

В. Ф. Филаретов^{1,2}, д-р техн. наук, filaret@iacp.dvo.ru, Д. А. Юхимец^{1,3}, д-р техн. наук, undim@iacp.dvo.ru,

¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток,

²Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,

³Университет "Иннополис", г. Иннополис

Разработка метода формирования траекторий движения группы подводных роботов в среде с препятствиями во время их обхода¹

Предложен новый метод формирования траекторий движения группы подводных роботов (ПР) в режиме "лидер—ведомые" в заданном строю в неизвестной обстановке, содержащей препятствия. В этом режиме в составе группы выделяется ПР-лидер, который имеет информацию о выполняемой миссии и формирует безопасные траектории своего движения в зависимости от ее цели и обнаруженных препятствий. ПР-ведомые должны двигаться за лидером, в соответствии с выделенным им местом в заданном строю, используя информацию о текущем положении лидера, передаваемую по гидроакустическим каналам связи, и об их расстояниях до препятствий, обнаруживаемых с помощью собственных бортовых дальнометров. Из-за низкой пропускной способности гидроакустических каналов связи возникает проблема согласования положения ПР-ведомых при обходе обнаруженных препятствий, что необходимо для исключения столкновений между ПР группы. Указанная проблема решается в работе с помощью предварительного задания для каждого ведомого единственно возможной для него траектории перемещения внутри строя, которая обеспечит ему безопасное движение относительно других ведомых при обходе конкретного обнаруженного препятствия. Этот подход позволяет при использовании высокоточных систем управления не согласовывать текущие положения ПР-ведомых относительно соседей, что не требует дополнительного обмена данными между ПР группы. В работе был предложен подход к выбору траекторий движения ПР-ведомых внутри строя и метод формирования желаемого положения ПР-ведомых в процессе их движения. Эффективность предложенного метода подтверждена результатами математического моделирования.

Ключевые слова: подводный робот, групповое управление, строевое правление, планирование траекторий, обход препятствий

Введение

В настоящее время перспективным методом повышения эффективности выполнения поисковых и обзорных миссий в подводной среде является использование групп автономных подводных роботов (ПР), которые в процессе выполнения этих миссий должны перемещаться в заранее неизвестной обстановке, содержащей препятствия. Одним из основных видов эффективного группового управления является движение роботов в заданном строю в режиме лидер—ведомые. В этом режиме информацию о заданной миссии имеет только робот-лидер, который с ее помощью форми-

рует свою траекторию движения. Роботы-ведомые при их движении получают информацию о текущем положении лидера и рассчитывают свое желаемое положение исходя из предписанного им места в строю относительно робота-лидера. Это обеспечивает согласованное движение всех роботов группы.

В процессе движения в обстановке с препятствиями все роботы группы должны обходить эти препятствия на безопасной дистанции без столкновений между собой. В настоящее время для решения этой задачи создано много подходов [1]. В большинстве этих подходов использованы различные методы оптимизации [2—5] для планирования траекторий движения роботов. В частности, проблема безопасного движения группы промышленных роботов при выполнении совместных технологических операций была рассмотрена в работе [2], где для предотвращения их столкновений между собой вводилось специальное расписа-

¹Работа поддержана РФФИ (гранты 16-29-04195 и 19-08-00347) и Программой фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым Президиумом Российской академии наук, № 7 "Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники".

ние их движения. Но эти методы можно применять только для рабочей среды с заранее известными препятствиями.

Проблему управления движением группы роботов в неизвестной обстановке можно решить и с помощью методов, основанных на использовании специальных алгоритмов, имитирующих поведение живых организмов в различных ситуациях [6, 7]. Однако эти алгоритмы в основном предназначены для роя роботов, в котором не поддерживается определенный строй. Эти алгоритмы могут быть неприемлемы для выполнения задач, поскольку роевое движение роботов предполагает частый обмен информацией между ними, что сложно реализуемо при малой пропускной способности акустических каналов связи.

Управление движением роботов строем в заранее неизвестной обстановке с препятствиями рассмотрено в работах [8–10], где избегать столкновений с обнаруженными препятствиями предлагается за счет такого изменения типа заданного строя или скорости движения роботов группы, чтобы при обнаружении движущегося препятствия группа пропустила его на безопасной дистанции.

Проведенный анализ показал, что известные методы формирования траекторий движения групп роботов предполагают, что все они получают информацию о текущем расположении друг друга. Это позволяет им согласованно корректировать свои траектории в процессе обхода препятствий и устранять столкновения между собой. Но для ПР этот подход редко реализуем, поскольку гидроакустические каналы связи имеют низкую пропускную способность (только сотни байтов в секунду). При этом передача информации между ПР происходит с большими задержками. Поэтому для группового управления ПР необходимо разработать метод формирования траекторий их движения, не требующий большого обмена данными между роботами группы.

Для решения этой задачи в качестве базового будет использован метод формирования траекторий движения ПР в неизвестной обстановке, используемый в работах [11–14]. Его преимуществом является возможность формирования гладких пространственных траекторий для обеспечения быстрого и точного движения, что особо важно для ПР. Однако указанный метод целесообразно использовать только для формирования траекторий движе-

ния ПР-лидера, поскольку только он имеет информацию о выполняемой миссии и траектории движения всей группы. При этом отсутствие информации у ПР-лидера о текущем положении ПР-ведомых не позволяет ему сразу формировать безопасную траекторию в среде с препятствиями с учетом текущих положений всех ПР-ведомых. Более того, при обходе препятствий сохранение заданного строя ПР нецелесообразно, так как это может ограничивать безопасный проход всей группы в узких местах между препятствиями и увеличивать длину траекторий их обхода в поисках более безопасных участков.

Постановка задачи

В статье рассматривается задача управления группой ПР, движущихся в заданном строю в режиме "лидер—ведомые" в заранее неизвестной обстановке, содержащей препятствия. Группой должен управлять ПР-лидер, который должен иметь полную информацию о выполняемой миссии и формировать безопасные траектории своего движения в зависимости от ее цели и обнаруженных препятствий. ПР-ведомые должны двигаться за лидером в соответствии с выделенным им местом в заданном строю (рис. 1), используя информацию о текущем положении лидера, передаваемую по гидроакустическим каналам связи, и об их расстояниях до препятствий, обнаруживаемых с помощью собственных бортовых дальномеров.

Ставится задача разработки метода формирования траекторий движения ПР-ведомых, который обеспечит их безопасное движение от-

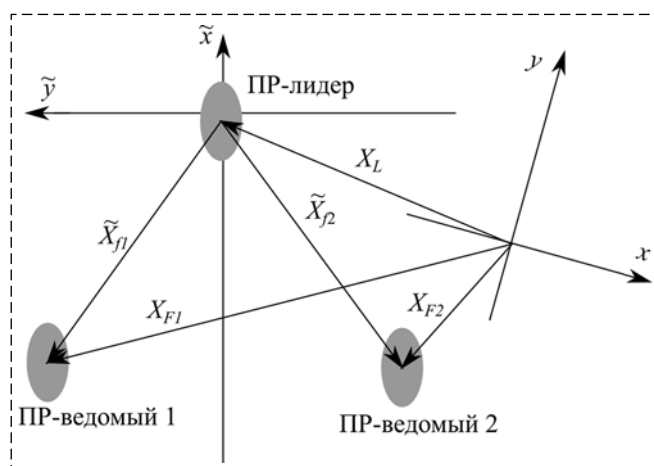


Рис. 1. Формирование строя ПР в режиме лидер-ведомые
Fig. 1. AUV formation in leader-followers mode

носителю препятствий при отсутствии столкновений между разными ПР группы, а также не потребует существенного увеличения обмена данными, передаваемых между всеми ПР в процессе коррекции их траекторий движения.

Описание особенностей движения ПР при решении поставленной задачи

Текущие положения ПР-ведомых в абсолютной системе координат (СК) рассчитываются их информационно-управляющими системами по положению ПР-лидера с помощью следующего выражения (см. рис. 1):

$$X_{Fi} = X_L + R\tilde{X}_{fi}, \quad i = \overline{1, N},$$

где $X_{Fi} \in R^3$ — вектор текущих желаемых координат i -го ПР-ведомого в абсолютной СК; $X_L \in R^3$ — вектор текущих координат ПР-лидера в абсолютной СК, передаваемый ПР-ведомым по каналам связи; $\tilde{X}_{fi} = (\tilde{x}_{fi}, \tilde{y}_{fi}, 0)$ — желаемый вектор смещения i -го ПР-ведомого относительно ПР-лидера в горизонтальной плоскости, заданный в СК, связанной с лидером; $R \in R^{3 \times 3}$ — матрица перехода из связанной в абсолютную СК; N — число ПР-ведомых ПР в группе.

При формировании координат z текущих положений ПР-ведомых они принимаются равной текущей координате z ПР-лидера, так как большинство задач, выполняемых группой, предполагают, что строй всех ПР располагается в горизонтальной плоскости. При необходимости реализации пространственного движения группы ПР с сохранением заданной высоты над дном каждый ПР группы просто будет формировать свою координату z с помощью метода, описанного в работах [13, 14]. В предлагаемом в статье методе при расчете движения всех ПР в одной горизонтальной плоскости векторы координат и матрицы ориентации всех ПР не будут учитывать координаты z .

Все ПР группы имеют бортовые дальнометры, позволяющие определять дистанции до окружающих препятствий и формирующие в процессе движения вектор $D = (d_1, \dots, d_n)$, где n — число соответствующих датчиков. Поскольку движение группы ПР происходит в заранее неизвестной обстановке, то при обнаружении препятствий каждый ПР группы должен корректировать свое движение на основе данных, поступающих от его бортовых даль-

номеров. Эта коррекция должна обеспечивать выполнение следующих требований.

1. Траектория ПР-лидера формируется независимо от остальных ПР группы по методу, описанному в работах [11–14]. Это требование позволяет ПР-лидеру формировать безопасные траектории движения на основе только заданной цели миссии и данных, получаемых от его бортовых дальномеров.

2. Все ПР-ведомые формируют свои траектории движения независимо друг от друга, используя информацию о текущем положении ПР-лидера и данные, поступающие от их бортовых дальномеров. Построение этих траекторий происходит в абсолютной СК с использованием данных, поступающих от бортовых навигационных систем соответствующих ПР-ведомых.

3. Корректируемые траектории движения ПР-ведомых также проходят на безопасном расстоянии от обнаруженных ими препятствий.

4. Корректируемые траектории движения ПР-ведомых исключают столкновения между разными ПР группы, что достигается обеспечением безопасных расстояний между этими ПР в процессе их движения.

5. В процессе обхода препятствий ПР-ведомыми сохранение ими заданного строя не требуется. Это позволяет ПР-лидеру независимо от ведомых формировать траекторию движения в неизвестной обстановке. Кроме того, сохранение строя может существенно увеличить время выполнения миссий или сделать невозможным достижение ее целей, когда проход между препятствиями может оказаться недостаточным для прохода группы ПР заданным строем.

6. Коррекция траекторий движения ПР-ведомых при обходе препятствий не приводит к возрастанию числа передаваемых данных по акустическим каналам связи между ПР группы, так как пропускная способность этих каналов мала и может снизить безопасность перемещения ПР-ведомых внутри строя.

Метод формирования траекторий движения группы ПР

Основной проблемой при формировании траектории движения каждого ПР-ведомого в процессе обхода им препятствий является согласование этой траектории с траекториями остальных ПР для исключения столкновений между всеми ПР-ведомыми. В этом

случае каждый из этих ПР должен иметь информацию о текущем положении остальных ПР группы, так как изменение положения в строю одного ПР-ведомого может потребовать изменения положения других ПР. Однако из-за низкой пропускной способности гидроакустических каналов связи реализовать обмен данными между всеми ПР группы (а их число может быть большим) с достаточной частотой редко бывает невозможным.

Однако поскольку желаемое положение всех ПР-ведомых задается относительно ПР-лидера, то для каждого ведомого заранее можно задать единственно возможную для него траекторию перемещения внутри строя, которая обеспечит ему безопасное движение относительно других ведомых при обходе конкретного обнаруженного препятствия. В этом случае при использовании высокоточных систем управления ПР-ведомых можно не согласовывать их текущие расположения относительно соседей, вводя непрерывную передачу многих дополнительных данных о параметрах движения всех ПР группы, так как все их перемещения относительно друг друга внутри заданного строя будут безопасными в силу предварительного (правильного) выбора их траекторий.

Предлагаемый алгоритм формирования траекторий для ПР-ведомых в процессе их движения в составе группы в среде с препятствиями содержит два основных этапа.

Задание траекторий движения внутри строя каждого ПР-ведомого. В процессе движения вдали от препятствий ПР-ведомые сохраняют заданный строй и свое расположение относительно ПР-лидера, а при обходе препятствий должны менять свое положение внутри строя так, чтобы сохранить безопасную дистанцию между всеми ПР группы.

На рис. 2 показано движение группы ПР в обстановке с препятствиями. На этом рисунке сплошной линией показана траектория ПРЛ, формируемая ПР-лидером для обхода препятствий на безопасном расстоянии. ПР-ведомые — ПР1 и ПР2 — движутся за лидером, поддерживая заданную позицию (нижняя часть рис. 2) в строю относительно него (их желаемые траектории относительно лидера показаны штриховыми линиями).

Когда дальномеры ПР-ведомых обнаруживают близко расположенные к ним препятствия, то они начинают их автономный обход, смещаясь со штриховых на пунктирные траек-

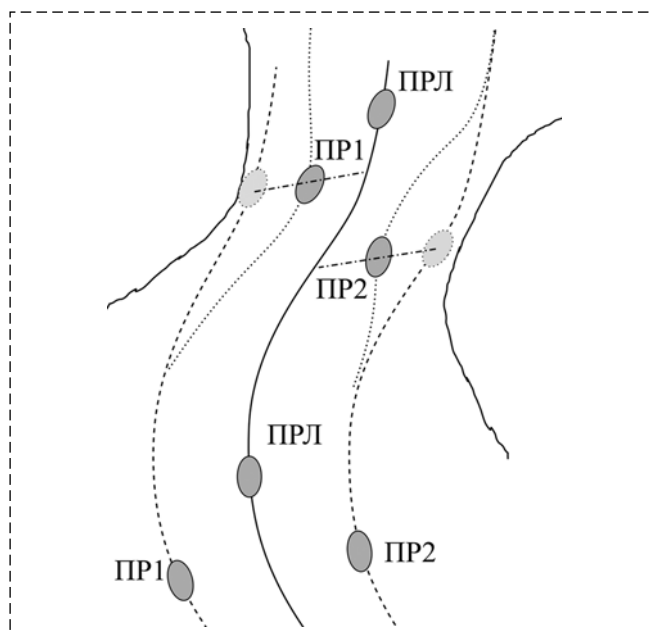


Рис. 2. Движение группы ПР при обходе препятствий
Fig. 2. Movement of AUV group during obstacle avoidance

тории. Это смещение всегда происходит к траектории движения лидера, расположенной на безопасном расстоянии от препятствий. Иными словами, при их обходе ПР-ведомые одновременно совершают два движения: за лидером и (при необходимости) смещение в сторону траектории лидера. Это заранее непредсказуемое смещение в коридоре между двумя препятствиями, осуществляемое сразу несколькими ПР-ведомыми, может привести к их столкновениям, если они не получают информацию о положении других ПР-ведомых, которую сложно передать при низкой пропускной способности гидроакустических каналов связи.

Для устранения указанной ситуации при обходе препятствий ПР-ведомые предлагается смещать к траектории движения лидера по заранее заданному закону (см. штрихпунктирные линии в верхней части рис. 2) так, чтобы между ПР-ведомыми внутри строя и между ними и препятствиями всегда оставалась безопасная дистанция. В результате для каждого ПР-ведомого появляется возможность независимо формировать траектории обхода препятствий без дополнительного обмена данными между ними.

Возможный закон смещения ПР-ведомых в СК $\tilde{x}\tilde{y}$, связанной с лидером, внутри строя из исходного состояния при обходе различных препятствий на рис. 3 показан штриховыми линиями, где точки $\tilde{X}_{fi} = (\tilde{x}_{fi}, \tilde{y}_{fi})$ соответ-

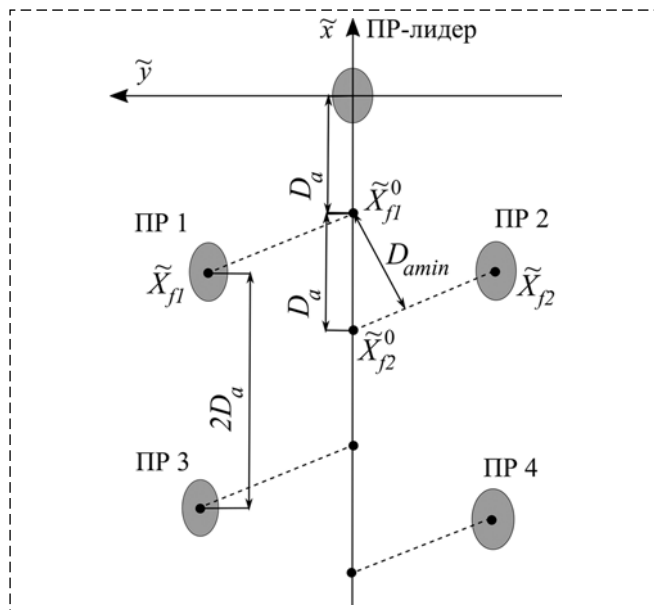


Рис. 3. Задание траекторий движения ПР-ведомых при обходе препятствий
Fig. 3. Path planning of AUV-followers during obstacle avoidance

ствуют исходному программному расположению i -го ПР-ведомого при отсутствии препятствий, ось $\tilde{x}$ всегда направлена вдоль текущего движения ПР-лидера.

Эти смещения происходят по параллельным прямым, проходящим через точки $\tilde{X}_{fi}$ и $\tilde{X}_{fi}^0 = (\tilde{x}_{fi} \pm D_a/2, 0)$, расстояние между которыми не должны быть менее $D_{a \min}$ для полного исключения столкновения между ПР группы, где D_a — половина расстояния между ведомыми, расположенными с одной стороны строя относительно лидера (имеющими четные или нечетные индексы). Знак "+" в координате точки $\tilde{X}_{fi}^0$ указывает на то, что ПР-ведомый расположен слева от оси $\tilde{x}$, а "-", что соответствующий ведомый — справа от этой оси. Координаты точек $\tilde{X}_{fi}^0$ обеспечивают приближение левых ПР-ведомых к лидеру после их смещения, а правых — от лидера. Величина $D_a > D_{a \min}$ зависит от числа колонн ПР-ведомых и от особенностей строя. Точки $\tilde{X}_{fi}^0$ определяют максимально возможное смещение i -го ПР-ведомого от своего исходного расположения в строю. Эти точки находятся вблизи от реальной траектории движения ПР-лидера, проходящей на безопасном расстоянии от обнаруживаемых препятствий. Расстояние между точкой $\tilde{X}_{f1}^0$ и ПР-лидером также целесообразно выбрать равным D_a (рис. 3).

Несложно показать, что линейная траектория смещения i -го ПР-ведомого внутри строя

в СК $\tilde{x}\tilde{y}$, проходящая через две выбранные точки $\tilde{X}_{fi}^0$ и $\tilde{X}_{fi}$, может быть описана уравнением

$$\pm \frac{1}{2} D_a (\tilde{y} - \tilde{y}_{fi}) + \tilde{y}_{fi} (\tilde{x} - \tilde{x}_{fi}) = 0, \quad (1)$$

которое получено из типового уравнения прямой [15], проходящей через две произвольные точки на плоскости. Это уравнение ниже будет использовано при расчете координат программных точек для каждого ПР-ведомого в процессе обхода им обнаруживаемых препятствий.

Расчет программных положений ПР-ведомых внутри строя при обходе ими обнаруживаемых дальномерами препятствий. В процессе перемещения за ПР-лидером ПР-ведомые определяют наличие и близость препятствий к траекториям их движения с помощью собственных бортовых дальномеров. Если это расстояние меньше некоторого безопасного — $D_{\min}$, то программную точку этого ПР-ведомого необходимо сместить вдоль траектории, описываемой уравнением (1), так, чтобы расстояние между новым положением программной точки и обнаруженной дальномером точкой на препятствии было равно $D_{\min}$. При срабатывании сразу нескольких дальномеров оценивается расстояние от всех обнаруженных ими точек на препятствии до предписанной траектории движения ПР-ведомого и выбирается ближайшая из них к этой траектории для расчета программной точки его нового положения.

Если расстояния между всеми обнаруженными дальномерами точками и предписанной траекторией движения ПР-ведомого больше $D_{\min}$, то ПР-ведомый продолжает двигаться за лидером, сохраняя свое заданное место в строю, пока какой-либо его дальномер не обнаружит новое недопустимо близко расположенное препятствие, особенности обхода которого описаны ниже.

В процессе движения ПР-ведомый всегда следует за своей программной точкой, положение которой формируется его бортовой информационно-управляющей системой с учетом текущего положения ПР-лидера. При этом ведомый не имеет информации о траектории движения лидера, поэтому заранее не знает и траекторию своего дальнейшего движения. В связи с этим определение близости точек, обнаруженных соответствующими дальномерами ПР-ведомых на очередном препятствии, к прогнозируемым траекториям движения ПР-

ведомых возможно только приближенно, когда указанные траектории представляются в виде прямых линий, параллельных оси $\tilde{x}$ и проходящих через текущие положения программных точек ведомых (см. вертикальную штриховую линию от ПР-ведомого на рис. 4).

Более детальная схема определения величины смещения программной точки для любого ПР-ведомого при обходе им препятствия представлена на рис. 4. Она является идентичной для всех ПР-ведомых, поэтому далее индексы, соответствующие номеру каждого, будут опускаться. На этом рисунке показано обнаружение препятствия сразу несколькими бортовыми дальномерами одного из ПР-ведомых, причем указанные включенные дальномеры располагаются и на левом, и на правом бортах каждого ведомого. Для определения требуемого смещения программной точки конкретного ПР-ведомого необходимо найти крайнюю точку этого препятствия, обнаруженную его дальномерами, которую он должен обойти в процессе движения за ПР-лидером. Так как траектория предстоящего смещения программной точки (см. уравнение (1)) задана в СК, связанной с ПР-лидером, то и координаты обнаруженных дальномерами точек следует получить в этой СК.

Указанный расчет происходит в два этапа. Сначала на борту соответствующего ПР-ведомого определяются координаты X_{dj} всех зафиксированных дальномерами точек в абсолютной СК:

$$X_{dj} = X_F + \begin{bmatrix} \cos \psi_f & -\sin \psi_f \\ \sin \psi_f & \cos \psi_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_j \cos \alpha_j \\ d_j \sin \alpha_j \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$j = \overline{1, n},$$

где X_{dj} — координаты в абсолютной СК точки, фиксируемой j -м дальномером на препятствии; X_L, X_F — координаты лидера и ведомого в абсолютной СК соответственно; ψ_f — текущий угол курса ведомого (угол между продольной осью ПР-ведомого и осью x); $\alpha_j = \text{const}$ — угол ориентации его дальномера относительно продольной оси; d_j — расстояние до препятствия, фиксируемое j -м дальномером.

Затем координаты этих точек X_{dj} пересчитываются в СК, связанную с ПР-лидером:

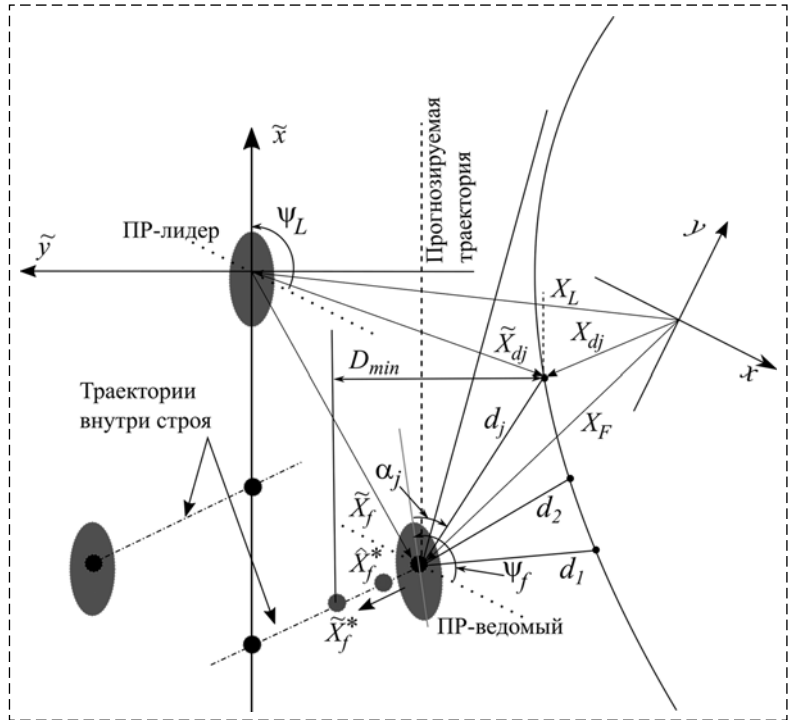


Рис. 4. Схема построения траекторий движения ПР-ведомых при обходе препятствий

Fig.4. Scheme of calculation of program point for AUV-followers during obstacle avoidance

$$\tilde{X}_{dj} = \begin{bmatrix} \cos \psi_L & \sin \psi_L \\ -\sin \psi_L & \cos \psi_L \end{bmatrix} (X_{dj} - X_L) =$$

$$= (\tilde{x}_{dj}, \tilde{y}_{dj})^T, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где $\tilde{X}_{dj}$ — координаты точки X_{dj} в СК лидера; ψ_L — текущий угол курса лидера (угол между осями $\tilde{x}$ и x).

Так как прогнозируемая траектория текущего движения каждого ПР-ведомого является прямой, параллельной оси $\tilde{x}$, то отклонение от точек $\tilde{X}_{dj}$ до указанной траектории можно определить в виде

$$\delta_j = S(\tilde{y}_{dj})(\tilde{y}_{dj} - \tilde{y}_f), \quad j = \overline{1, n},$$

$$S(\tilde{y}_{dj}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{y}_{dj} \geq 0; \\ -1, & \text{если } \tilde{y}_{dj} < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Множитель $S(\tilde{y}_{dj})$ позволяет учесть, с какой стороны от конкретного ПР-ведомого находится препятствие, обнаруженное его j -м дальномером. При этом величины δ_j могут быть положительными и отрицательными. Последнее указывает на то, что обнаруженная на препятствии точка лежит между ПР-лидером и ПР-ведомым. Если конкретный ПР-ведомый и препятствие располагаются по разные стороны от траектории движения ПР-лидера, то

наличие таких препятствий не будет приводить к смещению ведомых внутри строя, так как дистанция до этого препятствия будет заведомо больше $D_{\min}$.

Рассчитанные величины δ_j , $j = \overline{1, n}$, используются для поиска точки $\tilde{X}_{dc}$ на препятствии с координатами $\tilde{x}_{dc}$, $\tilde{y}_{dc}$, которую должен обойти соответствующий ПР-ведомый на безопасном расстоянии:

$$\tilde{X}_{dc} = \tilde{X}_{dj}, \text{ если } \delta_j = \min \delta_j, j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Новое положение программной точки в СК $\tilde{x}$, $\tilde{y}$ для рассматриваемого ПР-ведомого, обеспечивающее его безопасный обход обнаруженного препятствия в составе группы, определяется с использованием координат точки $\tilde{X}_{dc}$ и выражения (1):

$$\tilde{y}_f^* = \begin{cases} \tilde{y}_{dc} - \text{sign} \tilde{y}_{dc} \cdot D_{\min}, \\ \text{если } \min \delta_j < D_{\min}, j = \overline{1, n}; \\ \tilde{y}_f, \text{ если } \min \delta_j \geq D_{\min}, j = \overline{1, n}; \end{cases} \quad (6)$$

$$\tilde{x}_f^* = \tilde{x}_f \pm \frac{D_a(\tilde{y} - \tilde{y}_f^*)}{2\tilde{y}_f},$$

где $\tilde{x}_f^*$, $\tilde{y}_f^*$ — координаты нового положения целевой точки $\tilde{X}_f^*$ j -го ПР-ведомого при прохождении им в скорректированном строю за лидером на безопасном расстоянии от препятствия (рис. 4). При этом $\tilde{y}_f^*$ не может быть больше нуля, поскольку, как указывалось выше, при $\tilde{y}_f^* = 0$ любой ПР-ведомый следует строго за своим ПР-лидером, который самостоятельно принимает решение об обходе препятствий на любом расстоянии от них (если этот обход или проход между препятствиями вообще возможен).

Из выражения (6) видно, что при обнаружении препятствия, находящегося на недопустимо близком расстоянии от желаемой траектории движения ПР-ведомого, целевая точка будет смещаться в сторону траектории движения ПР-лидера, а после обхода препятствия эта программная точка вернется в свое исходное положение для задания предписанного положения конкретного ПР-ведомого в строю.

Однако при обнаружении препятствия целевая точка $\tilde{X}_f^*$ ПР-ведомого может резко изменить свое положение. Это может привести к резким колебаниям ПР-ведомого. Схожая ситуация может возникнуть и при наличии шумов в показаниях бортовых дальномеров. Для устранения указанной ситуации жела-

тельно сглаживать резкие изменения положений целевых точек с помощью фильтров низких частот вида [16]:

$$\hat{X}_f(k) = \hat{X}_f(k-1) + \beta(\tilde{X}_f^*(k) - \hat{X}_f(k-1)), \quad (7)$$

где $\hat{X}_f(k)$ — желаемое положение целевой точки ПР-ведомого с координатами $\hat{x}_f(k)$, $\hat{y}_f(k)$ на текущем шаге работы системы формирования его траектории; $0 \leq \beta \leq 1$ — коэффициент сглаживания.

Использование фильтра (7) позволяет избежать резкого изменения положения целевой точки $\hat{X}_f$ ПР-ведомого при обнаружении препятствий, которая начнет перемещаться от него по построенной линейной траектории внутри строя со скоростью, зависящей от коэффициента β . Чем меньше значение β , тем больше будет скорость перемещения точки $\hat{X}_f$ к своему конечному положению.

Таким образом, использование выражений (1)–(7) позволяет автоматически изменять расположения ПР-ведомых в пространстве, содержащем неизвестные препятствия, обеспечивая их своевременный обход на безопасном расстоянии без обмена информацией с остальными ведомыми и лидером. После обхода препятствий движение всех ПР заданным строем также автоматически восстанавливается.

Исследование эффективности предложенного метода

Для проверки эффективности предложенного метода было проведено математическое моделирование движения группы, состоящей из трех ПР, в строю типа треугольник. во время обхода обнаруженных препятствий с использованием известной среды моделирования V-REP [17]. Параметры исходного положения ПР-ведомых в СК $\tilde{x}\tilde{y}$: $\tilde{X}_{f1} = (-1, 5; -1)$; $D_a = 0,75$ м; смещения ПР-ведомых в сторону оси $\tilde{x}$ при обходе препятствий описывались выражением (1), $\delta_j = 1$ м. Полагалось, что все ПР группы имеют высокоточные следящие системы управления [18–20]. Каждый ПР-ведомый имел семь дальномеров, расположенных равномерно в их передней полусфере. Траектории движения ПР-ведомых (рис. 5) при обходе препятствий определяются траекторией ПР-лидера (см. кривую 1), задаваемой сплайнами Безье [11] и проходящей через базовые точки

WP1 и WP2. Кривые 2 и 3 соответствуют траекториям движений левого (ПР1) и правого (ПР2) ПР-ведомых соответственно, которые формировались в процессе обхода препятствий по предложенному выше методу.

Из рис. 5 видно, что в процессе движения ПР-лидер находит безопасный проход к точке WP1 между двумя препятствиями на безопасном расстоянии. ПР-ведомые не могут пройти между этими препятствиями, сохраняя заданный строй. Поэтому правый ПР-ведомый, обходя препятствие слева на безопасной дистанции, на некотором участке практически выходит на траекторию ПР-лидера. Левый ведомый обходит левое препятствие справа, приближаясь к траектории ПР-лидера. После прохода между двумя препятствиями строй всех ПР возвращается к исходной конфигурации. Второе препятствие обходит только правый ПР-ведомый, смещаясь в сторону траектории ПР-лидера, а левый движется за лидером, сохраняя свое место в строю.

На рис. 6 представлены процессы изменения расстояний E между всеми ПР группы. Штриховая кривая — расстояние между ПР-лидером и левым ведомым, сплошная черная кривая — дистанции между ПР-лидером и правым ведомым, а сплошная серая — расстояние между ПР-ведомыми.

Из рис. 6 видно, что в процессе движения все ПР нигде не приближаются друг к другу на недопустимо близкую дистанцию. При обходе препятствий расстояния между ними непрерывно изменяются, при этом ПР-ведомые приближаются к траектории ПР-лидера.

На рис. 7 показано минимальное расстояние d_c между ПР-ведомыми и обнаруженными

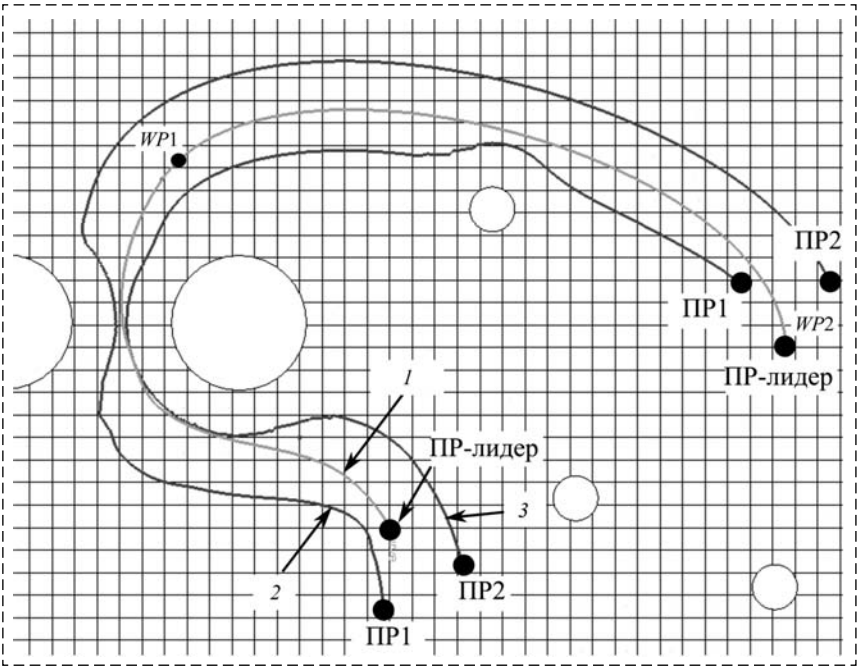


Рис. 5. Траектории движения группы ПР в неизвестной обстановке с препятствиями
Fig. 5. Trajectories of AUV group movement in unknown environment with obstacles

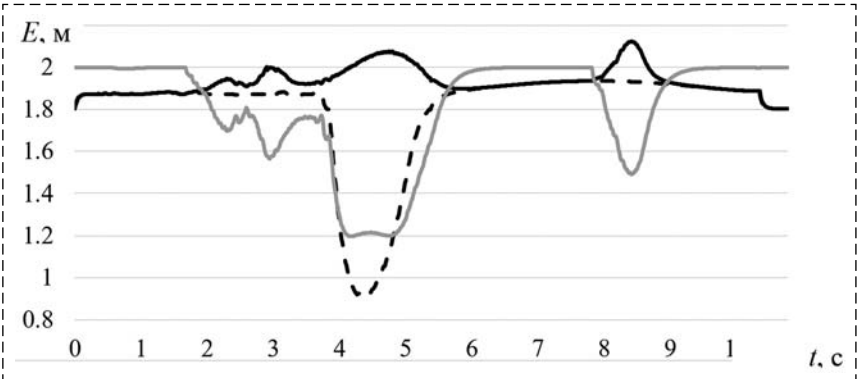


Рис. 6. Процесс изменения дистанций между ПР при движении в заданном строю с обходом препятствий
Fig.6. The change of distances between AUVs in the formation during obstacles avoidance

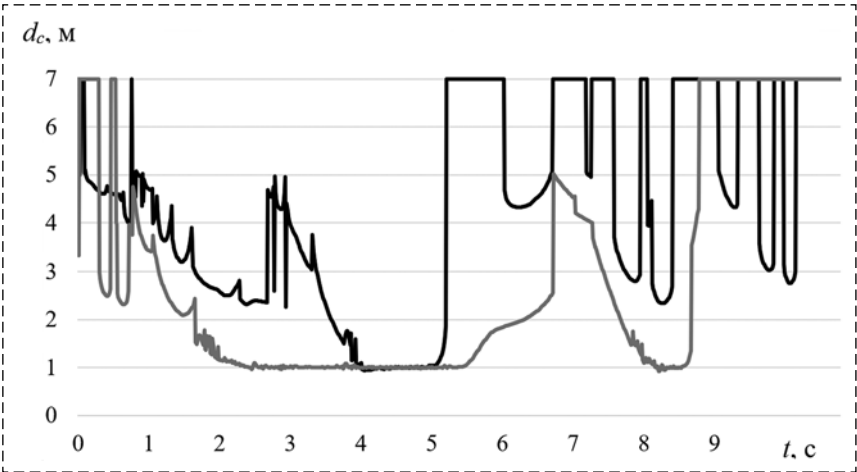


Рис. 7. Расстояния от ПР-ведомых до обнаруживаемых препятствий
Fig. 7. Distances from AUV-followers to obstacles

их бортовыми дальномерами препятствиями. Черная кривая — расстояния от левого ПР-ведомого до обнаруживаемых препятствий, а серая — расстояния от правого ПР-ведомого до препятствий. Из рис. 7 видно, что расстояния между движущимися ПР-ведомыми и препятствиями не превышают 1 м. Резкие перепады расстояний от ПР-ведомых до обнаруживаемых препятствий обусловлены тем, что число датчиков у каждого ведомого ограничено, поэтому на дальних расстояниях от ПР-препятствие обнаруживает только один из их датчиков и не всегда. Скачки возможны и при подключении других датчиков.

Результаты исследования предложенного метода формирования траекторий движения группы ПР при обходе препятствий в неизвестной обстановке показали его неизменную работоспособность и эффективность.

Заключение

В статье предложен новый метод формирования траекторий движения группы ПР в режиме "лидер—ведомые" в заданном строю в неизвестной обстановке, содержащей препятствия. В этом режиме ПР-лидер в соответствии с заданной миссией выбирает траекторию перемещения на безопасном расстоянии от обнаруживаемых им препятствий, а ПР-ведомые упорядоченно следуют за ним, обходя эти препятствия, ориентируясь на показания собственных дальномеров. При обходе препятствий они перемещаются по заранее заданным траекториям внутри строя к траектории лидера без столкновений между собой и без дополнительного обмена данными для согласования их положений. Эффективность предложенного метода подтверждена результатами математического моделирования.

Список литературы

1. Liu Y., Bucknall R. A survey of formation control and motion planning of multiple unmanned vehicles, *Robotica*, 2018, pp. 1—29.
2. Spensieri D., Carlson J. S., Ekstedt F., Bohlin R. An Iterative Approach for Collision Free Routing and Scheduling in Multirobot Stations, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 950—962.
3. Langerwisch M., Wagner B. Dynamic path planning for coordinated motion of multiple mobile robots, *Proc. of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Washington, DC, 2011, pp. 1989—1994.

4. Shahriari M., Biglarbegian M. A New Conflict Resolution Method for Multiple Mobile Robots in Cluttered Environments With Motion-Liveness, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, vol. 48, no. 1, pp. 300—311.
5. Lu M., Zou Y., Li S. Multi-agent formation control with obstacle avoidance based on receding horizon strategy, *Proc. of the 2019 IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA)*, Edinburgh, United Kingdom, 2019, pp. 1361—1366.
6. Vo C., Harrison J. F., Lien J. Behavior-based motion planning for group control, *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, MO*, 2009, pp. 3768—3773.
7. Yong L., Yu L., Yipei G., Kejie C. Cooperative path planning of robot swarm based on ACO, *Proc. of the IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, Chengdu, 2017, pp. 1428—1432.
8. Liu S., Sun D., Zhu C. Coordinated Motion Planning for Multiple Mobile Robots Along Designed Paths with Formation Requirement, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, vol. 16, no. 6, pp. 1021—1031.
9. Зенкевич С. Л., Галустян Н. К. Децентрализованное управление группой квадрокоптеров, *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2016, т. 17, № 11, с. 774—782.
10. Reyes L. A., Tanner H. G. Flocking, Formation Control, and Path Following for a Group of Mobile Robots, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, vol. 23, no. 4, pp. 1268—1282.
11. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А. Метод формирования гладких траекторий движения мобильных роботов в неизвестном заранее окружении, *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2017, № 4, с. 174—184.
12. Filaretov V., Yukhimets D. The method of formation of auv smooth trajectory in unknown environment, *Proc. Of Int. Conf. OCEANS'2016, Shanghai, China*, 2016, pp. 1—8.
13. Юхимец Д. А., Губанков А. С., Зуев А. В. Метод формирования пространственных траекторий мобильного робота в неизвестной обстановке, *Робототехника и техническая кибернетика*, 2018, т. 19, № 2, с. 46—51.
14. Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A. Method of spatial path planning for mobile robot in unknown environment, *Proc. of the 28th DAAAM International Symposium. Zadar, Croatia*, 2017, pp. 258—266.
15. Корн Т., Корн Г. Справочник по математике, М.: Наука, 1973.
16. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов, М.: Мир, 1978, 848 с.
17. <http://www.coppeliarobotics.com/> — среда трехмерного моделирования робототехнических систем V-REP.
18. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве / Под ред. В. Ф. Филаретова, Владивосток: Дальнаука, 2016, 400 с.
19. Filaretov V. F., Yukhimets D. A. The new strategy of designing tracking control systems for dynamical objects with variable parameters, *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2018, т. 19, № 7, с. 435—442.
20. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Щербатюк А. Ф., Мурсалимов Э. Ш., Туфанов И. Е. Новый метод контурного управления АНПА, *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2014, № 8, с. 46—56.

The Path Planning Method for AUV Group Moving in Environment with Obstacles

V. F. Filaretov^{1,2}, filaret@iacp.dvo.ru, D. A. Yukhimets^{1,3}, undim@iacp.dvo.ru

¹ Institute of automation and control processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation;

² Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690922, Russia;

³ Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation

Corresponding author: **Yukhimets Dmitry**, Dr.Sc., Associate Professor, Institute of automation and control processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: undim@iacp.dvo.ru

Accepted on January 16, 2020

Abstract

The new path planning method for AUV group moved in the "leader-followers" mode in a desired formation in an unknown environment with obstacles is proposed in paper. In this case one AUV plays role of AUV-leader, which has information about the mission and plans a safe trajectory of its movement, depending on its purpose and detected obstacles. AUV-followers must move behind the leader, in accordance with their assigned place in formation, using information about the current position of the leader, received via acoustic communication channels, and information about their distances to obstacles, detected by their onboard rangefinders. Due to the low bandwidth of acoustic communication channels, there is a problem of matching the position of the AUV-followers during obstacles avoidance. It is necessary to avoid collisions between AUV of group. This problem is solved by means of the preliminary forming for each follower of the only possible trajectory of movement inside formation which will provide it safe movement relatively other followers when this AUV-follower moves around detected obstacle. This approach allows do not coordinate the current position of the AUV-followers relative to other AUV of group if a high-precision control system is used, and as a result it does not require additional data exchange between the AUV group. In this paper, an approach to the forming of AUV-follower trajectories inside AUV formation and the method of forming the desired position of the AUV-followers on these trajectories are proposed. The effectiveness of the proposed method is confirmed by the results of mathematical modeling.

Keywords: underwater robot, cooperative control, formation control, path planning, obstacle avoidance, unknown environment

Acknowledgements: This work was supported by Russian Foundation for Basic Researches (grants No 16-29-04195 and 19-08-00347) and Program of Presidium RAS No 1.7 "New Developments in Perspective Areas of Energetics, Mechanics and Robotics".

For citation:

Filaretov V. F., Yukhimets D. A. The Path Planning Method for AUV Group Moving in Environment with Obstacles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 6, pp. 356–365.

DOI: 10.17587/mau.21.356-365

References

1. Liu Y., Bucknall R. A survey of formation control and motion planning of multiple unmanned vehicles, *Robotica*, 2018, pp. 1–29.
2. Spensieri D., Carlson J. S., Ekstedt F., Bohlin R. An Iterative Approach for Collision Free Routing and Scheduling in Multirobot Stations, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 950–962.
3. Langerwisch M., Wagner B. Dynamic path planning for coordinated motion of multiple mobile robots, *Proc. of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Washington, DC, 2011, pp. 1989–1994.
4. Shahriari M., Biglarbegian M. A New Conflict Resolution Method for Multiple Mobile Robots in Cluttered Environments With Motion-Liveness, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, vol. 48, no. 1, pp. 300–311.
5. Lu M., Zou Y., Li S. Multi-agent formation control with obstacle avoidance based on receding horizon strategy, *Proc. of the 2019 IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA)*, Edinburgh, United Kingdom, 2019, pp. 1361–1366.
6. Vo C., Harrison J. F., Lien J. Behavior-based motion planning for group control, *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, MO, 2009, pp. 3768–3773.
7. Yong L., Yu L., Yipei G., Kejie C. Cooperative path planning of robot swarm based on ACO, *Proc of the IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, Chengdu, 2017, pp. 1428–1432.
8. Liu S., Sun D., Zhu C. Coordinated Motion Planning for Multiple Mobile Robots Along Designed Paths with Formation Requirement, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, vol. 16, no. 6, pp. 1021–1031.
9. Zenkevitch S. L., Galustyan N. K. Decentralized Control of a Quadcopter Swarm, *Mekhatronika, Avtomatizatsia, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 11, pp. 774–782 (in Russian).
10. Reyes L. A., Tanner H. G. Flocking, Formation Control, and Path Following for a Group of Mobile Robots, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, vol. 23, no. 4, pp. 1268–1282.
11. Filaretov V., Yukhimets D. Planning smooth paths for mobile robots in an unknown environment, *Int. Journal of Computer and Systems Sciences*, 2017, vol. 56, no. 4, pp. 738–748 (in Russian).
12. Filaretov V., Yukhimets D. The method of formation of auv smooth trajectory in unknown environment, *Proc. Of Int. Conf. OCEANS'2016, Shanghai, China*, 2016, pp. 1–8.
13. Yukhimets D. A., Gubankov F. S., Zuev A. V. The Method of Path Planning of Spatial Trajectories of Mobile Robot in Unknown Environment, *Robototekhnika i Tekhnicheskaya Kibernetika*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 46–51 (in Russian).
14. Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A. Method of spatial path planning for mobile robot in unknown environment, *Proc. of the 28th DAAAM International Symposium*, Zadar, Croatia, 2017, pp. 258–266.
15. Korn T., Korn G. Mathematic handbook, Moscow: Nauka, 1973 (in Russian).
16. Rabliner L., Goud B. Theory and Application of Digital Signal Processing, Moscow, Mir, 1978, 848 p (in Russian).
17. Available at: <http://www.coppeliarobotics.com/>
18. Filaretov V. F., Yukhimets D. A. Features of Synthesis of High-Accuracy Control System of Movement and Spatial Stabilization of Underwater Vehicles, Vladivostok, Dalnauka, 2016, 400 p. (in Russian).
19. Filaretov V. F., Yukhimets D. A. The new strategy of designing tracking control systems for dynamical objects with variable parameters, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 435–442.
20. Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Scherbatyuk A. F., Mursalimov E. Sh., Tuphanov I. E. The Method of Tracking Control of Autonomous Unmanned Underwater Vehicle Motion, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 8, pp. 46–56 (in Russian).