшее препятствие на пути робота, идущего с предлагаемой скоростью; проверить равенство тормозного пути и расстояния до ближайшего препятствия. Затем следует определить, является ли выбранная скорость приемлемой. Следующий шаг - это вычисление целевой функции, состоящей из значений

направления движения и промежутка. Последним этапом является определение себестоимости предложенной приемлемой скорости и сравнение ее со всеми остальными скоростями. Если величина оказалась самой подходящей, тогда скорость считается лучшей. В результате эта скорость устанавливается в подходящую траекторию робота.

3.2. Алгоритм динамического окна в 3D

В предыдущем разделе мы описали принципы АДО. Следующим шагом к реализации нового метода навигации будет разработка управ-

ления движением в системе 6-СВ. Для осуществления данной идеи трехмерное пространство конфигурации (3D-Cspace) будет ограничено до трехмерного динамического окна. Это окно должно быть увеличено до формы шара (сферы) с радиусом r , который включает в себя состояние окружающей среды транспортного средства (препятствие и само АНПА) на расстоянии, равном r . Общее представление этой области показано на Рис.5.

Что касается глобальных систем координат, то робот в текущей позиции во временной период t имеет координаты $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$ для трех осей. Множество значений (x, y, z, Θ) определяет кинематические конфигурации робота, где $\Theta(t)$ - ведущее направление, или ориентация.

Уравнения движения для трех осей координат:

$$x(t_i) = x(0) + v_x t_i + \int_0^{t_i} a_x t dt = x(0) + v_x t_i + \frac{1}{2} a_x t_i^2,$$

$$y(t_i) = y(0) + v_y t_i + \int_0^{t_i} a_y t dt = y(0) + v_y t_i + \frac{1}{2} a_y t_i^2,$$

$$z(t_i) = z(0) + v_z t_i + \int_0^{t_i} a_z t dt = z(0) + v_z t_i + \frac{1}{2} a_z t_i^2. \quad (7)$$

Одно из заключений, которое можно сделать, основываясь на формулах (7), что робот движется по квадратичной кривой с целью получения конкретной команды изменения скорости при ускорении с неизменным темпом. И это продолжается до тех пор, пока желаемая скорость не будет достигнута роботом [6, 18]. Хотя кардиоиды этих сферических кривых зависят от величины ускорения, ее значение и кривизна взаимно пропорциональны. К примеру, малая величина ускорения ведет к образованию малой кривизны траектории и позволяет моделировать ускорение, схожее с автомобилем [5].

Динамическое окно представлено в виде множества скоростей Vd , доступных в течение следующего периода t (5). На Рис.6 изображены вероятные траектории движения робота в морской среде 3D. Другой показатель, относящийся к движению робота по траектории, называется мерой выравнивания пути v_{path} (8) [13]:

$$v_{path}(v, w) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{Nt} \sum_{j=1}^{Np} id_{ij} - D_{min}}{D_{max} - D_{min}}, \quad (8)$$

где Nt - бесконечное множество точек на траектории; Np - множество точек на эффективном пути (Рис. 7); d_{ij} - Евклидово расстояние между

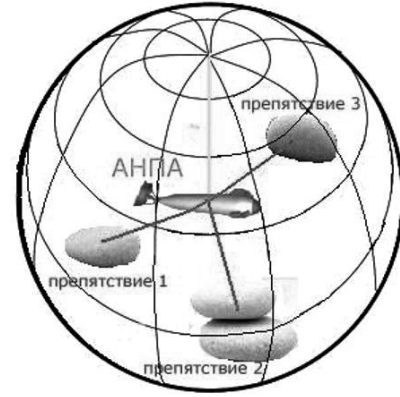


Рис. 5. Упрощенное представление АДО в 3D

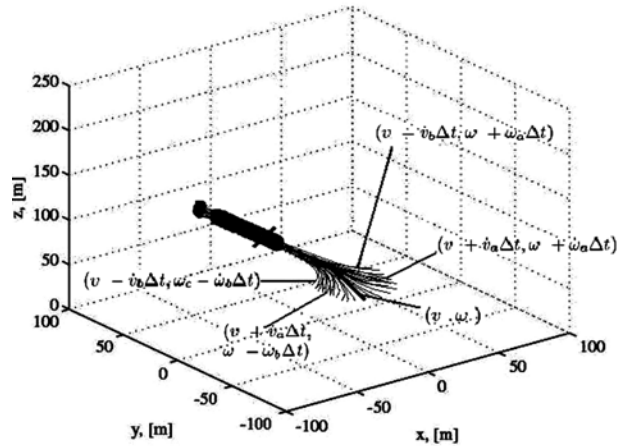


Рис. 6. Возможные траектории робота в 3D-морском пространстве

двумя точками i (на траектории) и j (на линии эффективного пути); D_{max} и D_{min} - два ограниченных значения числа точек на кривой, максимальное и минимальное, соответственно.

3.3. Комбинация навигационных алгоритмов. Глобальный 3D алгоритм динамического окна

В настоящее время эффективный навигационный метод обычно представляет собой систему алгоритмов, генетически связанных друг с другом. В этом случае режим автономного мониторинга комбинируется с режимом навигации реального времени (АДО) при наличии простой карты местности и эффективного алгоритма планирования. За первую часть отвечает автономный планировщик, который ищет наилучший глобальный путь от начальной до конечной точек, в то время как главной задачей второй части является предотвращение столкновений с неизменными объектами. Этот

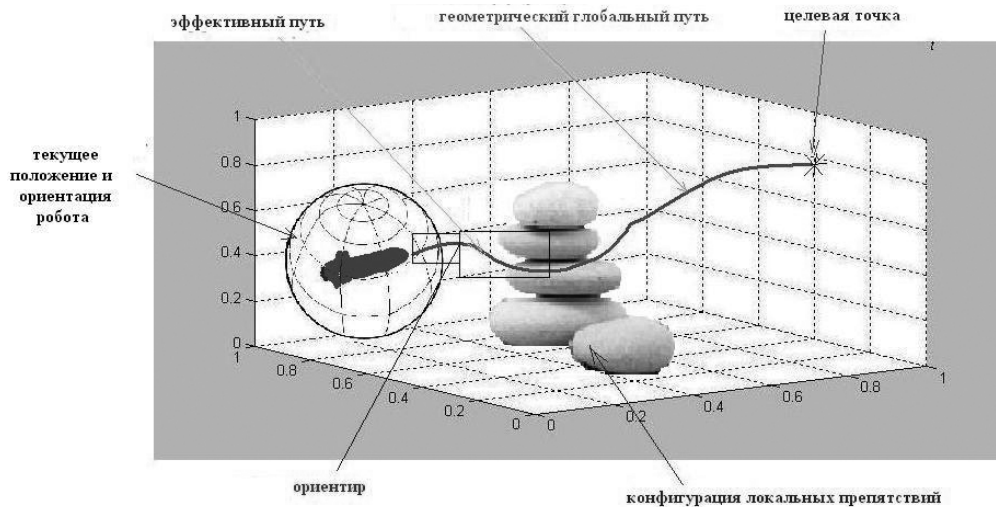


Рис. 7. 3D- представление x - y - z маршрута АНПА по направлению к цели с множеством препятствий

процесс осуществим с помощью замены части спланированного оптимального глобального пути на вспомогательный маршрут [21].

Предложенный алгоритм является эволюционным навигатором, который совмещает в себе автономный режим и режим реального времени с картой высокой точности и эффективным подходом планирования. Сначала алгоритм читает карту, затем получает начальные и конечные координаты, строит оптимальный маршрут. По мере движения алгоритм заменяет часть линии на сгенерированный на ходу путь при появлении неожиданных объектов.

Глобальный алгоритм динамического окна (ГАДО) был предложен Бруком и Хатибом в работе [6]. По своей натуре АДО не имеет никакого представления о соединении точек на линии пути в открытом пространстве. Из этого следует, что для работы над этим недостатком АДО надо использовать в паре с алгоритмом планирования движения. Этот "помощник" находит то направление движения, при котором путь будет очищен от препятствий вплоть до конечной точки. Эта идея является основой предложенного подхода.

Одним из наиболее подходящих алгоритмов, строящих глобальный маршрут, является алгоритм NF-1 (Neuro-Fibromotosis type-1). ГАДО считывает данные с сенсора и переносит информацию об окружающем пространстве в форму сетки, своеобразную карту, где робот изображен в виде точки. Этот подход упрощает процесс планирования маршрута в том плане, что робот будет расценивать пустые клетки как пространства, свободные от препятствий.

В то время как ГАДО является расширением АДО, становится очевидным, что он будет использовать ту же логику и вычисления, что и его предшественник. Главным отличием между ними является представление целевой функции (4), которая высчитывает вероятность выбора между потенциальными направлениями движения робота. Новая функция, представленная ниже, усовершенствована добавлением переменной $no1(v, w)$ вместо $heading(v, w)$, которая централизует маршрут аппарата по направлению к цели:

$$G(\vec{s}, v, w, \vec{a}) = \delta(\alpha \cdot nf1(v, w) + \beta \cdot dist(\vec{s}, v, w, \vec{a}) + \gamma \cdot vel(v, w) + \varepsilon \cdot \Delta nf1(\vec{s}, v, w, \vec{a})) \quad (9)$$

Для определения значения $no1(v, w)$ следует согласовать величину веса $nf1$ с ячейками, расположенными по соседству с роботом на сетке карты. Также функция $nf1(\vec{s}, v, w, \vec{a})$ отображает, в какой степени команда движения будет уменьшать расстояние между текущим положением аппарата и финишной точкой во время следующего повторения.

Выше мы описали несколько подходов к управлению роботами. Отсюда можно сделать вывод, что предложенный 3D ГАДО является одним из лучших методов навигационной системы АНПА в небезопасной морской среде. Причина данного заявления основывается на том, что данный алгоритм отвечает всем требованиям, относящимся к навигационным алгоритмам. В соответствии с информацией, изложенной ранее в этой работе, было продемонстрировано, что 3D ГАДО является навигационным подходом, спо-

собным безопасно перемещать робота без риска столкновений, двигаясь на высоких скоростях.

Подводя итоги, во время первой части предложенного навигационного алгоритма (автономный планировщик) робот ищет оптимальный глобальный маршрут от старта до финиша. В то время как вторая часть с 3D АДО отвечает за обработку потенциальных столкновений или контроль взаимодействия с прежде неизвестными объектами. Во время выполнения второй части алгоритма, изначальный глобальный маршрут заменяется динамически сгенерированным субоптимальным путем следования. И наконец, в экспериментах, проводимых в предыдущих работах и в исследованиях, изложенных в этой статье, было доказано, что данный метод может управлять роботом, направляя его по курсу, свободному от препятствий, и передвигаясь настолько быстро, насколько это позволяет платформа и характеристики аппарата. Основываясь на данных выводах, 3D ГАДО был выбран для последующей реализации и тестировании.

4. Результаты эксперимента

Мы провели ряд тестов, чтобы оценить работоспособность предлагаемого метода навигации. Программный комплекс MATLAB был выбран для выполнения подсчетов и отрисовки макета результирующего маршрута, как показано на Рис. 8–Рис.10.

Эксперименты показали, что алгоритм исправно выполняет возложенные на него задачи навигации, а именно, он выстраивает самый оптимальный путь от начальной до конечной точки. В тоже время, алгоритм не подвергает АНПА риску столкновения с запрограммированными препятствиями.

К тому же, 3D ГАДО предоставляет возможность контроля и мониторинга динамически меняющихся значений скорости. Как показано на Рис.10, скорость робота изменяется (увеличивается или уменьшается) в зависимости от маршрута следования, наличия объектов на пути, отдаленности от цели.

Также мы установили значения, используемые в симмуляторе для планирования движения аппарата (Табл.1), которые были сгенерированы, основываясь на базовые требования к роботу, который выполняет относящиеся к АНПА задания.

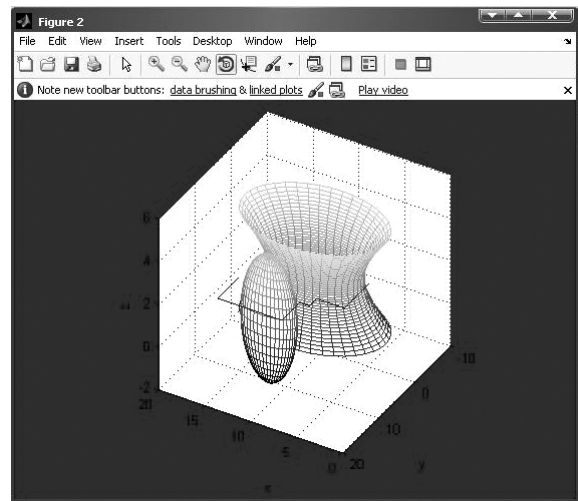


Рис. 8. Главный интерфейс эксперимента в MATLAB

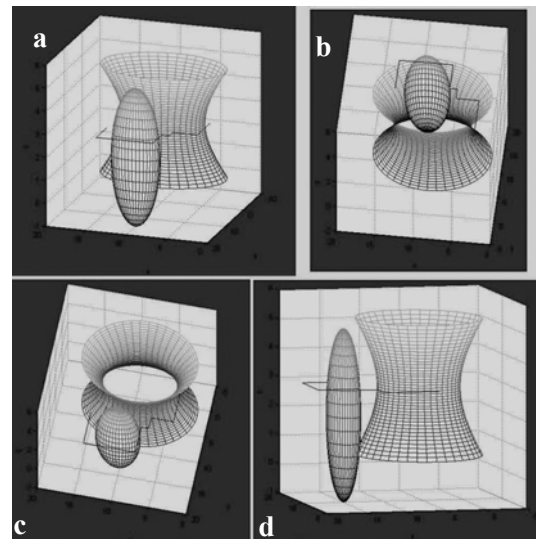


Рис. 9. Результат эксперимента
а- вид спереди; б- вид снизу; с- вид сверху; д- вид сбоку

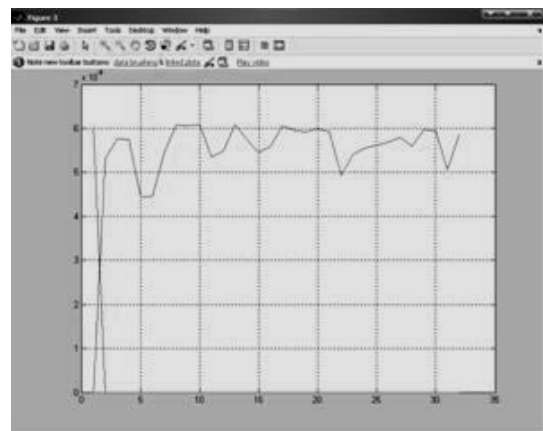


Рис. 10. Графическое представление динамического изменения скорости эксперимента в MATLAB

Табл. 1. Технические характеристики планирования движения, используемые в симуляторе

Технические характеристики	Значение
Максимальная поступательная скорость	$\leq 0,5$ м/с
Минимальная поступательная скорость	≥ 0 м/с
Поступательное ускорение	$0,65$ м/с ²
Максимальная скорость вращения	$\leq 1,57$ рад/с
Минимальная скорость вращения	$\geq -1,57$ рад/с
Угловое ускорение	$1,57$ рад/с ²
Предельная нагрузка процессора для построения маршрута	$< 30\%$
Время для построения глобального пути	12 с
Время до достижения цели	4 с

Заключение

В связи с попытками создания автономно передвигающихся аппаратов и мобильных роботов возник ряд проблем, объединенных одним термином - "задачи навигации". Это относится не только к движению по Земле, но и к движению подводных аппаратов и управляемых ракет.

Глобальный алгоритм навигации охватывает информацию обо всем пространстве вокруг робота, чтобы определить районы, где движение не затруднено, и затем предоставить лучший маршрут следования. Планирование эвристических методов различными способами снижает сложность заданий и чувствительность к ошибкам в предоставленных данных. Таким образом, для разработки системы построения пути следования универсального автономного робота был выбран эволюционный навигационный алгоритм.

Глобальный алгоритм динамического окна был доработан с целью реализации в морском 3D-пространстве. Была доказана его эффективность в решении вопросов навигации АНПА в подводной среде. Использование данного алгоритма позволяет учитывать множество поведений аппарата и аспекты окружающей среды на этапе планирования пути. Однако ключевой недоработкой предложенного метода остается тот факт, что у АНПА пока отсутствует возможность обхода препятствий сверху или снизу. Другой аспект, который должен быть принят во внимание, это динамически движущиеся

препятствия. Они не были протестированы в данной работе. Кроме того, надо полагать, что транспортное средство не осведомлено о точной траектории такого вида препятствий. Решение этих проблем будет основой будущих исследований.

Литература

1. Инзарцев А.В., Матвиенко В.Ю. Визуальная среда разработки заданий для автономных подводных роботов. Подвод. исследования и робототехника. Т.1. 2008. -С.5-10.
2. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В. Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований. Подвод. исследования и робототехника. Т.1. 2006. -С.6-17.
3. Bukhari A.C., Tusseyeva I., Lee B.G., Kim Y.G. An intelligent real-time multi-vessel collision risk assessment system from VTS.view point based on fuzzy inference system," Expert Systems with Applications.2013.
4. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Бычков И.В., Максимкин Н.Н., Хмельнов А.Е., Кензин М.Ю. Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов. Институт проблем морских технологий ДВО РАН (Владивосток). Подвод. исследования и робототехника. Т.2. 2010. - С. 34-43.
5. Fox D., Burgardt W., Thrun S. The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance. IEEE Robotics and Automation Magazine. 1995.
6. Brock O., Khatib O. High-Speed Navigation Using the Global Dynamic Window Approach. Proc. International Conference in Robotics and Automation IEEE. vol.1. 1999. pp.341-346.
7. Fox D., Burgardt W., Thrun S. Controlling Synchro-drive Robots with the Dynamic Window Approach to Collision Avoidance. Proc. IEE/RSJ International Conference of the Intelligent Robots and Systems .vol.3. 1996. pp.1280-1287.
8. Fox D., Burgardt W., Thrun S. A Hybrid Collision Avoidance Method For Mobile Robots. Proc. IEE International Conference on Robotics and Automation.1998.
9. Stachniss C., Burgard W. An Integrated Approach to Goal-directed Obstacle Avoidance under Dynamic Constraints for Dynamic Environments. Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. vol.1. 2002. pp. 508-513.
10. Demeester E., Nuttin M., Vanhooydonck D., Vanacker G., Brussel H.V. Global Dynamic Window Approach for Arbitrarily Shaped Holonomic and Non-holonomic Mobile Robots, pre-print: IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), Edmonton, Canada .2005. pp. 2357 – 2362.
11. Sami A., Ayman M.M., Brisha M. Analysis and Simulation of 3D Trajectory with Obstacle Avoidance of an Autonomous Underwater Vehicle for Optimum Performance, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. vol.12, no.3.2012. pp.43-50.

12. Seder M., Petrovi I. Dynamic window based approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles. In IEEE Electrical Engineering Issue. 2007.
13. Seder M., Macek K., Petrovi I. An integrated approach to real-time mobile robot control in partially known indoor environments. Proc. 31st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2005. pp. 1785-1790.
14. Schröter C., Höchemer M., Gross H-M. A Particle Filter for the Dynamic Window Approach to Mobile Robot Control," International Scientific Colloquium IWK. vol. 1. 2007. pp. 425-430.
15. Youb K.K., Jeongmok Ch., Kwon S-H., Joongseon J. Collision Avoidance of Moving Obstacles for Underwater Robots. Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics. vol.4. n.5. 2006. pp.86-91.
16. Lammas A., Sammut K., He F. 6-DoF Navigation Systems for Autonomous Underwater Vehicles, in: Mobile Robots Navigation, InTech Inc., chapter 3, Rijeka, Croatia. 2010. pp.457-483.
17. Kitamura Y., Tanaka T., Kishino F., Yachida M. 3-D path planning in a dynamic environment using an octree and an artificial potential field, in: IEEE/RSJ International Conference in Intelligent Robots and Systems, Human Robot Interaction and Cooperative Robots. vol.2. 1995. pp. 474 – 481.
18. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for robot manipulator and mobile robots, The International Journal of Robotics Research. vol.5(1). 1996. pp. 90-98.
19. Miller P.A., Farrell J. A., Zhao Y. Djapic V. Autonomous Underwater Vehicle Navigation, Journal of Oceanic Engineering. v.35. 2010. pp.1-17.
20. Naik A. Arc Path Collision Avoidance Algorithm for Autonomous Ground Vehicles, in: Thesis Submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering, Blacksburg. 2005.
21. Bouguet J-Y., Perona P. Visual Navigation using a single camera, in: ICCV. Boston. USA. 1995.

Тусеева Инара Багдатовна. Магистр технических наук Кенсанского национального университета (г. Чинджу, Республика Корея). Окончила Казахский национальный технический университет в 2010 году. Автор одной печатной работы. Область научных интересов: интеллектуальные системы, мягкие вычисления, программное обеспечение, автономные подводные аппараты, базы данных. E-mail: inara.tb@gmail.com

Тусеева Дана Багдатовна. Бакалавр технических наук Международного IT университета (г. Алматы, Казахстан). Область научных интересов: программное обеспечение, интеллектуальные системы, автономные подводные аппараты. E-mail: dana.tuseeva@gmail.com

Ким Юн-Ги. Профессор Кенсанского национального университета (Республика Корея).. окончил Сеульский национальный университет в 1978 году и Университет штата Монтана (США) в 1987 году. Доктор технических наук. Автор более 100 печатных работ. Область научных интересов: мягкие вычисления, интеллектуальные системы и автономные подводные аппараты. E-mail: ygkim@gnu.ac.kr