ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

**Ю.Ф. Голубев, А.В. Яскевич,
В.М. Мирхайдаров**

Оценка динамики
причаливания на
компьютерном стенде
моделирования в реальном
времени

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В., Мирхайдаров В.М. Оценка динамики причаливания на компьютерном стенде моделирования в реальном времени // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2020. № 84. 24 с.
<https://doi.org/10.20948/prepr-2020-84>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-84>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

Ю.Ф.Голубев, А.В.Яскевич, В.М.Мирхайдаров

**Оценка динамики причаливания
на компьютерном стенде моделирования
в реальном времени**

Москва — 2020

Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В., Мирхайдаров В.М.

Оценка динамики причаливания на компьютерном стенде моделирования в реальном времени

В настоящей работе кратко описываются основные особенности процесса причаливания космических аппаратов и их оборудования с помощью космических манипуляторов. Компьютерный моделирующий стенд реального времени может быть использован для оценки динамики, когда агрегаты и устройства для соединения имеют простую кинематику. Простые каркасные геометрические модели контактного взаимодействия этих устройств предлагаются для информационной поддержки оператора при управлении манипулятором. Обсуждаются особенности динамики двух различных операций причаливания при использовании таких моделей.

Ключевые слова: космический манипулятор, причаливание, моделирование в реальном времени, компьютерная графика

Golubev Yu.F., Yaskevich A.V., Mirhaydarov V.M.

Berthing dynamic estimation by using real time computer simulator

This paper shortly describes main features of spacecraft and their hardware berthing by using space robotic arms. Real time computer simulator may be used for dynamic estimation when joining units and devices have a simple kinematics. Simple frame geometrical models of contact interaction of these devices are proposed for informational support of operator during robotic arm control. Dynamic features of two different berthing operations by using such models are discussed.

Key words: space robotic arm, berthing, real time simulation, computer graphics

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ: 19-01-00123)

Оглавление

Введение	3
1. Применение каркасных геометрических моделей соединяемых устройств для управления причаливанием	4
2. Моделирование причаливания, выполняемого с применением специализированных агрегатов.....	5
3. Оценка динамики причаливания при использовании устройств соединения без податливости.....	15
Заключение.....	23
Библиографический список.....	23

Введение

Стыковка и причаливание космических аппаратов (КА) являются двумя способами их соединения на орбите. Наведение и соединение КА, выполняемое с помощью космического робота-манипулятора, управляемого оператором, называется причаливанием. Такая операция предполагает также установку на один из КА доставляемого для него оборудования. Для соединения используются универсальные стыковочные агрегаты (СтА) или устройства, разработанные специально для причаливания. Основная задача манипулятора – обеспечить сцепку, первичную механическую связь агрегатов или устройств за счет срабатывания подпружиненных защелок одного, заходящих за упоры другого. Жесткое соединение создается механизмами СтА, в простейшем случае – вручную операторами на поверхности КА. Манипулятор выполняет относительное выравнивание и сближение соединяемых механических интерфейсов, которые имеют направляющие элементы для уменьшения бокового и угловых промахов. Он также создает силу, необходимую для преодоления контактных реакций направляющих элементов и срабатывания защелок.

Человек-оператор, находящийся внутри одного из КА и управляющий манипулятором при причаливании, не может непосредственно наблюдать относительное положение соединяемых объектов, габариты которых к тому же значительно превышают размеры звеньев, обеспечивающих сцепку. Необходимая для управления информация получается с помощью изображений, получаемых с прицельных, наблюдающих мишени, и обзорных телекамер. Полнота этой информации определяет успешность сцепки. При наличии достаточно большого числа мишеней, удаленных от оси сближения, относительное положение СтА можно вычислять. Но это реализуемо только для отдельных стыковочных портов и неприменимо в случае установки дополнительного оборудования КА.

Моделирование динамики причаливания используется для оценки возможности выполнения этой операции, для уточнения параметров алгоритмов управления и тренировки операторов. Если сцепка агрегатов обеспечивается простыми механизмами [1], то моделирование в реальном времени выполняется на компьютерных, математических стендах [2-4]. При использовании СтА все особенности их стыковочных механизмов, имеющих сложную кинематику, воспроизводятся в реальном времени при гибридном моделировании [5-7].

В данной работе приводятся результаты моделирования причаливания дополнительного оборудования КА, которое выполняется с использованием простых малогабаритных устройств соединения в условиях их ограниченной видимости. Компьютерный моделирующий стенд реального времени разработан ПАО «РКК “Энергия”» (структура, организация вычислительных процессов, модели контактного взаимодействия устройств соединения) совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана (модель манипулятора и изображений телекамер) [8, 9]. Управление манипулятором при причаливании осуществляется в супервизорном режиме: оператор задает команды на фиксированные перемещения по отдельным направлениям, которые выполняются автоматически. Цель моделиро-

вания состоит в уточнении параметров этих команд и способа наведения. Предлагается выполнять прицеливание с использованием дополнительного компьютерного графического изображения, вычисляемого относительного положения соединяемых механических интерфейсов.

1. Применение каркасных геометрических моделей соединяемых устройств для управления причаливанием

Контактное взаимодействие устройств или их звеньев, которые обеспечивают сцепку, почти всегда недоступно для непосредственного наблюдения из-за их относительно малых размеров, ограниченной видимости, невозможности установить телевизионную камеру непосредственно в месте соединения. Взаимное положение оценивается косвенно, что неизбежно приводит к ошибкам, которые должны быть меньше максимально допустимых промахов, определяемых геометрией направляющих элементов для выравнивания.

Возможность получения «прямой», вычисляемой оценки основана на том, что при причаливании, в отличие от стыковки, все тела механической системы связаны между собой, движутся относительно общего основания, например, космической станции. Численные значения углов поворота выходных валов приводов, измеряемые датчиками, используются в алгоритме управления и содержатся в управляющем бортовом компьютере. При незначительной доработке программного обеспечения они могут передаваться на вспомогательный компьютер, который по известному положению одного из соединяемых устройств относительно схвата, а другого относительно корня манипулятора, по известным размерам звеньев и углам в шарнирах будет вычислять взаимное положение направляющих элементов этих устройств, определять их точки контакта. На этой основе будет формироваться компьютерное графическое изображение для облегчения оператору выполнения задачи наведения.

Угловые деформации редукторов приводов из-за ограниченной точности датчиков и деформации звеньев манипулятора не могут быть учтены при таком расчете. Но для движения космического манипулятора при причаливании характерны малые амплитуды и скорости перемещений. В этом случае колебания перемещаемого полезного груза большой массы незначительны и быстро затухают. При супервизорном управлении, когда оператор выдает команды на перемещения по отдельным направлениям с достаточно большими интервалами времени, упругие деформации исполнительного механизма практически не сказываются.

Причаливание под управлением оператора начинается с момента окончания переноса объекта в зону соединения. Оно состоит из нескольких этапов, каждый из которых начинается с пошагового выравнивания с помощью команд “Step”, то есть уменьшения боковых и угловых промахов одного соединяемого устройства относительно другого. Затем выдается команда “Insert” на осевое сближение, величина хода которого значительно больше, чем боковые переме-

щения при выравнивании. Последний этап выравнивания и сближения должен завершиться сцепкой. Величины всех перемещений являются фиксированными параметрами команд управления. Их проектные значения уточняются при моделировании причаливания с участием операторов. Из-за отсутствия прямой видимости соединяемых устройств последнее выравнивание в целях безопасности осуществляется на достаточно большом удалении, что увеличивает ошибки наведения.

Компьютерные графические изображения соединяемых устройств были разработаны как каркасные для обеспечения прозрачности и возможности наблюдения всех взаимодействующих направляющих элементов, точек контакта, определяемых с помощью соответствующих математических моделей на каждом шаге численного интегрирования уравнений движения механической системы. Они были предназначены для оценки качества реализуемых процессов и первоначальной тренировки операторов. По экспертной оценке инструкторов такие модели должны быть использованы при реальном управлении. Их необходимо разработать для каждой конкретной пары соединяемых устройств. При этом компьютерное изображение будет генерироваться с частотой получения сигналов от датчиков углов поворота в шарнирах манипулятора. Далее рассматриваются результаты моделирования двух операций причаливания без использования и с использованием компьютерных графических изображений соединяемых устройств.

2. Моделирование причаливания, выполняемого с применением специализированных агрегатов

Для выполнения различных операций причаливания в РКК «Энергия» разработаны специализированные агрегаты (рис. 1) с учетом более точного прицеливания и меньшей скорости сближения, чем при стыковке, которые обеспечивает манипулятор. Для сцепки в активном агрегате 1 используется очень простой, без устройств демпфирования, механизм типа «штырь» 2 с головкой захвата, а в пассивном агрегате 3 – приемный конус 4 малого диаметра с гнездом и упором. При наведении через иллюминатор 5 активного агрегата с помощью прицельной телекамеры можно наблюдать мишень 6 на пассивном агрегате. После сцепки привод втягивает штырь в корпус механизма, обеспечивая стягивание агрегатов, при этом направляющие выступы 7 обеспечивают их выравнивание. При моделировании причаливания на компьютерном стенде этот выполняемый автоматически этап функционирования не рассматривается.

Штырь 2 связан с основанием механизма универсальным шарниром, его малые угловые перемещения ограничены жесткими тарельчатыми пружинами. На конце штыря имеется головка захвата (рис. 1в) с четырьмя защелками 8, которые при попадании в гнездо приемного конуса (рис. 1г) проходят за упор 9, образуя сцепку. Головка захвата и приемный конус с гнездом являются основными направляющими элементами при моделировании причаливания.

Рис. 1. Активный и пассивный агрегаты для выполнения причаливания:
 а) активный СТА; б) пассивный СТА; в) головка захвата СТМ;
 г) гнездо приемного конуса

Методика эффективного моделирования контактного взаимодействия при стыковке и причаливании описана в [10, 11]. В соответствии с ней контактирующие поверхности представляются наборами простейших фигур, геометрических примитивов. Условия и параметры контакта для каждой пары примитивов, описывающих активное и пассивное соединяемое устройство, определяются простыми аналитическими выражениями. Элементы сложных поверхностей могут быть аппроксимированы множеством однотипных примитивов. В этом случае возможность контакта определяется методом дихотомии.

Приемный конус пассивного агрегата (рис. 2) с гнездом описывается набором характерных точек и параметрами примитивов: усеченного конуса, цилиндра, окружности. Точка $P_{p,1}$ – вершина приемного конуса, точки $P_{p,2} - P_{p,4}$ задают плоскость, которая ограничивает движение головки захвата при боковых промах за пределами конуса; $P_{p,5}$ – центр входной плоскости приемного гнезда. Постоянными параметрами являются радиус R_{CONE} входной грани приемно-

го конуса, радиус R_{STOP} механического упора на входе гнезда, расстояние H_{CS} от вершины конуса до плоскости упора, высота H_{CONE} приемного конуса, радиус $R_{PlaneMax}$ окружности плоскости за пределами входной грани приемного конуса.

Рис. 2. Геометрические примитивы для представления:
а) приемного конуса; б) головки захвата СТМ

Форма головки захвата штыря активного агрегата описывается двумя сферами 1 и двумя наборами отрезков 2 прямых линий, аппроксимирующих поверхности двух усеченных конусов. Для итерационного поиска точек контакта методом дихотомии поверхность каждого конуса разбивается на два сектора, у которых крайние образующие совпадают. Общее число аппроксимирующих образующих – отрезков прямых равно $2^N + 1$. За N итераций определяется отрезок, точка пересечения которого с плоскостью окружности (геометрического примитива пассивного агрегата) наиболее удалена от центра этой окружности. Разбиение конусов на сектора обеспечивает выпуклость их поверхностей и, соответственно, однозначность такого определения. После этого вычисляется величина внедрения и, если она положительна, то и параметры точки контакта.

Форма каждой защелки описывается плоской фигурой – набором из трех отрезков, соединяющих ее характерные точки (ХТ) $P_{L,0} - P_{L,3}$ (рис. 3). Координаты всех ХТ и параметры отрезков, описывающие форму головки и защелок, задаются в СК $X_H Y_H Z_H$ подвижного штыря. До сцепки отрезки $P_{L,0} P_{L,1}$ и

$P_{L,1} P_{L,2}$ могут контактировать с окружностью, гранью упора гнезда (рис. 3а). При этом под действием контактной силы защелка перемещается относительно головки захвата. Этому перемещению противодействует пружина. После сцепки защелка находится в своем исходном положении, с обратной, конической, поверхностью упора гнезда приемного конуса пассивного агрегата могут контактировать только ее ХТ $P_{L,2}$ и $P_{L,3}$, координаты которых являются постоянными в системе координат (СК) головки. Для каждой из них внедрение и контактная реакция определяются отдельно (рис. 3б).

Рис. 3. Представление защелки головки захвата отрезками прямых и характерных точек и ее контакты с приемным конусом: (а) до сцепки; (б) после сцепки

Изменяемое относительно головки захвата положение защелки при контакте до сцепки определяется итерационным методом дихотомии. Для ускорения вычислений предварительно, до начала моделирования, весь ее рабочий диапазон ее движения разбивается на $2^N + 1$ возможных положений (2^N интервалов). Число итераций N выбирается исходя из приемлемой точности определения положения защелки. Для каждого i -го положения ($i = \overline{1, 2^N + 1}$) j -го отрезка ($j = \overline{1, 2}$) k -й защелки ($k = \overline{1, 4}$) определяются координаты $[x_{1,j,k}^{(H)}(i), y_{1,j,k}^{(H)}(i), z_{1,j,k}^{(H)}(i)]^T$ его исходной точки и направляющий вектор $\mathbf{v}_{L,j,k}^{(H)}(i) = [l_{L,j,k}^{(H)}(i), m_{L,j,k}^{(H)}(i), n_{L,j,k}^{(H)}(i)]^T$, а также единичный вектор $\mathbf{n}_{L,l,k}^{(H)}(i)$ реакций, нормальный к отрезку и расположенный в плоскости защелки.

Необходимое для определения точек контакта преобразование координат ХТ и параметров отрезков, описывающих форму головки, из СК $X_H Y_H Z_H$ подвижного штыря в СК $X_P Y_P Z_P$ приемного конуса определяется схемой выполнения причаливания. Пассивный агрегат установлен на модуле, перемещаемом с помощью манипулятора, активный – на неподвижном основании. В центре стыковочной плоскости активного агрегата расположена СК $X_{AU} Y_{AU} Z_{AU}$ (рис. 4), а в центре стыковочной плоскости пассивного – СК (PMU – Payload Mounting Unit), относительно которой задаются направления перемещений в командах управления манипулятором. В центре шарнира штыря расположена СК $X_{HI} Y_{HI} Z_{HI}$, относительно которой описывается качание головки захвата в универсальном шарнире. С самой подвижной головкой связана СК $X_H Y_H Z_H$, в которой задаются постоянные координаты ХТ и параметры отрезков, описывающих ее форму и защелки. В центре основания приемного конуса расположена СК $X_P Y_P Z_P$, в которой задаются координаты его ХТ.

Рис. 4. Системы координат агрегатов при причаливании

Положение СК $X_{HI} Y_{HI} Z_{HI}$ относительно СК $X_{AU} Y_{AU} Z_{AU}$ и СК $X_P Y_P Z_P$ относительно СК $X_{PMU} Y_{PMU} Z_{PMU}$ определяется конструктивными особенностями агрегатов. Вектор $\mathbf{r}_{PA}$ положения и матрица $\mathbf{A}_{PA}$ ориентации $X_{AU} Y_{AU} Z_{AU}$ относительно $X_{PMU} Y_{PMU} Z_{PMU}$ вычисляются в модели движения манипулятора и перемещаемого им объекта относительно СК $X_{AU} Y_{AU} Z_{AU}$ активного агрегата.

Координаты произвольной i – й точки и компоненты произвольного j – го вектора преобразуются из СК $X_H Y_H Z_H$ в СК $X_P Y_P Z_P$ с учетом конструктивных особенностей агрегатов и малости углов $|\psi_{H,y}| \leq 1^\circ$ и $|\theta_{H,z}| \leq 1^\circ$ поворота головки захвата в шарнире ($\sin \psi_{H,y} \approx \psi_{H,y}$, $\cos_{H,y} \approx 1$ и $\sin \theta_{H,z} \approx \theta_{H,z}$, $\cos \theta_{H,z} \approx 1$)

$$\mathbf{P}_i^{(P)} = \mathbf{r}_{P,HC}^{(P)} + \mathbf{A}_{H,P} \mathbf{P}_i^{(H)}, \quad \mathbf{v}_j^{(P)} = \mathbf{A}_{H,P} \mathbf{v}_j^{(H)},$$

где

$$\mathbf{r}_{P,HC}^{(P)} = \mathbf{A}_{PMU,P} \{ [-0.106, 0]^T + \mathbf{r}_{PA}^{(PU)} + \mathbf{A}_{PA}^T [-0.122, 0, 0]^T \},$$

$$\mathbf{A}_{H,P} = \mathbf{A}_{PU,P} \mathbf{A}_{PA}^T \mathbf{A}_{H,AU},$$

$$\mathbf{A}_{H,AU} \approx \begin{bmatrix} -1 & -\theta_{H,z} s_{22} + \psi_{H,y} c_{22} & -\theta_{H,z} c_{22} - \psi_{H,y} s_{22} \\ -\theta_{H,z} & s_{22} & c_{22} \\ \psi_{H,y} & c_{22} & -s_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{PMU,P} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$s_{22} = \sin 22.5^\circ, \quad c_{22} = \cos 22.5^\circ.$$

Углы поворота $\psi_{H,y}$, $\theta_{H,z}$ головки СТМ в универсальном шарнире получаются интегрированием ее уравнений динамики относительно каждой оси вращения отдельно. Из-за большой жесткости боковых ограничительных пружин используется неявный метод Эйлера. Его матричная запись и решение для угла $\psi_{H,y}$ имеют вид (для угла $\theta_{H,z}$ решение получается аналогично)

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{h c_{S,\psi}}{J_H} & \frac{h k_{S,\psi}}{J_H} \\ -h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{H,y}(t+h) \\ \psi_{H,y}(t+h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{H,y}(t) + (m_{C,y} + k_{S,\psi} \psi_{S,0}) h / J_H \\ \psi_{H,y}(t) \end{bmatrix},$$

$$\omega_{H,y}(t+h) = \Delta_{1,H,y} / \Delta_{0,H}, \quad \psi_{H,y}(t+h) = \Delta_{2,H,y} / \Delta_{0,H},$$

$$\text{где } \Delta_{0,H} = 1 + \frac{h}{J_H} (c_{S,\omega} + h k_{S,\psi}),$$

$$\Delta_{1,H,y} = \omega_{H,y}(t) + \frac{h}{J_H} \{ m_{C,y} - k_{S,\psi} [\varphi_{H,y}(t) - \varphi_{\psi,0}] \},$$

$$\Delta_{2,H,y} = \psi_{H,y}(t) \left(1 + \frac{h c_{S,\omega}}{J_H} \right) + h [\omega_{H,y}(t) + (m_{C,y} + k_{S,\psi} \varphi_{\psi,0}) h / J_H],$$

где $\omega_{H,y}$ – угловая скорость головки относительно оси Y_H , J_H – момент инерции головки при вращении в шарнире; $m_{C,y}$ – момент контактной силы; $\psi_{S,0}$ – угол поворота головки до контакта с боковой ограничивающей пружиной; $k_{S,\psi}$, $c_{S,\omega}$ – приведенные к угловому движению коэффициенты жесткости боковой пружины и демпфирования.

Контактные силы и координаты точек контакта вычисляются в СК $X_P Y_P Z_P$ приемного конуса в соответствии с алгоритмами, описанными в [11]. Они преобразуются в СК $X_{PMU} Y_{PMU} Z_{PMU}$ и входят в уравнения динамики манипулятора и переносимого объекта, а также в СК $X_H Y_H Z_H$ головки штыря. При этом вычисляются действующие на нее контактные моменты $m_{C,y}$ и $m_{C,z}$.

Телекамера для наведения установлена недалеко от оси головки, а мишень – на том же расстоянии от оси приемного конуса, то есть вне зоны контактного взаимодействия. Изображение плоской мишени малочувствительно к угловым отклонениям агрегатов от оси сближения. Это увеличивает ошибки наведения с учетом удаления последней точки выравнивания пассивного агрегата относительно активного. Команды, выдаваемые оператором, проявляются на графиках в виде постоянных значений линейных или угловых скоростей, которые приводят к заданным изменениям соответствующих координат относительного положения соединяемых устройств.

На рис. 5 и 6 приведен конкретный пример работы оператора. Сначала он дает серию 1 из семи команд Step на устранение бокового промаха по оси Z, затем одну команду 2 Step на коррекцию углового разворота относительно продольной оси X.

Рис. 5. Удаление, боковые промахи пассивного агрегата и контактные реакции при причаливании с выравниванием по изображению мишени

Рис. 6. Углы и скорости перемещаемого пассивного агрегата при причаливании с выравниванием по изображению мишени

Другие углы не корректируются из-за слабой чувствительности к ним изображения мишени. При осевом сближении 3 соединяемых устройств компенсация 4 бокового рассогласования головки и приемного конуса происходит частично за счет разворота головки и приемного конуса, а также вследствие деформации исполнительного механизма манипулятора. Из-за этой деформации

ции после сцепки 5 головка, находящаяся в цилиндре гнезда приемного конуса, продолжает действовать на его боковую стенку с силой 6.

Разработанная для оценки хода контактного взаимодействия каркасная геометрическая модель (рис. 7) позволяет показать движение головки внутри приемного конуса и его гнезда, срабатывание защелок. Определяемые в математической модели точки контакта отображаются красными точками. Анимация демонстрируется в осевой и боковой проекции, а также в аксонометрии. Изображение дополняется численными значениями кинематических параметров относительного движения, действующих на головку контактных сил и моментов.

Рис. 7. Каркасная компьютерная модель контактного взаимодействия головки захвата и приемного конуса. Анимация доступна отдельно по ссылке https://keldysh.ru/e-biblio/golubev/berthing_1.mp4

Наведение с использованием компьютерной каркасной модели обеспечивает возможность более точной оценки взаимного положения головки штыря и приемного конуса. Благодаря этому при тех же начальных условиях наведения, что и в рассмотренном выше варианте, при выравнивании было выдано большее число команд 1 на боковое перемещение (восемь вместо семи). В результате боковой промах уменьшился практически до нуля (рис. 8). Вследствие большей чувствительности компьютерной каркасной модели к относительному угловому положению соединяемых устройств было выдано три команды 2 на уг-

ловое выравнивание (вместо одной), что привело к уменьшению углового рас-
согласования примерно в два раза (рис. 9).

Рис. 8. Скорости и боковые промахи УСА относительно УСП
(выравнивание с использованием компьютерной каркасной модели)

Время достижения сцепки 5 увеличилось незначительно, на 17 сек. Но вследствие более качественного выравнивания при входе головки в гнездо приемного конуса уменьшилась амплитуда контактных реакций, после сцепки манипулятор находился в недеформированном состоянии (рис. 9).

Точность наведения при использовании компьютерной каркасной модели может быть дополнительно повышена за счет изменения параметров команд. Например, можно выполнять последнее выравнивание на меньшем осевом расстоянии между головкой и конусом (уменьшить осевой ход команды Insert) и одновременно уменьшить задаваемую амплитуду боковых и угловых перемещений.

Рис. 9. Угловые рассогласования УСА относительно УСП и контактные силы при сцепке (выравнивание с использованием компьютерной каркасной модели)

3. Оценка динамика причаливания при использовании устройств соединения без податливости

В труднодоступных местах с помощью манипулятора возможна установка доставляемого оборудования, которое было спроектировано для ручного соединения, например, с помощью устройств, показанных на рис. 9.

Устройство соединения пассивное (УСП) содержит две направляющих поверхности в виде фрагментов конуса 1 с приемными гнездами 2 и приемное гнездо фиксации 3 в форме цилиндра с входной частью в виде усеченного конуса (рис. 10а). Внутри цилиндра находится подпружиненный шариковый замок. Устройство соединения активное (УСА) имеет два направляющих штыря 4 с торцами сферической формы, которые должны контактировать с коническими выравнивающими поверхностями 1 и гнездами 2 УСП, и замок фиксации 5 с торцевой поверхностью в виде фрагмента тора (рис. 10в), который должен входить в гнездо фиксации 3 УСП.

Рис. 10. Направляющие элементы устройств соединения: а) гнездо фиксации; б) направляющие штырь и конус; в) геометрия замка фиксации

Сферическая торцевая поверхность каждого направляющего штыря 4 может контактировать с соответствующей направляющей конической поверхностью 1, с граничной окружностью приемного гнезда и цилиндром гнезда 2 (рис. 11а). Контакт цилиндрической поверхности штыря 4 с цилиндром гнезда 2 не рассматривается, так как он имеет место только после того, как замок фиксации 5 войдет в цилиндрическую часть гнезда фиксации 3 (рис. 11б).

Рис. 11. а) Контакты направляющего штыря с приемным конусом и гнездом; б) контакт замка и цилиндра гнезда фиксации

Сцепка достигается, когда этот замок войдет в гнездо на глубину, достаточную для выхода подпружиненного ролика 6 за его торцевую поверхность. Так как замок в гнезде может двигаться только вдоль оси цилиндра, то сопротивление ролика моделируется наличием односторонней контактной силы, действующей вдоль оси X_{USP} .

Торцевая поверхность замка фиксации представляется в виде тора 1 (рис. 11). Она разбивается на два сектора 2 и 3, у которых крайние точки совпадают.

Рис. 11. Аппроксимация тора набором сфер

Каждый сектор представлен набором сфер 4 с индексами $\overline{1, 2^{N-1} + 1}$ и $\overline{2^{N-1} + 1, 2^N + 1}$. Оба сектора имеют выпуклую форму и это делает возможным применение метода дихотомии, с помощью которого за N итераций определяется сфера-образующая с максимальным расстоянием от ее центра до оси гнезда фиксации.

Оценка наличия контакта, вычисление параметров контактов штырей и конусов, замка и гнезда фиксации осуществляются с помощью описанных в [11] аналитических выражений для моделей контактного взаимодействия пар геометрических примитивов «активная сфера – пассивный усеченный конус», «активная сфера – пассивная граничная окружность», «активная сфера – пассивный цилиндр». Для возможности применения этих моделей вычисляются векторы, определяющие относительное положение и скорости упомянутых примитивов.

Начало СК $X_{USP}Y_{USP}Z_{USP}$, расположено в центре приемного гнезда на стыковочной плоскости УСП. С центрами оснований приемных конусов для двух направляющих штырей связаны СК $X_{C1}Y_{C1}Z_{C1}$ и $X_{C2}Y_{C2}Z_{C2}$. Их оси

направлены также как $X_{USP} Y_{USP} Z_{USP}$, а начала задаются постоянными векторами $\mathbf{l}_{C1,USP}^{(USP)}$ и $\mathbf{l}_{C2,USP}^{(USP)}$ (рис. 13).

Рис. 13. Системы координат и направляющие элементы УСА и УСП

Форма УСА и соответственно координаты сфер описываются в СК $X_{PMU} Y_{PMU} Z_{PMU}$, начало которой находится в основании замка захвата на стыковочной плоскости УСА. В СК $X_{PMU} Y_{PMU} Z_{PMU}$ задаются направления перемещений в отдельных командах управления манипулятором. В процессе моделирования вычисляются вектор $\mathbf{r}_{USP,PMU}^{(USP)}$ из начала $X_{USP} Y_{USP} Z_{USP}$ в начало $X_{PMU} Y_{PMU} Z_{PMU}$ и матрица преобразования $\mathbf{A}_{PMU,USP}$ из СК $X_{PMU} Y_{PMU} Z_{PMU}$ в СК $X_{USP} Y_{USP} Z_{USP}$. Они определяют взаимное положение каждой пары геометрических примитивов УСА и УСП.

Положение центра тора замка захвата и центра i -й сферы (его образующей) в СК гнезда захвата определяются векторами

$$\mathbf{r}_{TC}^{(USP)} = \mathbf{r}_{USP,PMU}^{(USP)} + \mathbf{A}_{PMU,USP} \mathbf{l}_{TC}^{(PMU)},$$

$$\mathbf{r}_{SC,i}^{(USP)} = \mathbf{r}_{TC}^{(USP)} + \mathbf{A}_{PMU,USP} \mathbf{l}_{SC,i}^{rel(PMU)},$$

где $\mathbf{l}_{TC}^{(PMU)} = [X_{TC}, 0, 0]^T$ – постоянный вектор из СК $X_{PMU} Y_{PMU} Z_{PMU}$ в центр тора головки захвата, $\mathbf{l}_{SC,i}^{rel(PMU)} = [0, y_{SC0,i}^{(PMU)}, z_{SC0,i}^{(PMU)}]^T$ – постоянные векторы из центра тора в центр i -й сферы-образующей.

Положения центров сфер направляющих штырей в СК $X_{C1}Y_{C1}Z_{C1}$ и $X_{C2}Y_{C2}Z_{C2}$ соответствующих приемных конусов задаются векторами

$$\mathbf{r}_{S,1}^{(C1)} = \mathbf{l}_{C1,USP}^{(USP)} + \mathbf{r}_{USP,PMU}^{(USP)} + \mathbf{A}_{PMU,USP} \mathbf{l}_{S,1}^{(PMU)},$$

$$\mathbf{r}_{S,2}^{(C2)} = \mathbf{l}_{C2,USP}^{(USP)} + \mathbf{r}_{USP,PMU}^{(USP)} + \mathbf{A}_{PMU,USP} \mathbf{l}_{S,2}^{(PMU)},$$

где $\mathbf{l}_{C1,USP}^{(USP)} = [0, -0.260, 0]^T$, $\mathbf{l}_{C2,USP}^{(USP)} = [0, 0.260, 0]^T$ и $\mathbf{l}_{S,1}^{(PMU)} = [X_{psc1}, Y_{psc1}, 0]^T$, $\mathbf{l}_{S,2}^{(PMU)} = [X_{psc2}, Y_{psc2}, 0]^T$ – постоянные векторы.

Скорости контактирующих элементов УСА относительно соответствующих контактирующих элементов УСП определяются соотношениями

$$\mathbf{v}_{TC}^{(USP)} = \mathbf{v}_{PMU}^{(USP)} + \mathbf{A}_{PMU,USP} (\boldsymbol{\omega}_{PMU}^{(PMU)} \times \mathbf{l}_{TC}^{(PMU)}),$$

$$\mathbf{v}_{S,1}^{(C1)} = \mathbf{v}_{PMU}^{(USP)} + \mathbf{A}_{PMU,USP} (\boldsymbol{\omega}_{PMU}^{(PMU)} \times \mathbf{l}_{S,1}^{(PMU)}),$$

$$\mathbf{v}_{S,2}^{(C1)} = \mathbf{v}_{PMU}^{(USP)} + \mathbf{A}_{PMU,USP} (\boldsymbol{\omega}_{PMU}^{(PMU)} \times \mathbf{l}_{S,2}^{(PMU)}).$$

Так как расстояние между центрами сфер-образующих и центром тора составляет только 5 мм, то для тора определяется скорость только его центра.

Определенные выше векторы позволяют определить все точки контакта и их параметры в соответствии с моделями, описанными в [11]. Контактные силы и координаты точек контакта вычисляются в СК $X_{C1}Y_{C1}Z_{C1}$, $X_{C2}Y_{C2}Z_{C2}$, $X_{USP}Y_{USP}Z_{USP}$ и после преобразования в СК $X_{PMU}Y_{PMU}Z_{PMU}$ входят в уравнения динамики манипулятора и переносимого им объекта.

Мишень и прицельная телекамера для наведения в данной операции причаливания отсутствуют. Предполагается, что оператор, управляющий манипулятором, задает команды на перемещение присоединяемого оборудования на основе голосовых указаний внешних операторов. Для оценки качества реализации такого способа наведения и визуализации контактного взаимодействия УСА и УСП разработана их компьютерная каркасная геометрическая модель, которая показывает их относительное положение и точки контакта в двух проекциях (спереди и сбоку), а также в аксонометрии.

На компьютерном стенде в реальном времени было промоделировано причаливание, когда выравнивание выполняется по голосовым командам внешнего наблюдателя с учетом ограниченной видимости им соединяемых устройств. Выполняемая после такого выравнивания команда Insert на осевое сближение УСА и УСП закончилась контактом 1 торцевой поверхности замка фиксации УСА со стыковочной плоскостью УСП и контактом 2 одного из направляющих штырей в ответный приемный конус (рис. 14). При этом манипулятор, выполняющий команду осевого сближения, вызывал только нарастание контактной реакции.

Рис. 14. Отображение на каркасной компьютерной модели промаха при сближении УСА и УСП вследствие выравнивания в условиях ограниченной видимости

Наведение с использованием каркасной модели обеспечивает более высокое качество прицеливания (рис. 15, 16). На расстоянии 65 мм между плоскостями УСА и УСП выполнялось их относительное выравнивание командами Step. Сначала задавались боковые 1, а затем угловые 2 перемещения командами “Step”. Выравнивание было неполным, оставшиеся боковые и угловые рассогласования могли бы быть меньше, если изменить параметры команд, задающие величины перемещений в соответствующих направлениях. После выравнивания была выдана команда “Insert” на осевое сближение 3. Скорость сближения УСА была установлена экспертно на этапе проектирования этой операции. Она отличалась от скорости сближения при причаливании модуля, рассмотренного в предыдущем разделе, из-за другой характеристики соединяемых интерфейсов. Вследствие некомпенсированного бокового промаха головка замка захвата начала контактировать с приемным конусом гнезда захвата 4. При этом скорость сближения замедлилась. Манипулятор начал компенсировать боковые и угловые рассогласования за счет своей деформации, в основном за счет люфтов в шарнирах приводов. В результате головка начала входить цилиндр гнезда захвата 5. Это сопровождалось падением скорости осевого сближения и высокочастотными колебаниями контактной силы из-за «подстройки» модели контактной жесткости.

Рис. 15. Осевые и боковые скорости и перемещения УСА относительно УСП при выравнивании с помощью каркасной геометрической модели

После входа замка в гнездо фиксации контактные реакции определялись деформацией манипулятора и силой сопротивления пружины шарика, фиксирующего сцепку. После сцепки 6 это сопротивление стало близким нулю, скорость сближения резко возросла из-за освобождения энергии деформации манипулятора. Через малое время произошел контакт 7 стыковочных плоскостей

Рис. 16. Угловые скорости и перемещения УСА относительно УСП при выравнивании с помощью каркасной геометрической модели

УСА и УСП, скорость сближения упала до нуля, начали расти контактные силы и моменты, обусловленные возрастанием деформации манипулятора. При завершении выполнения команды "Insert" они не превысили максимально допустимых значений. Это контактное взаимодействие иллюстрирует компьютерная каркасная геометрическая модель (рис. 17).

Рис. 17. Каркасная компьютерная модель контактного взаимодействия УСА и УСП. Анимация доступна отдельно по ссылке https://keldysh.ru/e-biblio/golubev/berthing_2.mp4

Заключение

Представлены результаты оценки на компьютерном стенде моделирования в реальном времени динамики причаливания модуля и доставляемого оборудования, которые соединяются специализированными агрегатами, а также устройствами без податливости. На основе математических моделей контактного взаимодействия соединяемых устройств разработаны каркасные компьютерные графические модели, отражающие их взаимное положение и точки контакта. Показано, что использование оператором манипулятора таких дополнительных геометрических моделей при наведении позволяет уменьшить боковые промахи и угловые рассогласования, контактные нагрузки, а при отсутствии средств прицеливания – обеспечить сцепку. Целесообразно их применение при управлении причаливанием.

Библиографический список

1. McLaughlin R.J., Warr W. H. The Common Berthing Mechanism (CBM) for International Space Station. URL: https://www.spacecraft.ssl.umd.edu/design_lib/ICES01-2435.ISS_CBm.pdf

2. Jaar G., Bélanger F, Harvie D., Lord.K. Advanced robotics simulation in the MOTS // Proc. of the 31st International Symposium on Robotics (ISR 2000), Montreal, Canada. May 2000. P. 504 – 509.
3. Ma O., Buhariwala K., Roger N., MacLean J., Carr R. MDSF – A generic development and simulation facility for flexible, complex robotic systems // Robotica. 1997. Vol. 15. P. 49 – 62.
4. Systems Engineering Simulator. URL:
http://www.nasa.gov/centers/johnson/engineering/robotics_simulation/systems_engineering_simulator/index.html
5. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Гибридное моделирование на 6-степенном стенде причаливания космических аппаратов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 117. 24 С. doi: 10.20948/prepr-2019-117 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-117>
6. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Гибридное моделирование причаливания космических аппаратов // Изв. РАН. Теория и системы управления. №4. 2020 г. С 136 – 150.
7. Golubev Yu.F., Yaskевич A.V. Simulation of spacecraft berthing with a robotic arm //Proc. of the CLAWAR 2020: 23rd International Conf. on Climbing and the Support Technologies for Mobile Machines. Moscow, Russian Federation, 24-26 Aug. 2020. (P. 137-144).
8. Лесков А.Г., Яскевич А.В., Илларионов В.В., Морошкин С.Д., Чернышев И.Е. Математический стенд для отработки управления манипулятором ERA на контактной фазе причаливания // Электронный инженерный журнал: наука и инновации. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва). 2013. №9 (21). С. 57 (13 С.).
9. Яскевич А.В., Лесков А.Г., Чернышев И.Е., Мирхайдаров В.М., Илларионов В.В., Морошкин. Математический стенд для моделирования в реальном времени операций причаливания космических аппаратов // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». СПб: Изд-во «Политехника-сервис». 2014. 416 С. (С. 182-186).
10. Yaskевич A. Math simulation of contact interaction during spacecraft docking and robotic assembly operations // ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Proceedings. An IACM Special Interest Conference 2013. С. 4304-4320.
11. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Компьютерные модели контактного взаимодействия стыковочных агрегатов космических аппаратов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 4. 40 С. doi: 10.20948/prepr-2020-4. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-4>