

В. Ф. Филаретов, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией, filaretov@inbox.ru,
А. А. Кацурин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., katsurin@mail.ru,
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН г. Владивосток,
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Совместная работа двух мобильных роботов при автоматическом выполнении манипуляционных операций¹

В настоящее время манипуляционные мобильные роботы (МР) активно используются при проведении работ в труднодоступных или опасных для человека местах. Однако в процессе их индивидуальной работы могут возникать ситуации, когда используемые ими системы технического зрения (СТЗ) не позволяют полностью или частично наблюдать объекты работ. В этом случае дополнительно могут использоваться вспомогательные малогабаритные и высокоманевренные МР, также оснащенные СТЗ. Но применение вспомогательных МР неизбежно приводит к появлению погрешностей при определении положений объектов работ в системе координат основного манипуляционного МР. Поэтому возникает необходимость создания новых подходов и методов согласованного управления несколькими МР и точного определения их взаимного расположения для выполнения заданных манипуляционных операций в полностью автоматическом режиме.

В статье рассмотрены метод и алгоритм автоматического выполнения манипуляционных операций в процессе совместной работы двух МР. Первый из них (основной) оборудован манипулятором и СТЗ, а второй (вспомогательный и более маневренный) — только СТЗ. Предложенная система управления позволяет точно выполнять манипуляционные операции с различными объектами в экстремальных условиях, даже если объект работ находится вне зоны видимости СТЗ первого робота. При этом пространственные положения и ориентации объектов работ определяются и (при необходимости) корректируются с помощью СТЗ вспомогательного робота и передаются по каналам связи в управляющую систему основного робота, привязываясь уже к его системе координат. Разработанная система позволяет определить, а затем и компенсировать с помощью СТЗ не только погрешности определения координат объектов работ, но и погрешности работы навигационных систем обоих МР за счет выполнения пробных (тестовых) движений рабочего органа манипулятора. Результаты математического моделирования полностью подтвердили работоспособность и эффективность предложенного подхода к совместной работе двух МР в автоматическом режиме.

Ключевые слова: мобильный робот, групповое управление, система управления, манипулятор, подвижная телекамера

Введение

В настоящее время мобильные роботы (МР) уже активно используются при проведении работ в труднодоступных или опасных для человека местах. Выполнение рабочих операций в таких условиях осложняется и трудно поддается полной автоматизации. Поэтому обычно эти работы выполняются в полуавтоматическом режиме управления, когда оператор управляет манипулятором, установленным на мобильном основании [1—4] с помощью задающего устройства, ориентируясь только по изображению рабочего пространства на экране телемонитора.

Для систем с такими мобильными роботами уже решены многие задачи навигации и управления [5—7].

Однако в процессе работы МР с манипулятором могут возникать ситуации, когда его система технического зрения (СТЗ) не позволяет наблюдать объект работ. В этом случае для наблюдения за этим объектом целесообразно использовать более маневренный второй МР, также оснащенный СТЗ. При этом желательно, чтобы используемые СТЗ имели возможность изменения ориентации своих оптических осей для получения лучшего обзора рабочего пространства и объекта работ [7—9]. Но применение вспомогательного МР неизбежно приводит к появлению погрешностей при определении положения объекта работ в системе координат

¹ Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (гранты 16-29-04195, 16-07-00718).

(СК) основного МР. В результате не удастся выполнять требуемые манипуляционные операции в полностью автоматическом режиме.

Анализ опубликованных работ показал, что в настоящее время проблема групповой работы МР при выполнении манипуляционных операций в автоматическом режиме не решена. Зарубежные и российские исследователи в основном работают в области создания методов управления группами однотипных МР [10–14] или в области транспортировки больших объектов этими группами [15, 16]. Известны публикации, посвященные работе отдельно подводных роботов [17] или манипуляторов [18] в автоматическом режиме, но в них не предусмотрена их совместная работа в составе группы. Таким образом, по-прежнему актуальной остается задача создания новых подходов, методов и алгоритмов согласованного управления группой МР для автоматического выполнения манипуляционных операций.

1. Постановка задачи

В работе ставится и решается задача разработки нового метода совместного управления МР, один из которых (основной) оборудован манипулятором и СТЗ, а второй (вспомогательный) — только СТЗ. Создаваемая система должна предназначаться для автоматического выполнения манипуляционных операций с различными объектами в экстремальных условиях, когда объект работ находится вне зоны видимости СТЗ основного робота. При этом пространственное положение и ориентация указанного объекта должны определяться СТЗ вспомогательного робота и передаваться по каналам связи в СК основного робота. Синтезируемая система должна обеспечивать заданную

точность автоматического выполнения манипуляционных операций с объектом за счет выявления и устранения погрешностей, возникающих при определении его положения.

2. Описание совместной работы двух мобильных роботов

На рис. 1 показана обобщенная схема предлагаемой системы, состоящей из двух МР 1 и 2. Как уже отмечалось ранее, при работе основного МР 1, оснащенного манипулятором 3 и СТЗ 4, могут возникать ситуации, когда эта СТЗ не позволяет наблюдать объект работ 7. В этом случае используется более маневренный второй МР 2, оснащаемый своей СТЗ 5. В СТЗ 4 и 5 используются телекамеры, оптические оси которых могут менять свою пространственную ориентацию. МР 2 подходит (или подлетает при использовании летательных МР) к объекту 7 с удобного ракурса так, чтобы одновременно был виден этот объект и калибровочный инструмент (маркер) 6, установленный на основном МР на гибком стержне. Этот МР одновременно сканирует их с помощью своей СТЗ и определяет их координаты в СК C_2 . Затем эти координаты с помощью навигационной системы МР 2 из СК C_2 переводятся в абсолютную СК (АСК) C_0 , а из нее с помощью навигационной системы МР 1 — в СК C_1 .

Поскольку СТЗ всегда определяют координаты объектов работ с погрешностями, то после передачи пространственных координат объекта 7 из СК C_2 в АСК C_0 , а затем и в СК C_1 указанные координаты в C_1 будут заданы с погрешностями. В результате без предварительного уточнения этих координат осуществлять точное автоматическое выполнение технологических операций на объекте 7, ориентируясь

только на исходную информацию, полученную с помощью СТЗ 5 и переданную в СК C_1 , манипулятор 3 не сможет. Для качественного выполнения отмеченных операций указанные координаты объекта 7 в СК C_1 должны быть уточнены. Для этого используются координаты калибровочного инструмента 6, полученные с помощью СТЗ 5 и также переданные в СК C_1 . Причем эти координаты будут отличаться от координат реального инструмента 6 в этой СК

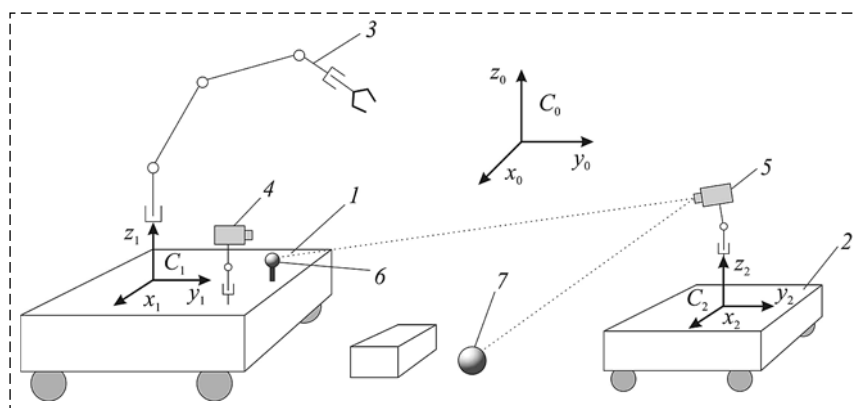


Рис. 1. Схема совместной работы двух мобильных роботов

на значение той же погрешности, так как объект работ и калибровочный инструмент одновременно наблюдаются СТЗ 5.

Для уточнения координат объекта 7 в СК C_1 рабочий орган манипулятора 3 в этой СК перемещается к виртуальной модели калибровочного инструмента, расположенной рядом с реальным калибровочным инструментом 6, т. е. осуществляется пробный подход манипулятора к этому инструменту 6. Затем СТЗ 5 фиксирует отклонения пространственных координат реального калибровочного инструмента 6 от рабочего органа манипулятора 3 и с помощью системы цифровой обработки видеoinформации определяет реальные отклонения этого органа от калибровочного инструмента 6 в СК C_2 , уточняя полученные ранее координаты модели объекта работ 7 в СК C_1 .

Поскольку указанные операции переноса координат калибровочного инструмента и объекта работ осуществляются одновременно при неподвижном положении МР 1 и МР 2, то ошибки определения их пространственных координат в СК C_1 будут одинаковыми. Поэтому координаты объекта 7 после выполнения указанной манипуляционной операции и расчетов будут определяться точно. В результате манипулятор 3 сможет точно выполнить заданные технологические операции с объектом 7, который находится вне поля зрения его СТЗ.

Гибкий стержень для калибровочного инструмента 6 необходим на случай, если после первоначальных перемещений манипулятора 3 в окрестность этого инструмента его рабочий орган столкнется с ним.

3. Описание алгоритма работы системы

Для реализации предложенного метода автоматического выполнения манипуляционных операций был разработан алгоритм, этапы которого описаны ниже. При описании алгоритма введена матрица однородных преобразований $T_j^i \in T^{4 \times 4}$, включающих элементарные повороты и сдвиги (эта матрица преобразует вектор, заданный в повернутой и сдвинутой СК C_j , в вектор, заданный в неподвижной СК C_i [19]).

Этап 1. На этом этапе определяются положение и ориентация МР в АСК C_0 : $\mathbf{c}_{10} = [x_{10} \ y_{10} \ z_{10} \ 1]^T$, $\mathbf{c}_{20} = [x_{20} \ y_{20} \ z_{20} \ 1]^T$ — координаты центров СК C_1 и C_2 основного и вспомогательного МР, φ_{10} , φ_{20} — углы поворота основного и вспомогательного МР относительно

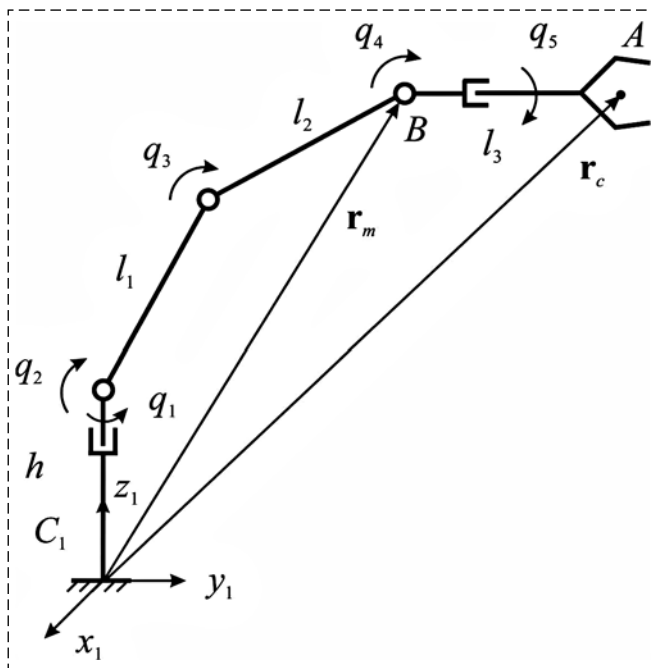


Рис. 2. Кинематическая схема используемого манипулятора

АСК (углы поворотов СК C_1 и C_2 вокруг вертикальных осей z_1 и z_2 , соответственно). Здесь же определяются начальные значения векторов положения рабочего органа $\mathbf{r}_c$ (точка A) и манипулятора $\mathbf{r}_m$ (точка B) в СК C_1 (рис. 2).

Этап 2. Вспомогательный МР с помощью СТЗ 5 определяет координаты объекта 7 $\mathbf{o}_{c2} = [x_{oc2} \ y_{oc2} \ z_{oc2} \ 1]^T$ и инструмента 6 (маркера) $\mathbf{m}_{c2} = [x_{mc2} \ y_{mc2} \ z_{mc2} \ 1]^T$ в своей СК C_2 . Поскольку в качестве СТЗ МР используется подвижная телекамера, то при вычислении указанных координат автоматически учитывается ее текущая ориентация [7–9].

Полученные координаты передаются в АСК C_0 . Для этого векторы $\mathbf{o}_{c2}$ и $\mathbf{m}_{c2}$ умножаются на матрицу однородного преобразования T_2^0 , связывающую СК C_0 и C_2 , которая предусматривает поворот на угол φ_{20} вокруг оси z_0 и перенос на вектор $\mathbf{c}_{20}$:

$$\mathbf{m}_{c0} = T_2^0 \mathbf{m}_{c2} = \begin{bmatrix} c_{\varphi 2} & -s_{\varphi 2} & 0 & x_{20} \\ s_{\varphi 2} & c_{\varphi 2} & 0 & y_{20} \\ 0 & 0 & 1 & z_{20} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{mc2} \\ y_{mc2} \\ z_{mc2} \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{o}_{c0} = T_2^0 \mathbf{o}_{c2} = \begin{bmatrix} c_{\varphi 2} & -s_{\varphi 2} & 0 & x_{20} \\ s_{\varphi 2} & c_{\varphi 2} & 0 & y_{20} \\ 0 & 0 & 1 & z_{20} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{oc2} \\ y_{oc2} \\ z_{oc2} \\ 1 \end{bmatrix},$$

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

Затем обеспечивается передача этих координат в СК C_1 . При этом выполняется поворот на угол $(-\varphi_{10})$ вокруг оси z_1 и перенос на вектор $(-\mathbf{c}_{10})$, (поскольку АСК C_0 повернута и смещена относительно СК C_1):

$$\mathbf{m}_{c1} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{m}_{c0} = \begin{bmatrix} c_{\varphi 1} & s_{\varphi 1} & 0 & -x_{10} \\ -s_{\varphi 1} & c_{\varphi 1} & 0 & -y_{10} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{mc0} \\ y_{mc0} \\ y_{mc0} \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{o}_{c1} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{o}_{c0} = \begin{bmatrix} c_{\varphi 1} & s_{\varphi 1} & 0 & -x_{10} \\ -s_{\varphi 1} & c_{\varphi 1} & 0 & -y_{10} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{oc0} \\ y_{oc0} \\ y_{oc0} \\ 1 \end{bmatrix},$$

где $c_{\varphi 1}, s_{\varphi 1} — \cos \varphi_1, \sin \varphi_1$ соответственно.

Этап 3. На этом этапе в автоматическом режиме выполняется пробный подход рабочего органа манипулятора к калибровочному инструменту 6. Вначале по вычисленному положению пары векторов $\mathbf{r}_c$ и $\mathbf{r}_m$ вблизи инструмента 6 решается обратная задача кинематики манипулятора и определяются конечные значения всех его степеней подвижности, которые являются задающими воздействиями для всех следящих приводов. Затем обеспечивается движение манипулятора и его рабочего органа к построенной виртуальной модели калибровочного инструмента, алгоритм которого подробно описан в работе [20].

Этап 4. Определение конечных координат точки A с помощью СТЗ 5 и расчет пространственного отклонения (ошибки позиционирования) этой точки от калибровочного инструмента в СК C_2 с помощью выражения $\Delta_{c2} = \mathbf{r}_{c2} - \mathbf{m}_{c2}$, где $\mathbf{r}_{c2}$ — конечное значение вектора положения рабочего органа (точки A).

Этап 5. Пересчет координат объекта 7 с учетом выявленной ошибки позиционирования рабочего органа в СК C_2 по формуле $\mathbf{o}_{c2.cor} = \mathbf{o}_{c2} - \Delta_{c2}$ и передача скорректированных координат этого объекта сначала в АСК C_0 , а затем и в СК C_1 :

$$\mathbf{o}_{c1.cor} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{T}_2^0 \mathbf{o}_{c2.cor} = \begin{bmatrix} c_{\varphi 1} & s_{\varphi 1} & 0 & -x_{10} \\ -s_{\varphi 1} & c_{\varphi 1} & 0 & -y_{10} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{\varphi 2} & -s_{\varphi 2} & 0 & x_{20} \\ s_{\varphi 2} & c_{\varphi 2} & 0 & y_{20} \\ 0 & 0 & 1 & z_{20} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{oc2.cor} \\ y_{oc2.cor} \\ y_{oc2.cor} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Аналогично определяются и передаются в СК C_1 точные координаты инструмента 6

с учетом ошибки позиционирования для выполнения проверочного подхода к этому инструменту:

$$\mathbf{m}_{c1.cor} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{T}_2^0 \mathbf{m}_{c2.cor} = \begin{bmatrix} c_{\varphi 1} & s_{\varphi 1} & 0 & -x_{10} \\ -s_{\varphi 1} & c_{\varphi 1} & 0 & -y_{10} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{\varphi 2} & -s_{\varphi 2} & 0 & x_{20} \\ s_{\varphi 2} & c_{\varphi 2} & 0 & y_{20} \\ 0 & 0 & 1 & z_{20} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{mc2.cor} \\ y_{mc2.cor} \\ y_{mc2.cor} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Этап 6. На этом этапе для проверки точности определения положений объектов после введенной коррекции вновь рассматривается подход рабочего органа манипулятора к инструменту 6. При этом выполняются действия, аналогичные действиям, представленным на этапе 3, но при определении точки подхода рабочего органа к указанному инструменту используются уже его уточненные координаты в СК C_1 , вычисленные на этапе 5. Если требуемая точность подхода, контролируемая СТЗ 5, обеспечивается, то осуществляется переход к следующему этапу, а если нет, то этапы 4—6 повторяются до достижения требуемой точности.

Этап 7. После проверки точности позиционирования рабочего органа относительно инструмента 6 осуществляется подход манипулятора к объекту работ 7 для последующего выполнения требуемых действий в автоматическом режиме. Эта операция также контролируется СТЗ 5. Содержание этого этапа аналогично содержанию этапа 3. При точном подходе начинаются рабочие операции с объектом. Если же требуемая точность не обеспечивается, то работа манипулятора прекращается, и оператору сообщается о невозможности дальнейших действий.

Предложенный алгоритм позволяет определить, а затем и скомпенсировать с помощью СТЗ не только погрешности определения координат объектов, но и погрешности работы навигационных систем (погрешности определения положения и ориентации обоих МР в АСК C_0). Поскольку в этом случае при пробном подходе к инструменту 6 пространственное отклонение Δ_{c2} точки A от этого инструмента будет зависеть как от ошибок определения посредством СТЗ координат инструмента, так и от ошибок навигации МР, то пересчет координат этого инструмента и объекта работ с учетом Δ_{c2} позволит скомпенсировать все указанные ошибки.

4. Исследование работы системы

Для проверки работоспособности предлагаемого выше алгоритма работы системы, состоящей из двух мобильных роботов, было проведено ее математическое моделирование.

Кинематическая схема манипулятора основного МР изображена на рис. 2. Этот манипулятор имеет параметры $l_1 = 0,25$ м, $l_2 = 0,2$ м, $l_3 = 0,215$ м, $h = 0,21$ м. Координаты начала СК C_1 и СК C_2 (мобильных роботов), калибровочного инструмента и объекта работ в АСК C_0 , соответственно, описываются векторами: $\mathbf{c}_{10} = [1 \ -0,3 \ 0 \ 1]^T$, $\mathbf{c}_{20} = [1 \ 0,3 \ 0 \ 1]^T$, $\mathbf{m}_{c0} = [1 \ -0,25 \ 0,1 \ 1]^T$, $\mathbf{o}_{c0} = [0,9 \ 0 \ 0,15 \ 1]^T$.

При моделировании полагалось, что навигационные системы обоих МР точно определяют их координаты в АСК C_0 . В начале моделирования манипулятор имел следующие исходные значения обобщенных координат: $q_1 = 0$, $q_2 = \pi/8$, $q_4 = \pi/6$, $q_5 = 0$.

На рис. 3 и 4 показаны изменения координат точек A и B манипулятора (см. рис. 2) при его движении в СК C_1 , когда:

1. СТЗ 5 точно определяет координаты инструмента 6 и объекта 7 в СК C_2 .
2. СТЗ 5 определяет координаты калибровочного инструмента 6 и объекта 7 в СК C_2 с ошибками по осям x и y , равными $\Delta_{xc2} = \Delta_{yc2} = 0,05$ м.

На рис. 3 и 4 цифрой 0 обозначено начальное положение рабочего органа (точки A) манипулятора, цифрой 1 — положение калибровочного инструмента 6, а цифрой 2 — положение объекта работ в СК C_1 . Из рис. 3 видно, что при точной работе СТЗ 5 рабочий орган из исходного положения (точка 0) сразу достигает точки 1 расположения инструмента 6 (координаты вектора $\mathbf{r}_c$ в конце движения манипулятора совпадают с координатами инструмента 6). При этом рабочий орган расположен вертикально (векторы $\mathbf{r}_c$ и $\mathbf{r}_m$ отличаются по координате z на длину звена манипулятора l_3). Затем точка A манипулятора точно подходит к объекту работ 7 (точка 2).

На рис. 4 цифрой 1' обозначено ошибочное положение инструмента 6 в СК C_1 , полученное на основе ошибочных данных СТЗ 5. Из рис. 4 видно, что рабочий орган при движении к инструменту 6 вначале не достигает точки 1. После этого пробного подхода по текущему положению рабочего органа (точка 1') и инструмента 6 (точка 1), определяемому СТЗ 5, рассчитывается ошибка позиционирования и выполняется корректировка положения этого

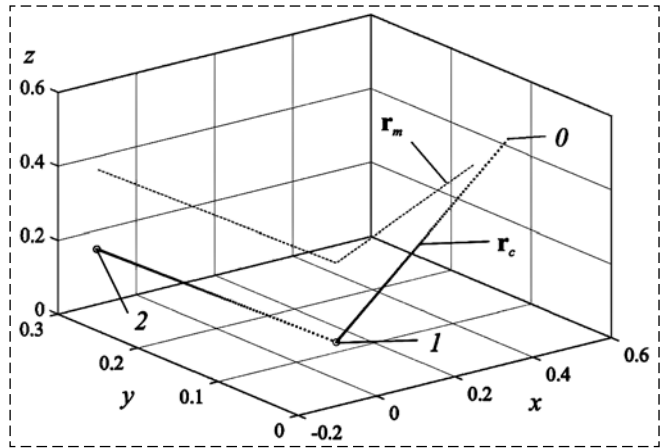


Рис. 3. Пространственное движение манипулятора и характерной точки рабочего органа при точной работе СТЗ

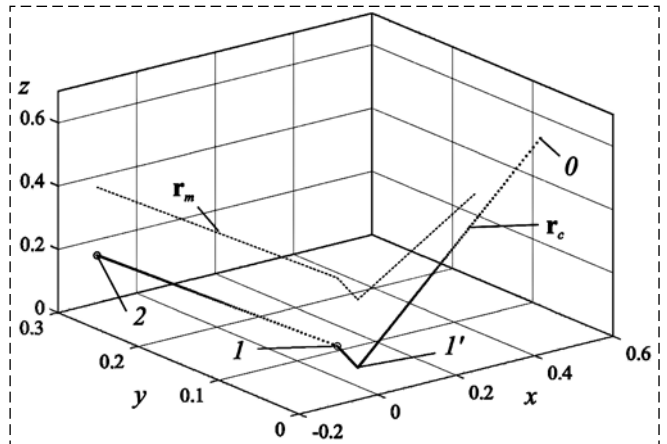


Рис. 4. Пространственное движение манипулятора и точки A рабочего органа при работе СТЗ с ошибками

инструмента и объекта 7 (этапы 4 и 5 алгоритма). Затем точка A рабочего органа движется уже точно к инструменту 6 (точка 1) и к объекту 7 (точка 2).

Таким образом, результаты выполненного математического моделирования полностью подтвердили работоспособность и эффективность предлагаемого подхода к совместной работе двух МР. Этот подход позволяет осуществлять точную работу манипулятора даже с объектами, которые не наблюдаются СТЗ МР, на котором он установлен.

Заключение

В работе предложен новый подход к точному автоматическому выполнению манипуляционных операций с помощью двух МР, один из которых оборудован манипулятором и СТЗ, а второй — вспомогательный (более маневренный) — только СТЗ. Созданный алгоритм по-

звolyет точно работать с объектами, находящимися вне зоны видимости СТЗ основного робота. При этом пространственное положение и ориентация указанного объекта определяются СТЗ вспомогательного робота. Предложенный подход позволяет сохранить заданную точность автоматического выполнения манипуляционных операций с различными объектами даже при наличии погрешностей при определении положения и ориентации объектов работ, а также ошибок навигации обоих МР за счет выполнения пробных (тестовых) движений рабочего органа манипулятора. Техническая реализация предложенного подхода не вызывает принципиальных затруднений.

Список литературы

1. Andreev V. P., Pryanichnikov V. E. Operation Environment of Mobile Robots with Supervision Control // Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium. Vienna, Austria. 2011. Volume 22, No. 1. P. 0021–0022.
2. Cetin L., Baser O., Keskin O., Uyar E. Vision Based Control Algorithm for a Mobile Manipulator // Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium. Vienna, Austria. 2011. Volume 22, No. 1. P. 0449–0450.
3. Changhwan C., Yongchil S., Seungho J., Seungho K. Tele-Operated Fuel Handling Machine Manipulation Robot for the Nuclear Power Plants // Proc. CD-ROM of the 6th Asian Control Conf. Bali, Indonesia. 2006. P. 983–987.
4. Lee D., Spong M. W. Passive bilateral control of teleoperators under constant time-delay // Proc. 16 IFAC World Congress. Prague, Czech Rep. 2005. File 03009.pdf (CD-ROM). P. 1–6.
5. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А. Метод формирования гладких траекторий движения мобильных роботов в неизвестном заранее окружении // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2017. № 4. С. 174–184.
6. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш. Информационно-управляющая система для мобильных роботов // Автоматика. 2015. Т. 51. № 5. С. 92–100.
7. Katsurin Alexey. System of Telecontrol by the Mobile Robot with Movable Camera // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 643. P. 9–14.
8. Филаретов В. Ф., Кацури А. А., Пугачев Ю. А. Метод полуавтоматического комбинированного управления манипулятором с помощью подвижной телекамеры // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 2. С. 38–45.
9. Филаретов В. Ф., Кацури А. А. Метод полуавтоматического позиционного управления манипулятором с помощью телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию своей оптической оси // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 9. С. 15–22.
10. Fernando J. Mendiburu, Marcos R. A. Morais, Antonio M. N. Lima. Behavior coordination in multi-robot systems // Proc. of 2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA). 2016. P. 1–7.
11. Xiao Yu, Lu Liu, Gang Feng. Distributed circular formation control of multi-robot systems with directed communication topology // Proc. of 2016 35th Chinese Control Conference (CCC). 2016. P. 8014–8019.
12. Francesco Riccio, Emanuele Borzi, Guglielmo Gemignani, Daniele Nardi. Multi-robot search for a moving target: Integrating world modeling, task assignment and context // Proc. of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. P. 1879–1886.
13. Abraham P. Vinod, Yuqing Tang, Meeko M. K. Oishi, Katia Sycara, Christian Lebiere, Michael Lewis. Validation of cognitive models for collaborative hybrid systems with discrete human input // Proc. of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. P. 3339–3346.
14. Меркулов В. И. Синтез согласованного управления группой объектов // Динамика сложных систем — XXI век. 2016. Т. 10. № 2. С. 23–27.
15. Abel Garcia Barrientos, Joel Lara Lopez, Eduardo Steed Espinoza, Jose Hoyo, Guillermo Valencia Palomo. Object Transportation Using a Cooperative Mobile Multi-Robot System // IEEE Latin America Transactions. 2016. Vol. 14, Issue 3. P. 1184–1191.
16. 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.
17. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Коноплин Н. Ю. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 8. С. 543–549.
18. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Коноплин А. Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 47–54.
19. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 480 с.
20. Vladimir Filaretov, Alexey Katsurin, Chyi-Yeu Lin. System of Telecontrol by Manipulators for Automatic Grasp of Objects // Proc. of 2011 International Conference on Intelligent Computing and Control (ICOICC 2011). Bangkok, Thailand. May 27–28, 2011. P. 1–4.

Joint Work of Two Mobile Robots at the Automatic Execution of Manipulation Operations

V. F. Filaretov, filaretov@inbox.ru, A. A. Katsurin, katsurin@mail.ru

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation,
Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690091, Russian Federation

Corresponding author: Katsurin Aleksey A., Ph. D., Senior staff scientist, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation, Associate Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690091, Russian Federation, e-mail: katsurin@mail.ru

Received on May 04, 2018

At present, manipulative mobile robots (MR) are actively used in work in hard-to-reach or dangerous places for human beings. However, in the process of their individual work, situations may arise where their vision systems (VS) do not allow

to observe the work objects fully or partially. In this case, auxiliary compact and highly maneuverable MR, also equipped with VS, can additionally be used. But the use of auxiliary MR inevitably leads to the appearance of errors in determining the positions of objects of work in the coordinate system of the main manipulative MR. Therefore, there is a need to create new approaches and methods for the coordinated control of several MRs and accurate determination of their relative positions for performing specified manipulation operations in a fully automatic mode.

The paper considers the method and algorithm for automatic execution of manipulation operations in the process of joint work of two MRs. The first of them (the main one) is equipped with a manipulator and VS, and the second one (auxiliary and more maneuverable) — only VS. The proposed control system allows to accurately perform manipulation operations with various objects in extreme conditions, even if the object of work is out of sight of the VS of the first robot. In this case, the spatial positions and orientations of the objects of work are determined and (if necessary) are corrected using the VS of the auxiliary robot and transmitted through the communication channels to the control system of the main robot, already being attached to its coordinate system. The developed system allows to determine and then compensate using VS not only the errors in determining the coordinates of work objects, but also the errors in the operation of the navigation systems of both MRs by performing trial (test) movements of the manipulator's working tool. The results of mathematical modeling fully confirmed the operability and effectiveness of the proposed approach to the joint operation of two MRs in the automatic mode.

Keywords: mobile robot, multi-robot system, control system, manipulator, mobile camera

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects no. 16-29-04195, 16-07-00718.

For citation:

Filaretov V. F., Katsurin A. A. Joint Work of Two Mobile Robots at the Automatic Execution of Manipulation Operations, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 8, pp. 529—535.

DOI: 10.17587/mau.19.529-535

References

1. Andreev V. P., Pryanichnikov V. E. Operation Environment of Mobile Robots with Supervision Control, *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium. Vienna, Austria*, 2011, vol. 22, no. 1, pp. 0021—0022.
2. Cetin L., Baser O., Keskin O., Uyar E. Vision Based Control Algorithm for a Mobile Manipulator, *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium. Vienna, Austria*, 2011, vol. 22, no. 1, pp. 0449—0450.
3. Changhwan C., Yongchil S., Seungho J., Seungho K. Tele-Operated Fuel Handling Machine Manipulation Robot for the Nuclear Power Plants, *Proc. CD-ROM of the 6th Asian Control Conf. Bali, Indonesia*, 2006, pp. 983—987.
4. Lee D., Spong M. W. Passive bilateral control of teleoperators under constant time-delay, *Proc. 16 IFAC World Congress. Prague, Czech Rep.*, 2005, File 03009.pdf (CD-ROM), pp. 1—6.
5. Filaretov V. F., Yukhimets D. A. Planning smooth paths for mobile robots in an unknown environment, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, vol. 56, no. 4, pp. 738—748.
6. Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Mursalimov E. Sh. Informacionno-upravljajushhaja sistema dlja mobil'nyh robotov (Information-control system for mobile robots), *Avtometrija*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 92—100 (in Russian).
7. Katsurin Alexey. System of Telecontrol by the Mobile Robot with Movable Camera, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 643, pp. 9—14.
8. Filaretov V. F., Katsurin A. A., Pugachev Yu. A. Metod poluavtomaticheskogo kombinirovannogo upravlenija manipuljatorom s pomoshh'ju podvizhnoj telekamery (A method of semi-automatic combined control of a manipulator with the help of a mobile camera), *Mekhatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2009, no. 2, pp. 38—45 (in Russian).
9. Filaretov V. F., Katsurin A. A. Metod poluavtomaticheskogo pozicionnogo upravlenija manipuljatorom s pomoshh'ju telekamery, izmenjajushhej prostranstvennuju orientaciju svoej opticheskoi osi (Method of semi-automatic position control of a manipulator with the help of a camera that changes the spatial orientation of its optical axis), *Mekhatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2008, no. 9, pp. 15—22 (in Russian).
10. Fernando J. Mendiburu, Marcos R. A. Morais, Antonio M. N. Lima. Behavior coordination in multi-robot systems, *Proc.*

of 2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA), 2016, pp. 1—7.

11. Xiao Yu., Lu Liu, Gang Feng. Distributed circular formation control of multi-robot systems with directed communication topology, *Proc. of 2016 35th Chinese Control Conference (CCC)*, 2016, pp. 8014—8019.

12. Francesco Riccio, Emanuele Borzi, Guglielmo Gemignani, Daniele Nardi. Multi-robot search for a moving target: Integrating world modeling, task assignment and context, *Proc. of 2016 IEEE/RSSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016, pp. 1879—1886.

13. Abraham P. Vinod, Yuqing Tang, Meeko M. K. Oishi, Katia Sycara, Christian Lebiere, Michael Lewis. Validation of cognitive models for collaborative hybrid systems with discrete human input, *Proc. of 2016 IEEE/RSSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016, pp. 3339—3346.

14. Merkulov V. I. Sintez soglasovannogo upravlenija gruppov ob'ektov (Synthesis of coordinated control of a group of objects), *Dinamika slozhnyh sistem — XXI vek*, 2016, vol. 10, no. 2, pp. 23—27 (in Russian).

15. Abel Garcia Barrientos, Joel Lara Lopez, Eduardo Steed Espinoza, Jose Hoyo, Guillermo Valencia Palomo. Object Transportation Using a Cooperative Mobile Multi-Robot System, *IEEE Latin America Transactions*, 2016, vol. 14, no. 3, pp. 1184—1191.

16. Gradetsky V. G., Ermolov I. L., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sobolnikov S. A., Sukhanov A. N. O nauchnyh zadachah vypolnenija transportnyh operacij gruppov mobil'nyh robotov (On the scientific tasks of performing transport operations by a group of mobile robots), *Jekstremal'naja robototekhnika*, 2016, no. 1, pp. 25—30 (in Russian).

17. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu. Sistema dlja avtomaticheskogo vypolnenija manipuljacionnyh operacij s pomoshh'ju podvodnogo robota (A system for automatically performing manipulation operations with an underwater robot), *Mekhatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 8, pp. 543—549 (in Russian).

18. Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Konoplin A. Yu. Metod sinteza sistemy avtomaticheskogo upravlenija rezhimom dvizhenija shvata manipuljatora po slozhnym prostranstvennym traektorijam (The method of synthesis of the automatic control system for the movement mode of the manipulator grip on complex spatial trajectories), *Mekhatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2012, no. 6, pp. 47—54 (in Russian).

19. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. Osnovy upravlenija manipuljacionnymi robotami (Fundamentals of manipulation robots), Moscow, BMSTU, 2004, 480 p. (in Russian).

20. Vladimir Filaretov, Alexey Katsurin, Chyi-Yeu Lin. System of Telecontrol by Manipulators for Automatic Grasp of Objects, *Proc. of 2011 International Conference on Intelligent Computing and Control (ICOICC 2011). Bangkok, Thailand. May 27—28, 2011*, pp. 1—4.