

СОГЛАСОВАННАЯ РАБОТА ДВУХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ
ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЕРАЦИЙ
В СЛОЖНОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ ОБСТАНОВКЕ

В. Ф. ФИЛАРЕТОВ^{1,2}, А. А. КАЦУРИН^{2*}

¹ *Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия*

² *Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия,
Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток, Россия*

**katsurin@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается задача управления манипулятором, установленным на основном мобильном роботе, выполняющем операции в стесненных условиях рабочей среды, когда объекты работ находятся вне зоны видимости системы технического зрения робота. В указанной ситуации расположение невидимых объектов вначале определяется с помощью системы технического зрения вспомогательного и более маневренного мобильного робота в его связанной системе координат, а затем эта информация по каналам связи с неизбежными погрешностями передается в связанную систему координат основного манипуляционного робота. Предложен алгоритм по определению и устранению возникших погрешностей, обеспечивающий в результате возможность точного автоматического выполнения требуемых операций с объектами работ. Предложенный математический аппарат позволяет учесть различную текущую пространственную ориентацию базовых платформ обоих мобильных роботов по углам крена, тангажа и рыскания в абсолютной системе координат. Приведены результаты экспериментов, подтверждающие работоспособность и высокую эффективность предложенного метода согласованной автоматической работы двух мобильных роботов в стесненных условиях окружающей среды.

Ключевые слова: *мобильный робот, групповое управление, система управления, манипулятор, система технического зрения*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 22-29-01156.

Ссылка для цитирования: *Филаретов В. Ф., Кацуринов А. А. Согласованная работа двух мобильных роботов при автоматическом выполнении операций в сложной окружающей обстановке // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 656—667. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-656-667.*

COORDINATED WORK OF TWO MOBILE ROBOTS
WHEN PERFORMING OPERATIONS AUTOMATICALLY
IN A COMPLEX ENVIRONMENT

V. F. Filaretov^{1,2}, A. A. Katsurin^{2*}

¹ *Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia*

² *Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia,
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia*
**katsurin@mail.ru*

Abstract. The problem of controlling a manipulator mounted on the main mobile robot performing operations in cramped working environment conditions when objects of work are out of sight of the robot's technical vision system, is considered. In this situation, location of the invisible objects is first determined using the technical vision system of an auxiliary and more maneuverable mobile robot in its associated coordinate system, and then this information is transmit-

ted via communication channels with unavoidable errors to the associated coordinate system of the main manipulation robot. An algorithm is proposed to determine and eliminate the aroused errors, which as a result provides the possibility of accurate automatic execution of the required operations with the objects of work. The proposed mathematical apparatus allows for accounting variations in current spatial orientation of the base platforms of both mobile robots at the angles of roll, pitch and yaw in the absolute coordinate system. The results of experiments confirming the operability and high efficiency of the proposed method of coordinated automatic operation of two mobile robots in cramped environmental conditions are presented.

Keywords: mobile robot, group control, control system, manipulator, vision system

Acknowledgments: the work was supported by the Russian Science Foundation, grant 22-29-01156.

For citation: Filaretov V. F., Katsurin A. A. Coordinated work of two mobile robots when performing operations automatically in a complex environment. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 9. P. 656—667 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-656-667.

Введение. В настоящее время области использования мобильной робототехники постоянно расширяются. Одним из перспективных направлений является применение мобильных роботов (МР) для полностью автоматического выполнения различных точных операций в стесненных условиях заранее неизвестной рабочей среды с помощью манипуляторов, устанавливаемых на МР [1—4]. Сейчас эти работы выполняются в полуавтоматическом режиме только оператором, который ориентируется по изображению рабочей зоны на экране телемонитора, полученному от системы технического зрения (СТЗ). При этом для получения наиболее удобного для оператора ракурса изображения рабочей зоны и объекта работ (ОР) могут использоваться СТЗ, которые способны изменять текущие ориентации своих оптических осей [5—8]. Для управляемых операторами манипуляционных МР многие задачи навигации и управления уже решены [9, 10]. При этом анализ показывает, что даже сложные манипуляционные операции вполне могут выполняться МР и в полностью автоматическом режиме. Но в этом случае потребуется использовать согласованное групповое управление несколькими МР, которое в настоящее время уже достаточно хорошо развито [11—17].

При перемещении группы МР в условиях неупорядоченной окружающей среды возможно возникновение ситуаций, когда основные СТЗ МР, оборудованных манипуляторами, не позволяют обеспечить требуемый ракурс изображения рабочей зоны, а объекты оказываются ненаблюдаемыми с помощью этих СТЗ. В таких случаях пространственные расположения и ориентации указанных объектов целесообразно определять с помощью СТЗ малых, более маневренных вспомогательных МР и затем передавать полученную информацию в связанные системы координат (СК) более громоздких манипуляционных роботов. Однако при работе в автоматическом режиме такое взаимодействие роботов будет затруднено, поскольку при передаче информации об объектах работ от вспомогательных МР к манипуляционным неизменно будут появляться погрешности, обусловленные как особенностями функционирования навигационных систем этих роботов, так и их СТЗ. Совместная работа двух МР в автоматическом режиме была рассмотрена в [18]. Но при использовании изложенного в этой работе подхода для определения существующих погрешностей при распознавании объекта и последующей передаче навигационной информации о его текущем расположении в СК, связанную с основным МР, оборудованным манипулятором, требуется применять специально изготовленный калибровочный инструмент. Для его захвата рабочим органом манипулятора выполняются дополнительные тестовые движения. В результате происходит значительное снижение производительности при выполнении требуемых манипуляционных операций, а также усложняется конструкция всей системы. Кроме того, такой подход не позволяет учесть текущую пространственную ориентацию в абсолютной СК обоих МР по углам крена, тангажа и рыскания. Это делает невозможным

использование данного подхода, если поверхность, по которой перемещаются МР, не является ровной и строго горизонтальной.

В результате задача разработки новых методов и алгоритмов, обеспечивающих точное и согласованное управление несколькими МР для выполнения заданных манипуляционных операций в автоматическом режиме, остается актуальной. Особое значение эта задача имеет в условиях произвольной, неупорядоченной окружающей среды.

Постановка задачи. В статье рассматривается задача разработки и исследования нового подхода к синтезу системы, предназначенной для обеспечения согласованной работы двух МР в автоматическом режиме. Основной МР оборудован многозвенным манипулятором и СТЗ, а второй — вспомогательный — только СТЗ. Создаваемая система предназначена для точного автоматического выполнения сложных манипуляционных операций с различными объектами в ситуациях, когда эти объекты не наблюдаются СТЗ основного МР, но находятся в рабочей зоне установленного на нем манипулятора. При этом только вспомогательный МР с помощью своей СТЗ может наблюдать объекты работ. Пространственные расположения и ориентации (координаты) объектов, определяемые СТЗ вспомогательного МР, далее должны быть переданы в связанную СК основного манипуляционного МР с неизбежными погрешностями, обусловленными ошибками при работе обеих навигационных систем и СТЗ, а также устройств связи МР. При этом текущие координаты и пространственные ориентации подвижных оснований обоих МР по углам крена, тангажа и рыскания в абсолютной СК формируются рельефами опорных поверхностей и принимаются произвольными.

Согласованная работа двух мобильных роботов. На рис. 1 приведена обобщенная схема взаимного расположения двух МР 1 и 2 в условиях неупорядоченной окружающей среды. В качестве основного МР 1 используется мобильная платформа, оборудованная шестистепенным манипулятором 3 типа PUMA с рабочим органом 4. МР 1 дополнительно оснащен своей СТЗ 5. На схеме показана возможная ситуация, когда СТЗ основного МР 1 не позволяет наблюдать объект 7, находящийся за препятствием. Вспомогательный МР 2 оснащен своей подвижной СТЗ 6, оптическая ось которой может менять пространственную ориентацию, поворачиваясь относительно двух взаимно перпендикулярных осей. Этот более маневренный МР 2 подходит к объекту 7 таким образом, чтобы его системе технического зрения 6 одновременно был виден как этот объект, так и рабочий орган 4 манипулятора МР 1. В дальнейшем МР 2 с помощью своей СТЗ 6 определяет их текущие координаты в СК C_2 . Полученные координаты с помощью навигационной системы 9 МР 2 с встроенными гироскопами из СК C_2 переводятся сначала в абсолютную систему координат (АСК) C_0 , а затем с помощью навигационной системы 8 МР 1, которая также включает гироскопы, в его СК C_1 .

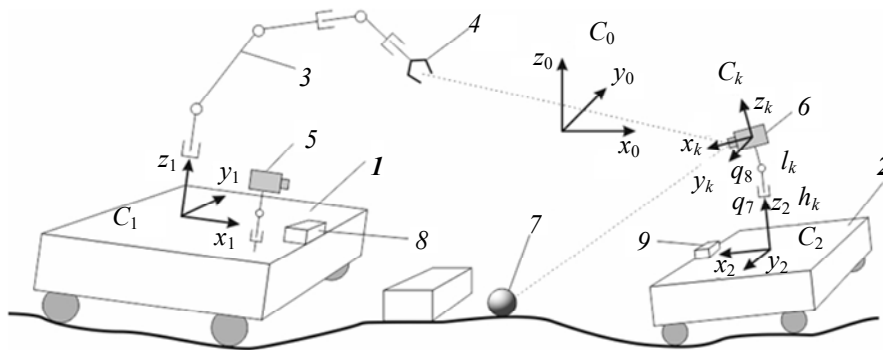


Рис. 1

Координаты как объекта 7, так и рабочего органа 4 манипулятора 3 определяются с помощью СТЗ 6 и передаются в СК C_1 с приблизительно одинаковыми погрешностями. Так как

всегда известны более точные координаты рабочего органа 4 манипулятора 3 в СК C_1 , то появляется возможность уточнения реального расположения объекта 7 в этой СК. Это позволяет обеспечить точную работу манипулятора с объектом 7 в автоматическом режиме, даже если СТЗ 5 основного МР не видит этот объект, только на основе исходной информации, получаемой от СТЗ 6 и затем передаваемой в СК C_1 по каналам связи.

Для указанного уточнения координат объекта 7 в СК C_1 необходимо сравнить координаты рабочего органа 4, которые определяются СТЗ 6 и передаются в СК C_1 , с его точными координатами в этой СК, которые определяются текущей конфигурацией манипулятора и рассчитываются с использованием известного типового алгоритма решения прямой задачи кинематики [19] на основе текущих значений всех его обобщенных координат, измеряемых датчиками угловых положений, встроенными во все соответствующие шарниры многозвенника. Таким образом удастся определить пространственную погрешность (ошибку), возникающую при определении и передаче навигационной информации о текущем расположении рабочего органа 4 в СК C_1 . Вектор этой погрешности затем используется для корректировки и определения точных координат объекта 7 в СК C_1 основного МР.

Перечисленные выше операции по определению и передаче координат объекта 7 и рабочего органа 4 из СК C_2 в СК C_1 выполняются при неизменном пространственном расположении обоих МР и СТЗ 6. Так как гироскопы навигационных систем 8 и 9 обоих участвующих в работе МР точно измеряют текущие значения углов крена, тангажа и рыскания в АСК, то определенный вектор погрешности при передаче координат рабочего органа 4 будет совпадать с вектором погрешности при передаче координат объекта 7. В результате скорректированные координаты этого объекта будут достаточно точно определять его реальное расположение в СК C_1 , а манипулятор 3 сможет точно выполнить заданные технологические операции в автоматическом режиме с объектом 7, находящимся вне зоны видимости СТЗ 5. Это позволит значительно расширить функциональные возможности манипуляционных МР за счет использования малогабаритных вспомогательных МР для эффективного выполнения многих операций даже в сложной обстановке окружающей среды, содержащей препятствия.

Алгоритм работы системы. Для технической реализации предложенного подхода был создан алгоритм работы вычислительной системы. При описании этого алгоритма используется матрица однородных преобразований $T_j^i \in T^{4 \times 4}$, содержащих элементарные повороты и сдвиги, которая применяется для преобразования вектора, заданного в повернутой и сдвинутой СК C_j , в вектор, заданный в неподвижной СК C_i [19].

Этап 1. С помощью встроенных навигационных систем 8 и 9 определяются векторы $\mathbf{c}_{10} = [x_{10} \ y_{10} \ z_{10} \ 1]^T$ и $\mathbf{c}_{20} = [x_{20} \ y_{20} \ z_{20} \ 1]^T$, задающие соответственно начала СК C_1 и C_2 в АСК, а также углы крена, тангажа и рыскания θ_{10} , θ_{20} , ψ_{10} , ψ_{20} , φ_{10} , φ_{20} основного и вспомогательного МР относительно осей АСК (углы поворотов СК C_1 и C_2 вокруг осей x_1 и x_2 , y_1 и y_2 , z_1 и z_2 соответственно). Реализация этих систем является уже типовой и детально описана в работе [10]. На этом же этапе соответствующими датчиками, встроенными в шарниры всех степеней подвижности манипулятора, измеряются текущие значения всех обобщенных координат, которые позволяют достаточно точно определить исходные значения координат векторов характерной точки A рабочего органа \mathbf{r}_{c1} (см. рис. 2) и пятого шарнира манипулятора \mathbf{r}_{m1} .

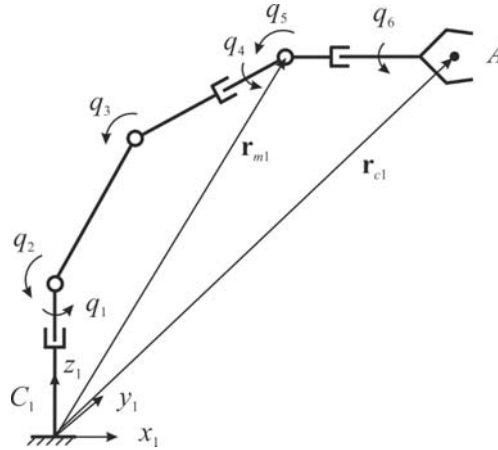


Рис. 2

Этап 2. С помощью стереоскопической СТЗ 6 [20] в СК C_k , связанной с этой СТЗ (см. рис. 1), определяются координаты геометрического центра объекта 7 — $\mathbf{o}'_{ck} = [x_{ock} \ y_{ock} \ z_{ock} \ 1]^T$ (здесь и далее штрих сверху указывает на обозначения векторов, определенных с помощью СТЗ 6) и вектора $\mathbf{r}'_{ck} = [x_{rck} \ y_{rck} \ z_{rck} \ 1]^T$ с координатами характерной точки рабочего органа манипулятора (точка A на рис. 2). Поскольку для существенного улучшения обзора изменяющейся рабочей зоны оптическая ось СТЗ 6 МР 2 может произвольно изменять свою пространственную ориентацию при введении двух ее степеней подвижности q_7 и q_8 (см. рис. 1), то для определения координат указанных двух векторов в СК C_2 вспомогательного МР можно использовать преобразования, подробно описанные в работах [5—8]. Сначала необходимо определить матрицу однородных преобразований \mathbf{T}_k^2 , связывающую СК C_k и C_2 . Эту матрицу можно получить с помощью последовательного перемножения трех однородных матриц, реализующих поворот СК C_k на угол q_7 вокруг оси z_2 и сдвиг на высоту h_k вдоль этой оси (первая матрица), поворот на угол q_8 вокруг уже повернутой оси y_k (вторая матрица) и, наконец, сдвиг на длину звена l_k вдоль повернутой оси z_k (третья матрица). Перечисленные три однородные матрицы имеют стандартный вид [19]. В итоге получена искомая матрица \mathbf{T}_k^2 :

$$\mathbf{T}_k^2 = \begin{bmatrix} c_7 & -s_7 & 0 & 0 \\ s_7 & c_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_8 & 0 & s_8 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_8 & 0 & c_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_7 c_8 & -s_7 & c_7 s_8 & c_7 s_8 l_k \\ s_7 c_8 & c_7 & s_7 s_8 & s_7 s_8 l_k \\ -s_8 & 0 & c_8 & h_k + c_8 l_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где c_7, s_7, c_8, s_8 — $\cos q_7, \sin q_7, \cos q_8, \sin q_8$ соответственно.

Для преобразования векторов \mathbf{o}'_{ck} и \mathbf{r}'_{ck} из СК C_k в СК C_2 достаточно умножить их на матрицу \mathbf{T}_k^2 . В результате получим $\mathbf{o}'_{c2} = \mathbf{T}_k^2 \mathbf{o}'_{ck}$, $\mathbf{r}'_{c2} = \mathbf{T}_k^2 \mathbf{r}'_{ck}$.

Для последующего преобразования векторов \mathbf{o}'_{c2} и \mathbf{r}'_{c2} из СК C_2 в СК C_0 необходимо построить матрицу однородных преобразований \mathbf{T}_2^0 и умножить их на эту матрицу. Матрица

T_2^0 также реализует последовательность элементарных поворотов и сдвига. Оси, относительно которых отсчитываются углы соответствующих поворотов СК C_2 , и последовательность этих поворотов должны выбираться такими, чтобы получаемые при этом углы θ_{20} , ψ_{20} , φ_{20} соответствовали углам, измеряемым гироскопами навигационной системы. Это условие выполняется, когда вначале осуществляются поворот СК C_2 на угол рыскания φ_{20} вокруг оси z_2 и сдвиг на вектор c_{20} , затем поворот на угол тангажа ψ_{20} вокруг уже повернутой оси y_2 и после этого поворот на угол крена θ_{20} вокруг повернутой оси x_2 . Полученная таким образом матрица T_2^0 имеет следующий вид:

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} c_{\varphi 2} & -s_{\varphi 2} & 0 & x_{20} \\ s_{\varphi 2} & c_{\varphi 2} & 0 & y_{20} \\ 0 & 0 & 1 & z_{20} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{\psi 2} & 0 & s_{\psi 2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_{\psi 2} & 0 & c_{\psi 2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\theta 2} & -s_{\theta 2} & 0 \\ 0 & s_{\theta 2} & c_{\theta 2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} c_{\varphi 2}c_{\psi 2} & c_{\varphi 2}s_{\psi 2}s_{\theta 2} - s_{\varphi 2}c_{\theta 2} & c_{\varphi 2}s_{\psi 2}c_{\theta 2} + s_{\varphi 2}s_{\theta 2} & x_{20} \\ s_{\varphi 2}c_{\psi 2} & s_{\varphi 2}s_{\psi 2}s_{\theta 2} + c_{\varphi 2}c_{\theta 2} & s_{\varphi 2}s_{\psi 2}c_{\theta 2} - c_{\varphi 2}s_{\theta 2} & y_{20} \\ -s_{\psi 2} & c_{\psi 2}s_{\theta 2} & c_{\psi 2}c_{\theta 2} & z_{20} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $c_{\theta 2}$, $s_{\theta 2}$, $c_{\psi 2}$, $s_{\psi 2}$, $c_{\varphi 2}$, $s_{\varphi 2}$ — $\cos\theta_2$, $\sin\theta_2$, $\cos\psi_2$, $\sin\psi_2$, $\cos\varphi_2$, $\sin\varphi_2$ соответственно.

Чтобы осуществить преобразование векторов \mathbf{o}'_{c_2} и \mathbf{r}'_{c_2} из СК C_2 в СК C_0 необходимо выполнить их умножение на матрицу T_2^0 , тогда $\mathbf{o}'_{c_0} = T_2^0 \mathbf{o}'_{c_2}$, $\mathbf{r}'_{c_0} = T_2^0 \mathbf{r}'_{c_2}$.

Для выполнения аналогичных преобразований векторов \mathbf{o}'_{c_0} , \mathbf{r}'_{c_0} из СК C_0 в СК C_1 необходимо получить матрицу однородных преобразований T_0^1 . Но для этого проще сначала получить матрицу однородных преобразований T_1^0 , которая преобразует векторы из СК C_1 в АСК C_0 , учитывая, что C_1 также повернута относительно C_0 на углы θ_{10} , ψ_{10} , φ_{10} вокруг осей x_1 , y_1 и z_1 соответственно и сдвинута на вектор c_{10} . В дальнейшем искомую матрицу T_0^1 можно определить, выполнив обратное преобразование полученной матрицы T_1^0 [19]. Аналогично предыдущему, несложно показать, что

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_{\varphi 1} & -s_{\varphi 1} & 0 & x_{10} \\ s_{\varphi 1} & c_{\varphi 1} & 0 & y_{10} \\ 0 & 0 & 1 & z_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{\psi 1} & 0 & s_{\psi 1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_{\psi 1} & 0 & c_{\psi 1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\theta 1} & -s_{\theta 1} & 0 \\ 0 & s_{\theta 1} & c_{\theta 1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} c_{\varphi 1}c_{\psi 1} & c_{\varphi 1}s_{\psi 1}s_{\theta 1} - s_{\varphi 1}c_{\theta 1} & c_{\varphi 1}s_{\psi 1}c_{\theta 1} + s_{\varphi 1}s_{\theta 1} & x_{10} \\ s_{\varphi 1}c_{\psi 1} & s_{\varphi 1}s_{\psi 1}s_{\theta 1} + c_{\varphi 1}c_{\theta 1} & s_{\varphi 1}s_{\psi 1}c_{\theta 1} - c_{\varphi 1}s_{\theta 1} & y_{10} \\ -s_{\psi 1} & c_{\psi 1}s_{\theta 1} & c_{\psi 1}c_{\theta 1} & z_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{c}_{10}^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $c_{\theta 1}$, $s_{\theta 1}$, $c_{\psi 1}$, $s_{\psi 1}$, $c_{\varphi 1}$, $s_{\varphi 1}$ — $\cos\theta_1$, $\sin\theta_1$, $\cos\psi_1$, $\sin\psi_1$, $\cos\varphi_1$, $\sin\varphi_1$ соответственно; \mathbf{R} — 3×3 -матрица сложного поворота, включающего три элементарных поворота;

$\mathbf{c}_{10}^* = [x_{10} \ y_{10} \ z_{10}]^T$ — 3×1 -вектор-столбец сдвига.

В результате $\mathbf{T}_0^1 = (\mathbf{T}_1^0)^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{c}_{10}^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, а координаты искомым векторов, преобразованных из СК C_0 в СК C_1 , определяются из равенств $\mathbf{o}'_{c1} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{o}'_{c0}$, $\mathbf{r}'_{c1} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{r}'_{c0}$.

Этап 3. В СК C_1 определяется пространственная погрешность (ошибка передачи навигационной информации) $\Delta_{c1} = \mathbf{r}_{c1} - \mathbf{r}'_{c1}$ между реальными координатами точки A (определены на 1-м этапе) и ее координатами, полученными с помощью СТЗ 6 и переданными в СК C_1 .

Этап 4. Пересчитываются координаты объекта 7 на основе определенной пространственной погрешности при передаче информации в СК C_1 по формуле $\mathbf{o}_{c1.cor} = \mathbf{o}'_{c1} + \Delta_{c1}$.

Этап 5. На данном этапе начинается работа манипулятора с виртуальной моделью объекта 7, хранящейся в его памяти. Алгоритм дальнейшей работы манипулятора с объектом определяется особенностями выполнения требуемых технологических операций и в данной статье не рассматривается. Один из возможных вариантов такой работы манипулятора — автоматический захват объекта [21]. При этом в реальном масштабе времени решается обратная задача кинематики манипулятора для определения значений всех его обобщенных координат, а процесс движения рабочего органа вблизи объекта непрерывно контролируется СТЗ 6. Если обеспечивается точный подход к объекту и выполняются все заданные рабочие операции, то процесс продолжается. В случае если требуемая точность не обеспечивается, то работа манипулятора прерывается и сообщается о невозможности дальнейших действий.

Результаты исследований, представленные далее, показали, что предложенный алгоритм и аппарат преобразований соответствующих координат при передаче навигационной информации позволяют в процессе выполнения многозвенным манипулятором конкретных технологических операций в автоматическом режиме успешно определить, а затем и устранить не только погрешности, возникающие при вычислении текущих пространственных координат объекта с помощью СТЗ, но и погрешности работы используемых навигационных систем, которые определяют реальное расположение обоих МР в АСК C_0 .

Исследование работы системы. Для проверки эффективности практической реализации решенной выше задачи были выполнены натурные эксперименты. Однако из-за отсутствия мобильных роботов требуемой конфигурации для экспериментальных исследований предлагаемого метода использовались два стационарных манипулятора. При этом поскольку точность определения их взаимного расположения существенно выше точности позиционирования мобильных роботов, то с целью приближения условий эксперимента к реальным условиям эксплуатации мобильных роботов при определении расположения оснований этих манипуляторов в АСК специально дополнительно были внесены погрешности, соответствующие возможностям современных инерциальных систем навигации мобильных роботов [22], использующих ультракороткую базу.

Общий вид экспериментального комплекса показан на рис. 3, где 1 — основной манипулятор (Mitsubishi RV-2-FB) со связанной с ним СК C_1 , предназначенный для захвата и перемещения объекта, 2 — вспомогательный манипулятор (KUKA KR 6 R700 sixx) со связанной с ним СК C_2 , управляющий стереокамерой ZED, которая определяет координаты объекта в СК C_k при любой пространственной ориентации ее оптической оси. Эти координаты передаются сначала в СК C_2 , а затем в СК C_1 . Оси x_1 и y_1 , а также x_2 и y_2 расположены в плоскости рабочего стола, на котором жестко закреплены оба манипулятора. Оси x_1 и x_2 параллельны и встречно ориентированы.

Начало АСК C_0 связано с углом рабочего стола, а ее оси x_0 и y_0 также расположены в

плоскости стола. Координаты начала СК C_1 и C_2 в АСК C_0 задаются векторами $\mathbf{c}_{10} = [1329 \quad -116 \quad 0 \quad 1]^T$ и $\mathbf{c}_{20} = [563 \quad -559 \quad 0 \quad 1]^T$ соответственно. СК C_1 и C_2 относительно АСК повернуты вокруг своих осей z_1 и z_2 на углы рыскания $\varphi_{10} = 150^\circ$, $\varphi_{20} = 30^\circ$ соответственно. В качестве объекта работ использован цилиндр красного цвета, координаты которого определяются координатами центральной точки на его верхней крышке.

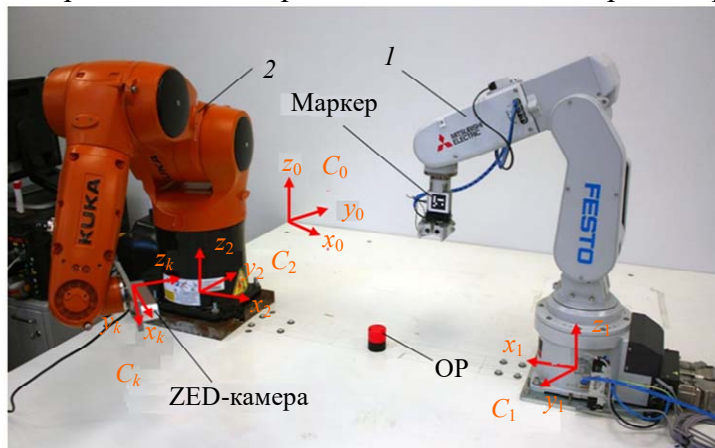


Рис. 3

Для определения погрешности при передаче навигационной информации и последующей ее компенсации в эксперименте вместо характерной точки рабочего органа манипулятора I использовался закрепленный на нем более информативный специальный AgUco-маркер, положение центральной точки которого известно.

Ось z_k встроенной СК C_k ZED-стереокамеры совпадает с оптической осью ее левого объектива (рис. 4). Оси x_k и y_k расположены в плоскости задней стенки стереокамеры. При этом стереокамера так закреплена на фланце манипулятора 2, что оси ее СК C_k параллельны осям СК C_3 , расположенной в центральной точке фланца. Координаты начала СК C_k в СК C_3 задаются вектором $\mathbf{k}_3 = [-60 \quad 15 \quad 10 \quad 1]^T$.

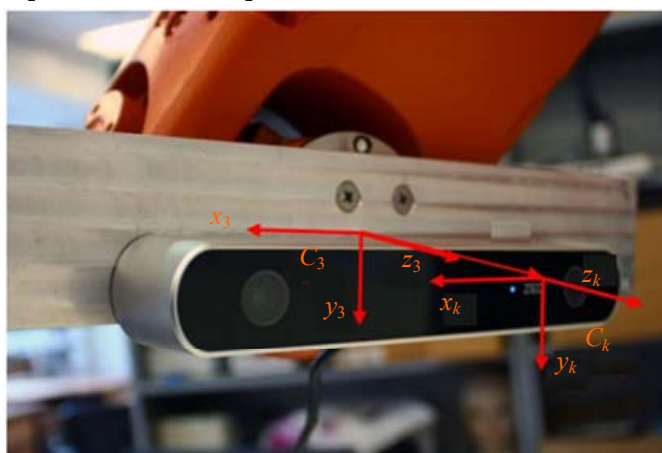


Рис. 4

В начале эксперимента стереокамера манипулятора 2 была выведена в положение, где с ее помощью наблюдалась центральная точка объекта на его верхней крышке: координаты указанной точки в СК C_k определяются вектором $\mathbf{o}'_{ck} = [-46 \quad -174 \quad 521 \quad 1]^T$ (см. рис. 3). Для захвата объекта манипулятором I , согласно предложенному подходу, координаты указанного вектора требовалось перевести из СК C_k в СК C_1 . Для этого сначала обеспечивалось преобразование вектора \mathbf{o}'_{ck} из СК C_k в СК C_2 с помощью выражения $\mathbf{o}'_{c2} = \mathbf{T}_k^2 \mathbf{o}'_{ck} = [476 \quad -4 \quad 41 \quad 1]^T$, затем

из СК C_2 в АСК C_0 с помощью выражения $\mathbf{o}'_{c_0} = \mathbf{T}_2^0 \mathbf{o}'_{c_2}$ и, наконец, из СК C_0 в СК C_1 с помощью выражения $\mathbf{o}'_{c_1} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{o}'_{c_0} = [409 \ 4 \ 40 \ 1]^T$. Матрицы соответствующих преобразований, полученные с учетом вектора $\mathbf{k}_3 = [-60 \ 15 \ 10 \ 1]^T$, а также кинематической схемы и параметров конструкции манипулятора 2, имеют следующий вид:

$$\mathbf{T}_k^2 = \begin{bmatrix} -0,508 & 0,572 & 0,644 & 217 \\ 0,422 & -0,487 & 0,765 & -467 \\ 0,751 & 0,66 & 0,006 & 186 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_2^0 = \begin{bmatrix} -0,866 & -0,5 & 0 & 563 \\ 0,5 & 0,866 & 0 & -559 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_1^0 = \begin{bmatrix} -0,866 & -0,5 & 0 & 1093 \\ 0,5 & 0,866 & 0 & -765 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

После решения обратной задачи кинематики для манипулятора 1 и определения конечных значений всех его обобщенных координат был выполнен пробный подход его рабочего органа к объекту. Однако вследствие указанных погрешностей определения расположения объекта в СК C_1 точно подойти к объекту и захватить его не удалось (рис. 5, а). Для компенсации этих погрешностей с помощью ZED-стереокамеры был определен вектор с координатами центральной точки ArUco-маркера $\mathbf{m}'_{ck} = [14 \ -147 \ 544 \ 1]^T$ в СК C_k . Затем этот вектор был последовательно преобразован сначала в СК C_2 : $\mathbf{m}'_{c_2} = \mathbf{T}_k^2 \mathbf{m}'_{ck} = [475 \ 26 \ 104 \ 1]^T$, а затем через АСК в СК C_1 : $\mathbf{m}'_{c_1} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{T}_2^0 \mathbf{m}'_{c_2} = [409 \ -26 \ 104 \ 1]^T$. Однако этот вектор в силу указанных погрешностей отличается от вектора $\mathbf{m}_{c_1} = [428 \ -25 \ 96 \ 1]^T$, который соответствует реальному положению центральной точки в СК C_1 , определяемому решением прямой задачи кинематики манипулятора 1 с учетом значений всех его обобщенных координат. Это отличие определяется вектором $\Delta_{c_1} = \mathbf{m}_{c_1} - \mathbf{m}'_{c_1} = [19 \ 1 \ -7 \ 0]^T$ на третьем этапе предложенного алгоритма. Данный вектор на четвертом этапе алгоритма использован для окончательной коррекции координат центральной точки объекта в СК C_1 , которая теперь уже точно определяется вектором $\mathbf{o}_{c_1, \text{cor}} = \mathbf{o}'_{c_1} + \Delta_{c_1} = [428 \ 5 \ 33 \ 1]^T$ в этой СК.

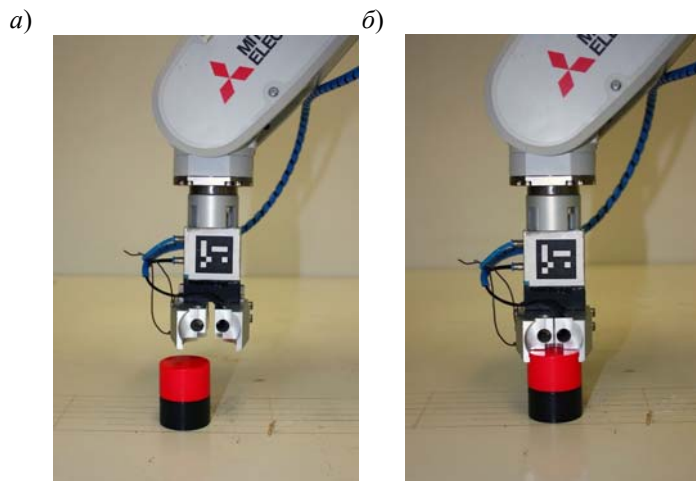


Рис. 5

Для точного подхода схвата манипулятора I к объекту после коррекции координат его расположения в СК C_1 было реализовано дополнительное решение обратной задачи кинематики для устранения выявленной погрешности. Окончательный точный подход манипулятора I к объекту показан рис. 5, б.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований полностью подтвердили работоспособность и эффективность предложенного метода согласованной автоматической работы двух МР. При этом обеспечивается точная работа манипулятора даже с объектами, не наблюдаемыми СТЗ основного МР, на котором он установлен, а также удается устранить погрешности в работе как используемых навигационных систем МР, так и их СТЗ.

Заключение. Предложен новый подход, позволяющий обеспечить согласованное взаимодействие двух МР в автоматическом режиме при выполнении различных технологических операций с объектами в стесненных условиях рабочей среды. При этом необходимые операции выполняются с объектами, которые находятся вне зоны видимости СТЗ основного манипуляционного МР, а координаты текущего пространственного положения этих объектов и их ориентации вначале определяются в СК малогабаритного и маневренного вспомогательного МР с помощью его СТЗ. Затем указанные координаты с неминуемыми погрешностями передаются в СК манипуляционного МР и корректируются (уточняются) там по изложенному в статье алгоритму. Результаты экспериментальных исследований подтвердили работоспособность этого алгоритма без использования специальных калибровочных устройств и без выполнения дополнительных тестовых движений. Работоспособность предложенного алгоритма сохраняется и при расположении обоих МР на неровной и негоризонтальной поверхности. Техническая реализация представленного подхода не вызывает принципиальных затруднений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Andreev V. P., Pryanichnikov V. E.* Operation Environment of Mobile Robots with Supervision Control // Proc. of the 22nd Intern. DAAAM Symp. Vienna, Austria. 2011. Vol. 22, N 1. P. 0021—0022.
2. *Zhang Q., Song B., Cai B., Sun Y.* Design of Coordination System for Composite Mobile Robot Platform Oriented to Nuclear Fusion Vessel // J. of Fusion Energy. 2021. N 40(2). P. 22.
3. *Wu Y., Balatti P., Lorenzini M., Zhao F., Kim W., Ajoudani A.* A teleoperation interface for loco-manipulation control of mobile collaborative robotic assistant // IEEE Robotics and Automation Letters. 2019. N 4(4). P. 3593—3600.
4. *Lee D., Spong M. W.* Passive bilateral control of teleoperators under constant time-delay // Proc. 16th IFAC World Congress. Prague, Czech Rep. 2005. File 03009.pdf. P. 1—6.
5. *Katsurin A.* System of Telecontrol by the Mobile Robot with Movable Camera // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 643. P. 9—14.
6. *Филаретов В. Ф., Кацурин А. А., Пугачев Ю. А.* Метод полуавтоматического комбинированного управления манипулятором с помощью подвижной телекамеры // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 2. С. 38—45.
7. *Филаретов В. Ф., Кацурин А. А.* Метод полуавтоматического позиционного управления манипулятором с помощью телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию своей оптической оси // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 9. С. 15—22.
8. *Филаретов В. Ф., Кацурин А. А.* Система телеуправления многозвенным манипулятором, установленным на мобильном роботе // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. № 12. С. 40—48.
9. *Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А.* Метод формирования гладких траекторий движения мобильных роботов в неизвестном заранее окружении // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2017. № 4. С. 174—184.
10. *Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш.* Информационно-управляющая система для мобильных роботов // Автометрия. 2015. Т. 51, № 5. С. 92—100.

11. Xu P., Zheng J., Zhang J., Zhang K., Cui Y., Tang Q. Distributed position-force control for cooperative transportation with multiple mobile manipulators // *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2021. Vol. 12690 LNCS. P. 111—118.
12. Mendiburu F. J., Morais M. R. A., Lima A. M. N. Behavior coordination in multi-robot systems // *Proc. IEEE Intern. Conf. on Automatica (ICA-ACCA)*. 2016. P. 1—7.
13. Viegas C., Tavakoli M., Lopes P., Dessi R., De Almeida A. T. SCALA-A scalable rail-based multirobot system for large space automation: Design and development // *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*. 2017. N 22(5). P. 2208—2217.
14. Riccio F., Borzi E., Gemignani G., Nardi D. Multi-robot search for a moving target: Integrating world modeling, task assignment and context // *Proc. IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2016. P. 1879—1886.
15. Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Лапин Б. С., Семенов Е. А., Собольников С. А., Суханов А. Н. Система группового транспортного управления мобильными наземными роботами на различных грунтах // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2020. Т. 8, № 1. С. 61—71.
16. Меркулов В. И. Синтез согласованного управления группой объектов // *Динамика сложных систем — XXI век*. 2016. Т. 10, № 2. С. 23—27.
17. Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семенов Е. А., Собольников С. А., Суханов А. Н. О научных задачах выполнения транспортных операций группой мобильных роботов // *Экстремальная робототехника*. 2016. № 1. С. 25—30.
18. Филаретов В. Ф., Кацурун А. А. Совместная работа двух мобильных роботов при автоматическом выполнении манипуляционных операций // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2018. Т. 19, № 8. С. 529—535.
19. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.
20. Filaretov V., Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A., Mursalimov E. An new approach for automatization of cutting of flexible items by using multilink manipulators with vision system // *Proc. of the 22nd Intern. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM2014)*, Ischia, Italy. 2014. P. 1330—1335.
21. Filaretov V., Katsurin A., Chyi-Yeu Lin. System of Telecontrol by Manipulators for Automatic Grasp of Objects // *Proc. of the Intern. Conf. on Intelligent Computing and Control*. Bangkok, Thailand. 2011. P. 1—4.
22. Cook G., Zhang F. *Mobile robots: Navigation, Control and Sensing, Surface Robots and AUVS*. Wiley, 2020. P. 1—329.

Сведения об авторах

Владимир Федорович Филаретов

— д-р техн. наук, профессор; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, лаборатория робототехнических систем; заведующий лабораторией; Дальневосточный федеральный университет, департамент автоматизации и робототехники; директор;
E-mail: filaretov@inbox.ru

Алексей Анатольевич Кацурун

— канд. техн. наук; Дальневосточный федеральный университет, департамент автоматизации и робототехники; Институт проблем морских технологий ДВО РАН, лаборатория интеллектуальных информационных систем для морских роботов; ст. научный сотрудник;
E-mail: katsurin@mail.ru

Поступила в редакцию 04.06.2022; одобрена после рецензирования 27.06.2022; принята к публикации 30.07.2022.

REFERENCES

1. Andreev V.P., Pryanichnikov V.E. *Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, Vienna, Austria, 2011, no. 1(22), pp. 0021—0022.
2. Zhang Q., Song B., Cai B., Sun Y. *Journal of Fusion Energy*, 2021, no. 2(40), pp. 22.
3. Wu Y., Balatti P., Lorenzini M., Zhao F., Kim W., Ajoudani A. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, no. 4(4), pp. 3593—3600.
4. Lee D., Spong M.W. *Proc. 16 IFAC World Congress*, Prague, Czech Rep., 2005, file 03009.pdf (CD-ROM).
5. Katsurin A. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 643, pp. 9—14.

6. Filaretov V.F., Katsurin A.A., Pugachev Yu.A. *Mehatronika, Avtomatizacia, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control), 2009, no. 2, pp. 38–45. (in Russ.)
7. Filaretov V.F., Katsurin A.A. *Mehatronika, Avtomatizacia, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control), 2008, no. 9, pp. 15–22. (in Russ.)
8. Filaretov V.F., Katsurin A.A. *Information and Control Systems*, 2018, no. 12, pp. 40–48. (in Russ.)
9. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, no. 4(56), pp. 738–748.
10. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Mursalimov E.Sh. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, no. 5(51), pp. 505–511.
11. Xu P., Zheng J., Zhang K., Cui Y., Tang Q. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2021, vol. 12690 LNCS, pp. 111–118.
12. Mendiburu F.J., Morais M.R.A., Lima A.M.N. *Proc. of 2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, 2016, pp. 1–7.
13. Viegas C., Tavakoli M., Lopes P., Dessi R., De Almeida A.T. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, no. 5(22), pp. 2208–2217.
14. Riccio F., Borzi E., Gemignani G., Nardi D. *Proc. of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016, pp. 1879–1886.
15. Gradetsky V.G., Ermolov I.I., Knyaz'kov M.M., Lapin B.S., Semenov E.A., Sobol'nikov S.A., Sukhanov A.N. *Robotics and Technical Cybernetics*, 2020, no. 1(8), pp. 61–71. (in Russ.)
16. Merkulov V.I. *Journal Dynamics of Complex Systems - XXI century*, 2016, no. 2(10), pp. 23–27. (in Russ.)
17. Gradetsky V.G., Ermolov I.I., Knyaz'kov M.M., Semenov E.A., Sobol'nikov S.A., Sukhanov A.N. *Extreme Robotics*, 2016, no. 1, pp. 25–30. (in Russ.)
18. Filaretov V.F., Katsurin A.A. *Mehatronika, Avtomatizacia, Upravlenie* (Mechatronics, Automation, Control), 2018, no. 8(19), pp. 529–535. (in Russ.)
19. Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami* (Fundamentals of Manipulation Robot Control), Moscow, 2004, 480 p. (in Russ.)
20. Filaretov V., Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A., Mursalimov E. *Proc. of 22nd International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM2014)*, Ischia, Italy, 2014, pp. 1330–1335.
21. Filaretov V., Katsurin A., Chyi-Yeu Lin, *Proc. of 2011 International Conference on Intelligent Computing and Control*, Bangkok, Thailand, 2011, pp. 1–4.
22. Cook G., Zhang F. *Mobile robots: Navigation, Control and Sensing, Surface Robots and AUVS*, Wiley, 2020, 329 p.

Data on authors

- Vladimir F. Filaretov** — Dr. Sci., Professor; Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the RAS, Laboratory of Robotic Systems; Head of the Laboratory; Far Eastern Federal University, Department of Automation and Robotics; Director; E-mail: filaretov@inbox.ru
- Alexey A. Katsurin** — PhD; Far Eastern Federal University, Department of Automation and Robotics; Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the RAS, Laboratory of Intelligent Information Systems for Marine Robots; Senior Researcher; E-mail: katsurin@mail.ru

Received 04.06.2022; approved after reviewing 27.06.2022; accepted for publication 30.07.2022.