

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ МАНИПУЛЯТОРОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ПОДВОДНЫХ АППАРАТАХ

А.Ю. Коноплин, А.П. Юрманов

Рассматривается система поддержки деятельности операторов подводных манипуляторов (ПМ), предназначенная для повышения эффективности сложных манипуляционных операций, выполняемых подводными аппаратами (ПА). Созданная система обеспечивает высокоточное наложение заранее построенных траекторий рабочих инструментов (РИ) многозвенных ПМ на поверхности известных подводных объектов, идентифицируемых с помощью систем технического зрения. При этом оператор наводит оптическую ось телекамеры, установленной на поворотной платформе ПА, и задает требуемую рабочую область. Затем желаемая траектория движения РИ ПМ проецируется на заданную область с учетом формы и пространственного расположения объекта рабочих действий. С помощью графического интерфейса, разработанного с использованием библиотек «OpenGL Core», оператор проверяет правильность наложения траектории на поверхность объекта. Сформированная траектория обрабатывается в автоматическом режиме РИ ПМ с требуемой ориентацией. Система предоставляет возможность визуального контроля выполнения манипуляционных операций путем автоматического наведения оптической оси телекамеры на РИ ПМ. Программная реализация системы выполнена на языке программирования C++. В виртуальной среде V-REP с использованием программного пакета Matlab/Simulink проведено численное моделирование работы предложенной системы в процессе управления многозвенным ПМ, установленным на ПА.

Ключевые слова: супервизорное управление, подводный аппарат, многозвенный манипулятор, облако точек, математическая модель, глубоководные исследования, пространственная траектория, подводные операции, система управления.

Введение

Подводные аппараты (ПА), оснащенные многозвенными подводными манипуляторами (ПМ), находят применение в различных сферах исследования и освоения Мирового океана. Аппараты такого типа позволяют очищать подводные конструкции [1], проводить диагностику подводных трубопроводов и кабелей [2, 3], работать с подводными клапанными системами [3, 4], выполнять сбор научного материала [5, 6], проводить археологические работы [7], очищать корпуса судов от обрастаний [8] и многое другое. При этом до сих пор остается актуальной проблема быстрой утомляемости операторов ПМ, которым одновременно с управлением задающим устройством (репликатором) приходится анализировать большой объем информации, отслеживать взаимное расположение ПА, рабочего инструмента (РИ) ПМ и объекта работ, не имея прямого контакта с этими объектами.

Для повышения эффективности манипуляционных работ и снижения психофизиологических нагрузок на операторов ПМ созданы компьютерные системы [9], позволяющие в реальном времени выполнять операции в супервизорном режиме. В таком режиме управления оператор задает только специальные целеуказания для ПМ, на основании которых в реальном масштабе времени формируются сигналы управления приводами в степенях подвижности ПМ. Некоторые компоненты таких систем испытаны на телеуправляемом ПА «Jason» [10]. В качестве альтернативы трудоемкого ручного управления ПМ в работе [11] предложена стратегия управления ПМ с использованием интерфейса взаимодействия с мозговыми волнами P300. Однако указанные системы не позволяют определять форму объектов работ и автоматически строить сложные пространственные траектории движения РИ ПМ по поверхности этих объектов.

Для обеспечения операторов ПМ наглядной информацией об объектах работ в статье [12] представлен метод, позволяющий строить карту глубины с помощью двух стереокамер, установленных на ПА. За счет совмещения полученной карты и реального изображения формируется объемное представление об окружающей среде, которое может быть использовано для управления ПМ в режиме дополненной реальности. В свою очередь, реализованный в работе [13] подход позволяет выполнять 3D-сканирование с помощью двух многолучевых гидроакустических сонаров ПА, а предложенный в работе [14] алгоритм обеспечивает быстрое реконструирование сканируемой поверхности с учетом наличия шумов в получаемых от многолучевого сонара данных. Перечисленные методы могут успешно использоваться для точного определения пространственного положения и формы подводных объектов с помощью распространенных подводных систем технического зрения (СТЗ).

Существующие системы и методы облегчают восприятие оператором окружающей подводной обстановки и упрощают процесс ручного управления ПМ, но не позволяют автоматизировать построение желаемых траекторий ПМ по поверхностям подводных объектов с последующей автоматической обработкой траекторий РИ ПМ. Следовательно, процесс управления ПМ все еще требует от операторов постоянного контроля и формирования управляющих воздействий. Это приводит к увеличению рабочей нагрузки на операторов и, соответственно, времени выполнения работ.

Поэтому для эффективного выполнения исследовательских и технологических манипуляционных работ операторы должны задавать целевые точки и желаемые пространственные траектории движения РИ ПМ по поверхностям подводных объектов, идентифицируемым с помощью СТЗ. После этого сформированные траектории в автоматическом режиме должны обрабатываться РИ ПМ с требуемой ориентацией. Для формирования таких целеуказаний в работе [15] предложено использовать телекамеру ПА, изменяющую пространственную ориентацию своей оптической оси. С помощью этого метода рассчитываются точки пересечения оптической оси телекамеры с триангуляционной поверхностью объектов, но формирование траекторий ПМ реализовано только для перемещения его РИ в вертикальной плоскости от точки к точке. В результате возникает потребность в создании такой системы, которая обеспечит высокоточное наложение заранее построенных пространственных траекторий ПМ на идентифицированные

поверхности известных подводных объектов. При этом операторы должны иметь возможность не только задавать целеуказания, но и осуществлять проверку построения траекторий ПМ на поверхностях подводных объектов. Кроме того, для обеспечения визуального контроля с высококачественной видеофиксацией процесса выполнения манипуляционной операции необходимо автоматическое наведение оптической оси телекамеры на РИ ПМ в процессе его движения.

1. Построение сложных траекторий движения РИ ПМ по поверхностям подводных объектов

Для манипуляций с подводными клапанными системами, очистки конструкций от заиливания и обрастания, измерения толщины стенок трубопроводов и т. д. РИ ПМ должен двигаться по нелинейным пространственным траекториям. Форма таких объектов работ, как правило, известна, и в этих случаях указанные траектории могут быть построены заранее с учетом требований к выполнению конкретных технологических операций. При этом оператор может визуально определить область подводного объекта, на которую заданная траектория должна быть наложена.

Рассмотрим пример супервизорного управления ПМ со стабилизацией ПА в режиме зависания над подводным объектом [16, 17]. Будем считать, что объект находится в зоне сканирования СТЗ и что это позволяет с высокой точностью формировать облака точек, принадлежащих поверхности этого объекта. На основе облаков точек известными методами [14, 18] строится триангуляционная модель указанной поверхности, представляющая собой множество треугольных пластин, сшитых между собой.

Желаемая траектория движения РИ ПМ может быть изначально задана в виде последовательности точек B_j , где $j = \overline{1, c}$, c – порядковый номер точки в последовательности перемещения РИ ПМ. Также указанная траектория может быть определена в аналитическом виде в связанной с корпусом ПА системе координат (СК) $Oxuz$, начало которой – O расположено в центре величины (водоизмещения) ПА, ось x совпадает с продольной осью ПА, ось z – с его вертикальной осью, а ось y составляет с ними правую тройку. Например, если эта траектория задана в плоскости Oxy в виде $y = f(x)$, то проецироваться на поверхность объекта она должна в направлении еди-

ничного вектора \vec{d} , совпадающего с отрицательным направлением оси z . Чтобы правильно наложить заданную траекторию на объект работ, оператору необходимо указать границы, между которыми желаемая траектория должна быть автоматически спроецирована на поверхность объекта с учетом формы и пространственного расположения этой области объекта. Для формирования целеуказаний может использоваться телекамера ПА, изменяющая пространственную ориентацию своей оптической оси [15]. Посредством наведения этой оптической оси оператор задает начальную A_1 и конечную A_2 точки, принадлежащие подводному объекту и определяющие начало и конец движения РИ ПМ по траектории (рис. 1).

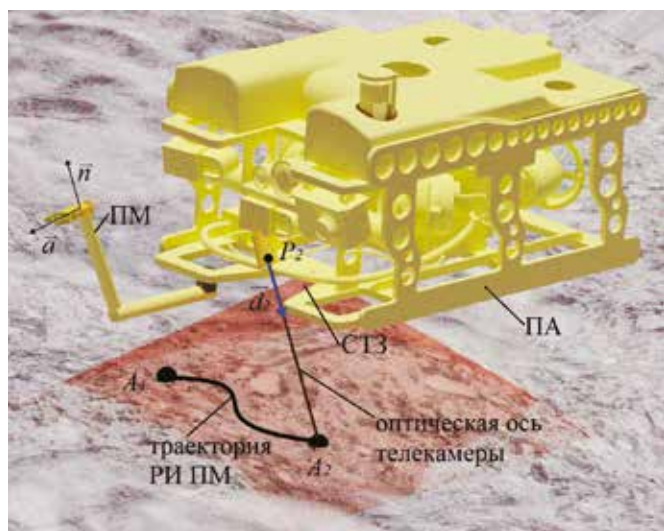


Рис. 1. Выполнение операции в супервизорном режиме

В этом случае точка A_i ($i = \overline{1,2}$) в СК $Oxyz$ будет являться пересечением оптической оси телекамеры, совпадающей с единичным вектором \vec{d}_i , выходящим из точки P_i в направлении подводного объекта (см. рис. 1), с триангуляционной поверхностью, где k -й треугольник задается координатами трех вершин $V_{k0}, V_{k1}, V_{k2}, k = \overline{1,g}, g$ – количество треугольников.

Согласно методу [15], для нахождения в СК $Oxyz$ координат каждой целевой точки A_i вначале определяется, какой из всех g треугольников триангуляционной поверхности в текущий момент времени пересекается оптической осью телекамеры. Треугольник k с вершинами V_{k0}, V_{k1} и V_{k2} , который пересекает эта ось, находится из условий [19]: $0 \leq u_{ik} \leq 1, 0 \leq v_{ik} \leq 1, u_{ik} + v_{ik} \leq 1$, где u_{ik}, v_{ik} – барицентрические координаты точки A_i относительно вершин k -го треугольника. При

этом координаты точки A_i пересечения оси телекамеры с треугольником k вычисляются с помощью выражения [15]:

$$A_i = P_i + \frac{((P_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{(\vec{d}_i \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \vec{d}_i, \quad (1)$$

где (\cdot) – скалярное произведение векторов; (\times) – векторное произведение векторов.

Для проецирования на участок триангуляционной поверхности объекта работ, заключенный между точками A_1 и A_2 , заданную в аналитическом виде траекторию сначала нужно преобразовать в последовательность вспомогательных точек B_j . В таком случае координаты точек B_j вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} B_{jx} &= B_{(j-1)x} + g \\ B_{jy} &= f(B_{jx}) \\ B_{jz} &= 0, \end{aligned}$$

где $f(B_{jx})$ – зависимость y от x согласно заданному аналитическому выражению $y = f(x), B_{1x} = 0; g$ – шаг по оси x , определяющий количество вспомогательных точек B_j и задаваемый в зависимости от параметров этой траектории, а также от степени детализации сканирования подводного объекта. Увеличение количества точек B_j повышает точность сформированной траектории, однако увеличивает количество дальнейших вычислений.

Чтобы при проецировании точек B_j учесть пространственное расположение и ориентацию области объекта работ, необходимо сначала выполнить поворот всех векторов, соединяющих начало O СК $Oxyz$ с точками B_j , на угол $\alpha = \angle(x, \overline{A_1 A_2})$ вокруг оси z . Затем выполняется поворот вокруг оси y СК $Oxyz$ на угол φ , заключенный между вектором $\overline{A_1 A_2}$ и плоскостью Oxy . После этого необходимо выполнить линейный перенос полученных векторов вдоль осей x и y на значения A_{1x} и A_{1y} соответственно. В результате координаты искомых точек B'_j будут определяться с помощью выражения:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} B'_{jx} \\ B'_{jy} \\ B'_{jz} \end{bmatrix} &= R \begin{bmatrix} B_{jx} \\ B_{jy} \\ B_{jz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{1x} \\ A_{1y} \\ 0 \end{bmatrix} \\ R &= R_{z\alpha} R_{y\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \alpha & -\sin \alpha & \sin \varphi \cos \alpha \\ \cos \varphi \sin \alpha & \cos \alpha & \sin \varphi \sin \alpha \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (2) \end{aligned}$$

где $R_{z\alpha}$ и $R_{y\varphi}$ – матрицы элементарных поворотов вокруг осей z и y соответственно, R – матрица сложного поворота [20].

Пересечения проецирующих лучей, выходящих из точек B_j в направлении вектора \vec{o} , с триангуляционной моделью поверхности образуют точки T_j (см. рис. 2). Координаты точек T_j , последовательность которых описывает расположенную между заданными оператором точками A_1, A_2 желаемую траекторию РИ ПМ, определяются с помощью алгоритма Моллера–Трумбора [19] с учетом выражения (1) в виде:

$$T_j = B'_j + \frac{((B'_j - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{(\vec{o} \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \vec{o}.$$

В результате формируется множество точек T_j , через которые ПМ должен провести свой РИ с требуемой ориентацией, задаваемой единичными векторами \vec{a}_j и \vec{n}_j (см. рис. 1). При этом если необходимо перемещать РИ перпендикулярно поверхности, то в точке T_j вектор \vec{a}_j подхода РИ должен являться перпендикуляром к плоскости, заданной тремя вершинами k -го треугольника, которому принадлежит указанная точка, а вектор \vec{n}_j нормали к \vec{a}_j всегда параллелен вектору $T_j T_{j+1}$,

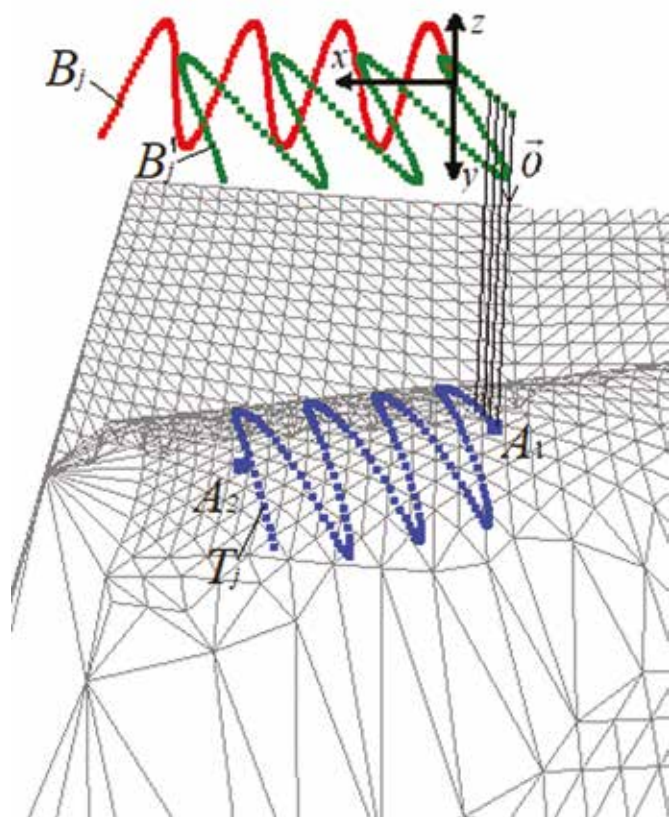


Рис. 2. Наложение желаемой траектории движения РИ ПМ на поверхность подводного объекта

соединяющему пройденную и следующую точку множества. В результате полученная последовательность точек T_j и соответствующих им векторов \vec{a}_j и \vec{n}_j формирует траекторию движения РИ.

Необходимо отметить, что для поиска точки T_j предполагается проверка факта пересечения каждого треугольника триангуляции лучом, выходящим из точки B'_j . Если для каждого луча начинать поиск пересекаемого треугольника с самого первого, то на поиск всех точек пересечения может уйти достаточно много времени из-за ограниченности вычислительных ресурсов, особенно при большом количестве проецирующих лучей или треугольников. Для решения этой проблемы необходимо уменьшить количество ложных операций, при которых выбранный треугольник не будет иметь точек пересечения с лучом. Поэтому при поиске точки T_{j+1} необходимо сначала проверять пересечение луча, выходящего из точки B'_{j+1} , с треугольником, в котором находится точка T_j . Если пересечение не было найдено, начинается поиск пересекаемого треугольника в обычном режиме, начиная с первого.

Для плавного перемещения ПМ полученная траектория движения его РИ может быть сглажена В-сплайнами с помощью алгоритма [21], после чего эта траектория должна быть отработана в автоматическом режиме высокоточными системами управления ПМ [22, 23] с возможностью коррекции скорости движения РИ [24].

2. Программная реализация системы поддержки деятельности операторов ПМ

Разработанная система реализована на языке программирования C++. Входными данными для программы является множество принадлежащих поверхности дна точек, получаемых с помощью СТЗ и определяемых в трехмерном пространстве. В эту же программу заносятся задаваемые оператором координаты точек P_i и векторов \vec{d}_i , определяющих расположение оптической оси телекамеры в СК $Oxuz$.

Программа строит триангуляционную модель поверхности подводного объекта, используя алгоритм [18]. После задания оператором точек P_i и векторов \vec{d}_i рассчитываются координаты целевых точек A_i , а также формируется последовательность точек T_j (см. рис. 2) и соответствующих им векторов \vec{a}_j и \vec{n}_j РИ ПМ.

Для более точного представления формы подводных объектов, а также последующего контроля формирования траекторий движения РИ ПМ создан графический интерфейс (рис. 3) с использованием библиотек «OpenGL Core». Указанный интерфейс в реальном масштабе времени отображает триангуляционную поверхность объекта работ, спроецированную на эту поверхность траекторию, а также видеоизображение с камеры. С использованием этой наглядной информации оператор может проверить автоматически сформированную траекторию до начала выполнения манипуляционных работ.

Проверка работоспособности предложенного метода выполнялась с помощью численного моделирования в виртуальной среде V-REP. С этой целью была создана сцена для выполнения различных манипуляционных операций с помощью ПМ, установленного на ПА (рис. 4, а), в частности операций по очистке протяженной конструкции (трубопровода) от обрастаний. В качестве СТЗ используется модель многолучевого гидроакустического сонара с разрешением 32*32 точки, построенная с учетом однонаправленного характера сканирования.

Сформированная последовательность точек T_j и соответствующих им векторов \vec{a}_j и \vec{n}_j РИ ПМ (рис. 4, б) отправляется в программный пакет Matlab/Simulink через протокол UDP. В Matlab/Simulink полученная последовательность сглаживается параметрическими В-сплайнами третьего порядка [21] и подается в качестве программных сигналов управления на динамическую модель ПМ [23], установленного на ПА. Причем ПА удерживается в заданной точке

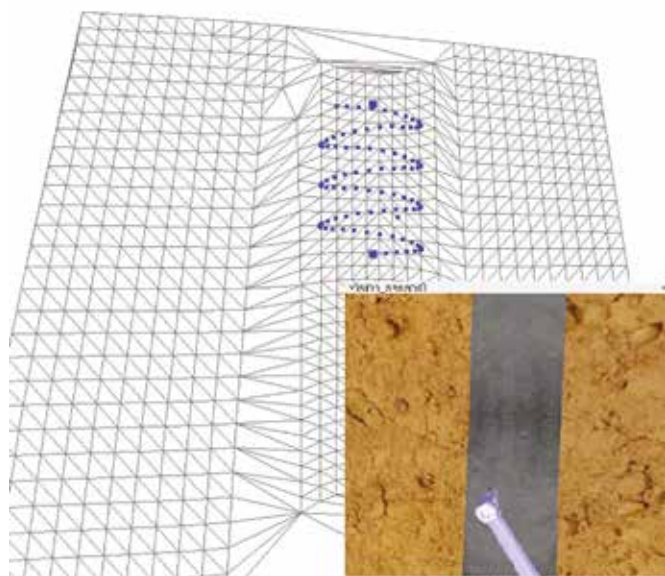
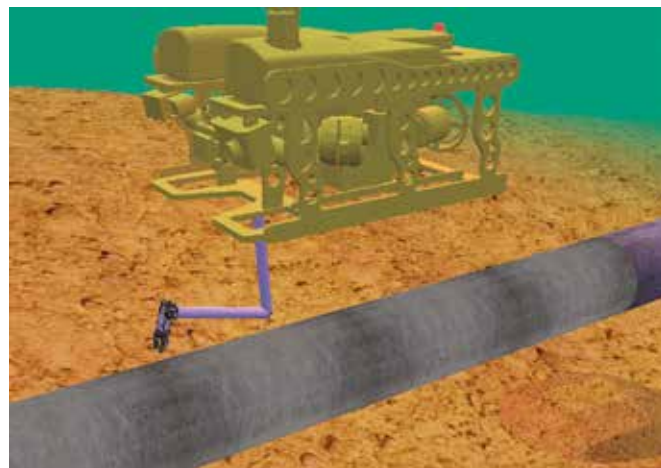


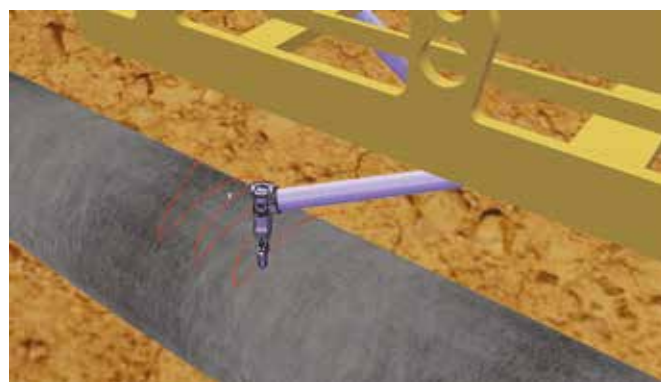
Рис. 3. Интерфейс для контроля формирования траекторий движения РИ ПМ

пространства с помощью системы автоматической стабилизации [16, 17]. Для того чтобы визуализировать движение ПМ по поверхности объекта работ, получаемые в процессе моделирования данные от динамической модели ПА с ПМ отправлялись из Matlab/Simulink обратно в V-REP через протокол UDP. К этим данным относятся изменения реальных обобщенных координат ПМ, а также линейные и угловые смещения ПА относительно исходной точки его стабилизируемого удержания. В результате в среде V-REP посредством перемещения относительно 3D-модели трубопровода 3D-моделей ПА с ПМ с учетом динамики этих объектов достигается наглядная визуализация выполнения технологической манипуляционной операции (см. рис. 4, а, б).

На основе оценки взаимного расположения поверхности трубопровода и РИ ПМ (см. рис. 4, б) были сделаны выводы, что отработка автоматически сформированных с помощью предложенной системы траекторий позволяет ПМ точно выполнять достаточно сложные манипуляционные операции. Указанные траектории формируются в реальном масштабе времени и отображаются разработанным графическим



а



б

Рис. 4. Модель ПА, ПМ и объекта работ в V-REP (а) и сформированная траектория движения РИ ПМ (б)

интерфейсом, что упрощает контроль выполнения работы. При этом наблюдается значительное снижение рабочей нагрузки, оказываемой на оператора, поскольку он задает только целеуказания и проверяет правильность автоматического построения траекторий на поверхности объекта работ с помощью графического интерфейса. Программная реализация предложенной системы не вызывает принципиальных затруднений.

3. Визуальный контроль выполнения манипуляционных операций

Управляя ПМ в ручном и (или) супервизорном режимах, операторы контролируют этот процесс по видеоизображению, получаемому от телекамеры ПА. Часто угол обзора таких телекамер не позволяет охватить всю рабочую зону ПМ. Кроме того, операторам постоянно приходится использовать оптический зум телекамеры для точного позиционирования РИ относительно объекта и высококачественной видеосъемки, что значительно уменьшает охватываемую зону видимости камеры. Поэтому для нахождения РИ перемещающегося ПМ в центре видеокадра приходится вручную наводить на этот инструмент оптическую ось телекамеры, управляя приводами поворотной платформы, на которой установлена камера.

Для автоматизации трудоемкого процесса управления ориентацией поворотной платформы в патенте [25] описан способ автоматического наведения продольной оси телекамеры ПА на РИ ПМ. Этот способ был реализован в системе поддержки деятельности операторов ПМ, которая с учетом информации о текущем местоположении РИ ПМ вычисляет углы поворота степеней подвижности платформы с телекамерой, при которых оптическая ось этой камеры пересекает характерную точку РИ.

Для представленной на рис. 5 распространенной кинематической схемы поворотной платформы геометрическим способом были выведены выражения, определяющее зависимость углов q_1 и q_2 поворота платформы от положения РИ в передней полусфере перед ПА:

$$q_1 = \arctg(P_{x_k} / P_{y_k}), \quad -\frac{\pi}{2} < q_1 < \frac{\pi}{2},$$

$$q_2 = \arctg(\sqrt{(C_{x_k} - P_{x_k})^2 + (C_{y_k} - P_{y_k})^2} / C_{z_k}), \quad -\frac{\pi}{2} < q_2 < \frac{\pi}{2},$$

где $C = [C_{x_k}, C_{y_k}, C_{z_k}]$ – точка с координатами текущего положения РИ ПМ в СК $x_k y_k z_k$, начало которой расположено в точке пересечения осей шарниров поворотной платформы (см. рис. 5), а оси x_k, y_k, z_k

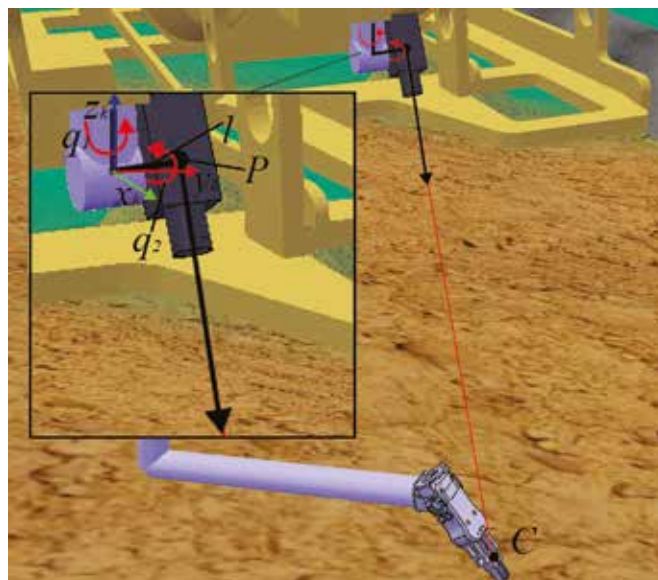


Рис. 5. Поворотная платформа телекамеры

всегда параллельны и сонаправлены соответствующим осям x, y, z СК $Oxyz$. Координаты точки $P = [P_{x_k}, P_{y_k}, P_{z_k}]$ пересечения второго шарнира и оптической оси телекамеры в СК $x_k y_k z_k$ определяются из уравнения: $(C_{x_k}^2 + C_{y_k}^2)P_{x_k}^2 - 2C_{x_k}P_{x_k} + l^2(l^2 - C_{y_k}^2) = 0$, $P_{y_k} = \sqrt{l^2 - P_{x_k}^2}$ и $P_{z_k} = 0$.

Программная реализация подсистемы визуального контроля выполнена на языке программирования C++ с визуализацией в среде V-REP, а аппаратная реализация – на созданной лабораторной установке, включающей в себя трехстепенной ПМ типа PUMA, задающий репликатор и телекамеру, закрепленную на двухстепенной поворотной платформе (рис. 6). В качестве вычислительного устройства использовался контроллер Arduino Mega 2560. Полученное с телекамеры видеоизображение в реальном времени выводилось на монитор оператора.



Рис. 6. Лабораторная установка

В результате моделирования, а также испытаний на лабораторной установке были сделаны выводы, что представленная подсистема обеспечивает визуальный контроль за движениями РИ в рабочей зоне ПМ, ограниченной передней полусферой. Очевидно, что реализация этой подсистемы не вызывает затруднений, так как для вычисления углов q_1 и q_2 поворота платформы достаточно типового контроллера, что было показано на примере представленной установки, оснащенной контроллером Arduino.

Заключение

Разработанная система поддержки деятельности операторов ПМ может использоваться для выполнения в супервизорном режиме многих подводных манипуляционных работ. При этом траектории и ориентация в процессе движения РИ ПМ формируются на основе математической модели объекта работ с учетом требований к выполнению конкретных технологических операций. Разработанная система реализована в виде программы, обладающей следующими функциональными возможностями:

- обеспечивает построение триангуляционных моделей поверхности подводных объектов и форми-

рование пространственных траекторий движения РИ ПМ на основе целеуказаний, задаваемых оператором;

- отображает с помощью графического интерфейса триангуляционную поверхность объекта работ, спроецированную на эту поверхность траекторию, а также видеоизображение с телекамеры. Эта наглядная информация используется операторами для проверки автоматически построенных траекторий перед выполнением манипуляционных работ;

- сформированные пространственные траектории движения РИ ПМ передаются системе управления ПМ, обеспечивающей высокоточную обработку траекторий РИ в автоматическом режиме;

- позволяет осуществлять визуальный контроль манипуляционных операций с помощью автоматического наведения оптической оси телекамеры на РИ ПМ в процессе его движения.

Результаты численного моделирования работы предложенной системы в процессе управления ПМ, установленным на ПА, подтвердили ее работоспособность и простоту практической реализации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 20-38-70161, № 19-08-00347_А).

ЛИТЕРАТУРА

1. Davey V.S., Forli O., Raine G.A., Whillock R. Non-Destructive Examination of Underwater Welded Structures // Woodhead Publishing. 1999. P. 1372.
2. Gracias X., Negahdaripour S. Underwater mosaic creation using video sequences from different altitudes // Proc. of OCEANS 2005 MTS/IEEE. 2005. P. 1295–1300.
3. Christ R.D., Wernli Sr R.L. The ROV manual: a user guide for remotely operated vehicles // Elsevier Science. 2013.
4. Carrera A., Ahmadzadeh S., Ajoudani A., Kormushev P., Carreras M., Caldwell D. Towards autonomous robotic valve turning // Cybernetics and Information Technologies. 2012. Vol. 12, No. 3. P. 17–26.
5. Коноплин А.Ю., Денисов В.А., Даутова Т.Н., Кузнецов А.Л., Московцева А.В. Технология использования ТНПА для комплексного исследования глубоководных экосистем // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 4–12.
6. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Разработка и натурные испытания системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 12–20.
7. Coleman D.F., Ballard R.D., Gregory T. Marine archaeological exploration of the Black Sea // Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future. 2003. Vol. 3. P. 1287–1291.
8. Hachicha S., Zaoui C., Dallagi H., Nejim S., Maalej A. Innovative design of an underwater cleaning robot with a two arm manipulator for hull cleaning // Ocean Engineering. 2019. Vol. 181. P. 303–313.
9. Yoerger D., Slotine J.J. Supervisory control architecture for underwater teleoperation // Proc. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1987. Vol. 4. P. 2068–2073.
10. Yoerger D., Newman J., Slotine J. J. Supervisory control system for the JASON ROV // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1986. Vol. 11, No. 3. P. 392–400.
11. Zhang J., Li W., Yu J., Mao X., L M., Chen G. Operating an underwater manipulator via P300 brainwaves // 23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). 2016. P. 1–5.
12. Sivčev S., Rossi M., Coleman J., Dooly G., Omerđić E., Toal D. Fully automatic visual servoing control for work-class marine intervention ROVs // Control Engineering Practice. 2018. Vol. 74. P. 153–167.
13. Joe H., Kim J., Yu S.C. Sensor fusion-based 3d reconstruction by two sonar devices for seabed mapping // IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52, No. 21. P. 169–174.
14. Marton Z.C., Rusu R.B., Beetz M. On fast surface reconstruction methods for large and noisy point clouds // 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2009. P. 3218–3223.
15. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Метод супервизорного управления манипулятором подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 2. С. 95–99.
16. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 53–56.

17. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 29–34.
18. Point Cloud Library: Fast triangulation of unordered point clouds – <http://ns50.pointclouds.org/>
19. Möller T., Trumbore B. Fast, minimum storage ray-triangle intersection // Journal of graphics tools. 1997. Vol. 2, No. 1. P. 21–28.
20. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control // Prentice Hall. 2003. P. 450.
21. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V. The Formation of Motion Laws for Mechatronics Objects Along the Paths with the Desired Speed// Proc. of International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA 2016), 03–05 October 2016, Jakarta, Indonesia. P. 93–96.
22. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Зуев А. В., Красавин Н. А. Метод синтеза систем высокоточного управления перемещениями подводных манипуляторов // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4(34). С. 31–37.
23. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. Development of Control Systems for Implementation of Manipulative Operations in Hovering Mode of Underwater Vehicle // OCEANS 2016. Shanghai, China. ISBN: 978-1-4673-9724-7. DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485692.
24. 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.
25. Пат. 2556441 РФ, МПК G05B 11/10, G02B 23/22. Способ автоматического наведения телекамеры / Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. – № 2014104347/08, заявл.: 07.02.2014; опубл.: 10.07.2015, Бюл. № 19.

Об авторах

КОНОПЛИН Александр Юрьевич, к.т.н., заведующий лабораторией

Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт проблем морских технологий ДВО РАН;

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

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

Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы

Тел.: +7 (924) 429-83-96

Е-mail: kayur-prim@mail.ru

ORCID ID: 0000-0001-7554-1002

ЮРМАНОВ Александр Павлович, инженер

Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт проблем морских технологий ДВО РАН;

Дальневосточный федеральный университет

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

Тел.: +7(914)678-60-60

Е-mail: yurmanov_a@mail.ru

ORCID ID: 0000-0001-6849-3700

Для цитирования:

Коноплин А.Ю., Юрманов А.П. СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ МАНИПУЛЯТОРОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ПОДВОДНЫХ АППАРАТАХ // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 2 (36). С. 18–27. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_02.

