

Моделирование операций, выполняемых виртуальной моделью космонавта

Валерий Ли, Игорь Сурженко, Валерий Сапрунов, Денис Коломийцев, Александр Улядуров
Таганрогский государственный радиотехнический университет
Таганрог, Россия

Аннотация

Излагается геометрический метод решения задачи моделирования простых и сложных движений виртуальной модели космонавта. В основу метода положено понятие оптимальности траектории движения шарнирного механизма по принципу «марионетки». Показано моделирование операций деятельности космонавта как комбинации различных движений.

Ключевые слова: движение, составное движение, внекорабельная деятельность, виртуальная модель, типовая операция, шарнирный механизм.

1. ВВЕДЕНИЕ

Существует большой комплекс задач, который включает различные виды работы космонавтов, связанные с выходом в открытый космос для технического осмотра, ремонта или монтажа внешнего оборудования, то есть выполнения внекорабельной деятельности (ВКД), а также действия экипажей космических аппаратов при стыковке с международной многомодульной космической станцией (МКС). Эти задачи объединяет то, что объектом действий и ориентиром в пространстве для космонавтов является МКС, ее внешний облик. Успешная работа космонавтов в реальных условиях во многом определяется хорошим знанием объекта действий и уверенностью, основанной на привычности обстановки и наличии достаточного опыта и навыков действий в этих условиях.

В условиях отсутствия возможности готовить космонавтов на реальном оборудовании приходится использовать средства планирования, моделирования ВКД и тренажеры, которые включают в себя в качестве основного компонента систему компьютерной визуализации внешнего облика и деталей МКС с использованием средств виртуальной реальности на основе баз данных виртуальных изображений. Комплекс моделирования для решения задач планирования, тренажной подготовки и контроля (ПТК) ВКД должен обеспечивать:

- необходимую для выполняемых космонавтами задач максимальную степень детализации представления внешнего облика МКС, формирование внешнего облика МКС с учетом изменения ее конфигурации и в соответствии с возможными реальными условиями работы на основе баз данных фрагментов виртуальных изображений, фоноцелевой

обстановки;

- адекватность отображения взаимодействия космонавта-оператора с объектом с учетом особенностей его передвижения и ориентации в космосе, особенностей робототехнических систем, приборов и средств наблюдения.

2. СТРУКТУРА БИБЛИОТЕКИ ТИПОВЫХ ОПЕРАЦИЙ КОСМОНАВТА-ОПЕРАТОРА В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ ПТК ВКД

Под внекорабельной деятельностью космонавта в открытом космосе понимаются различные миссии, каждая из которых начинается выходом через шлюзовую камеру, выполнением запланированной последовательности операций и заканчивается возвращением внутрь МКС. Каждая отдельная операция является некоторой последовательностью движений космонавта. Будем подразделять движения на простые и составные. Под простым движением понимается движение, которое осуществляется в текущий интервал времени только одним суставом кинематической модели виртуального космонавта-оператора, например, — поднять/опустить одну руку (работает плечевой сустав) в одной из координатных плоскостей локальной системы координат виртуальной модели космонавта-оператора, не сгибая ее в локтевом суставе. Составное движение – есть совокупность простых движений различных суставов, совершаемых одновременно в текущий интервал времени.

Библиотека типовых операций ВКД содержит следующие основные группы сценариев осуществления действий, выполняемых на ТМК космонавтом-оператором:

1 группа. Простые операции, выполняемые без использования каких-либо приборов, инструментов, технических средств:

- ♦ движение из исходной точки, расположенной на поверхности МКС, к конечной точке на поверхности МКС, по заданной траектории на заданной дистанции от поверхности МКС;
- ♦ осуществление визуального осмотра наружной поверхности то же, но для случая, когда точки траектории расположены на МКС с целью изучения конструкции или поиска на ней заданного объекта, неисправностей и т.п.;
- ♦ отработка навыков маневрирования, целеуказания, оценки собственной ориентации;

♦ и др.
2 группа. Сложные операции, выполняемые с использованием инструментов:

- ♦ доставка заданного подручного инструмента (набора инструментов) в заданную точку;
- ♦ работа заданным инструментом для достижения поставленной цели;
- ♦ осмотр поверхности МКС или ее отдельных модулей с использованием средств технического зрения: телекамеры, кинокамеры, тепловизора, инфравизора, ИК-излучателя и т.п.;
- ♦ и др.

3 группа. Сложные операции с использованием робототехнических средств и систем, а именно - интерактивное управление механизированными РТС и электро-механическими РТС.

Выполнение любой операции описывается последовательностью из составных и простых движений конечностей виртуальной модели космонавта в скафандре.

3. ДИНАМИЧЕСКАЯ ВИРТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КОСМОНАВТА СРЕДЫ ВР ПТК ВКД

3.1 Кинематическая схема виртуальной модели космонавта. Моделирование кинематики движений

Виртуальная модель космонавта в скафандре является динамической многокомпонентной рычажно-шарнирной системой.

Кинематика поведения модели космонавта обеспечивается подвижностью подмоделей относительно соответствующих суставов: шея, плечо, локоть, талия, тазобедренный, коленный. Каждый из суставов обеспечивает вращение с тремя степенями свободы.

Метрические размеры всех элементов варьируются в пределах, обусловленных конструктивными особенностями скафандра с учетом заданных размеров.

Для реализации динамики поведения космонавта необходимо обеспечить одновременное взаимное связанное и взаимное несвязанное движение отдельных подмоделей.

Центр локальной системы координат совмещен с центром масс (ц.м.) тела. Центры локальных систем второго уровня помещены в центрах сфер, имитирующих шарнирные механизмы, которые моделируют движения суставов тела и конечностей. Конструкция содержит 14 рычагов, 13 шарниров. Шарниры плеч и поясицы обладают тремя степенями вращательной свободы, остальные: голено-стопный, коленный, тазо-бедренный, локтевой и кистевой, – двумя или одной.

В общем случае вращение вектора оси рычага (конечности) в локальной системе координат второго уровня определяет ее положение при движении на углы φ , v , k и описывается матрицей

$$A(\varphi, v, k) = A(0, 0, k) \cdot A(0, v, 0) \cdot A(\varphi, 0, 0),$$

где A – матрица вращения вокруг одной из координатных осей; i – индекс текущей локальной системы координат.

Габариты модели соответствуют человеку ростом 180 см, обхват груди – 100 см.

3.2 Методика расчета и алгоритм реализации оптимизированного составного движения руки виртуального космонавта. Оценка рабочей зоны руки

Рассмотрим задачу визуализации составного движения руки космонавта на примере правой руки. Данное движение является составной частью многих операций, выполняемых виртуальной моделью космонавта-оператора, например, - перемещение руки в заданную область пространства, попадание одним из пальцев в заданную точку пространства и т.д.

Система координат космонавта неподвижна и является системой отсчета для установки исходных данных и расчета движения суставов. Руку будем изображать схематично в виде двух отрезков: плечо и предплечье, как кинематическую пару с шаровым шарнирным соединением, что обеспечивает шесть степеней свободы угловых перемещений. В плечевой и локтевой суставах поместим локальные системы координат $O_{пс}x_{пс}y_{пс}z_{пс}$ и $O_{лс}x_{лс}y_{лс}z_{лс}$ соответственно. В исходном (условно нулевом) положении рука вытянута вдоль оси $O_{пс}y_{пс}$ так, чтобы нормали ладони и локтя были сонаправлены с осью $O_{пс}x_{пс}$, которая направлена от космонавта вперед. При этом ось $O_{пс}z_{пс}$ направлена от левого плеча к правому. для определения местоположения этих элементов будем пользоваться сферическими системами расчетов, то есть углами поворота вокруг соответствующих осей координат. Так движения плеча определяются 3-мя углами вращения вокруг координатных осей системы $O_{пс}x_{пс}y_{пс}z_{пс}$, а движения предплечья – одним вращением вокруг оси $O_{лс}z_{лс}$. Знаки угловых перемещений определяются направлением по или против часовой стрелки относительно соответствующих координатных осей.

Рассмотрим общий случай – рука сгибается и в плечевом суставе и в локте. Положение предплечья определяется локальной системой координат $O_{лс}x_{лс}y_{лс}z_{лс}$. Эта локальная система координат перемещается в системе координат плеча вместе с локтем, тогда положение предплечья определяется углами поворота вокруг соответствующих осей

локальной системы координат локтя $\varphi_{0x_{лс}}$, $\varphi_{0y_{лс}}$, $\varphi_{0z_{лс}}$ (рис. 1).

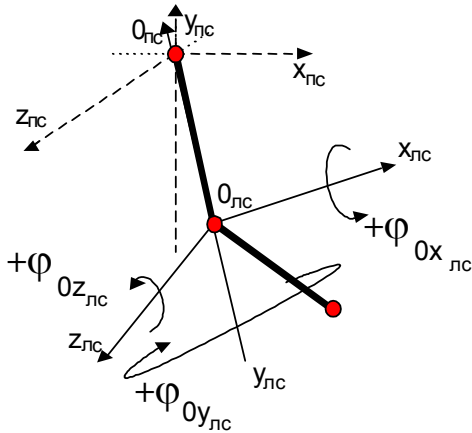


Рис. 1. Углы вращения в системе координат локтевого сустава

Сустав помещен в локальную систему координат таким образом, что один конец находится в начале координат и при повороте вокруг оси неподвижен, а другой (точка M_z) при повороте вокруг оси Oz в плоскости изменяет свои координаты и переходит в точку M'_z . Новые координаты точки M'_z определяются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} x' &= x \cdot \cos \varphi_z - y \cdot \sin \varphi_z; \\ y' &= x \cdot \sin \varphi_z + y \cdot \cos \varphi_z. \end{aligned}$$

Для облегчения расчетов перейдем в матричную форму представления преобразования поворота, выражающуюся как:

$$(x', y', z') = (x, y, z) [Rz],$$

где

$$[Rz] = \begin{pmatrix} \cos \varphi_z & \sin \varphi_z & 0 \\ -\sin \varphi_z & \cos \varphi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Аналогично для поворотов вокруг осей Ox и Oy имеем:

$$[Rx] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_x & \sin \varphi_x \\ 0 & -\sin \varphi_x & \cos \varphi_x \end{pmatrix},$$

$$[Ry] = \begin{pmatrix} \cos \varphi_y & 0 & -\sin \varphi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_y & 0 & \cos \varphi_y \end{pmatrix}.$$

Для определения координат точки $M'(x', y', z')$, если известны координаты точки $M(x, y, z)$ при известных углах поворотов вокруг осей, необходимо использовать следующее выражение:

$$[M'] = [M] \cdot [Rx(\varphi_x)] \cdot [Ry(\varphi_y)] \cdot [Rz(\varphi_z)] = [M] \cdot [R(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)].$$

Пусть задана точка W с координатами (x_w, y_w, z_w) в системе координат плеча $O_{пс}x_{пс}y_{пс}z_{пс}$, в которой расположена условная кнопка. На рис. 2.9 приведена наиболее показательная плоскость $O_{пс}x_{пс}y_{пс}$ для

движения руки. Зонами недосягаемости являются часть круга (на рисунке затемнена) и пространство за сферой радиусом $R_1 = R_{руки}$. Потребуем чтобы космонавт мог видеть точку W . Так как рабочая рука правая, то левая фронтальная половина недосягаема из-за жесткости костюма астронавта.

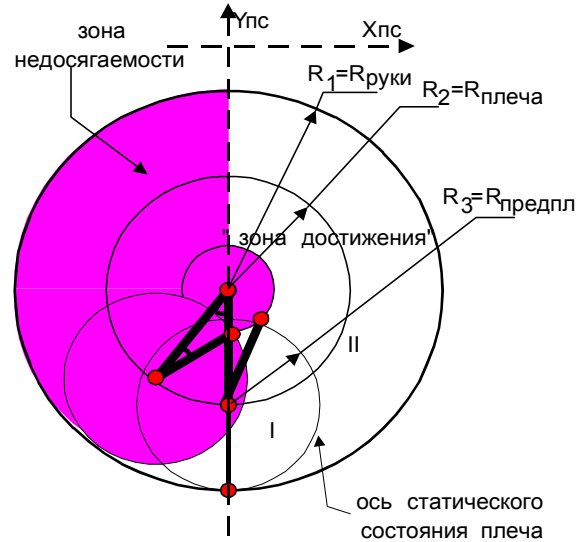


Рис. 2. Допустимые зоны расположения точки W в плоскости $O_{пс}x_{пс}y_{пс}$ для выполнения операции движения

В результате получаем условия допустимых зон положения точки W :

$$\begin{aligned} W &\in \text{сфере радиуса } R_{руки}; \\ x_r &\geq 0; \\ \gamma_{0y} &\leq \gamma_{0у\max} = 45^\circ \end{aligned}$$

Траекторию простого или составного движения будем считать оптимальной, если она максимально приближена по суммарной длине пути, который проходит рассматриваемая конечность. Одним из методов конструирования оптимальной траектории является метод, основанный на принципе «марионетки», физической основой которого является принцип «энергетического минимума». Рассмотрим реализацию указанного метода на примере составного движения руки космонавта в данную точку. Рассмотрим общий алгоритм оптимального движения руки:

- 1) предварительный анализ и расчеты, результатом которых будет траектория движения руки или флаг недопустимости операции;
 - 2) движение руки по полученной траектории.
- Предварительный анализ можно разбить на следующие пункты:
- определение досягаемости заданной точки W (см. условия допустимых зон);

- если условная кнопка W в пределах зоны, то строим вокруг заданной точки W сферу с радиусом $R_{предпл}$, иначе точка не достижима;
- строим вокруг верхней точки плеча – начальной точки системы координат сферу с радиусом $R_{плеча}$;
- пересечением этих сфер (рис.3.) будет окружность радиуса $R_{окр}$ и центром в точке $\Pi_{окр}$, либо, в частном случае, точка касания сфер, когда заданная условная кнопка расположена на расстоянии вытянутой руки. На полученной окружности (точке) будет лежать нижняя точка плеча (локоть) при достижении рукой условной кнопки; обозначим ее точка A ;
- определение координат точки A окружности в пространстве.

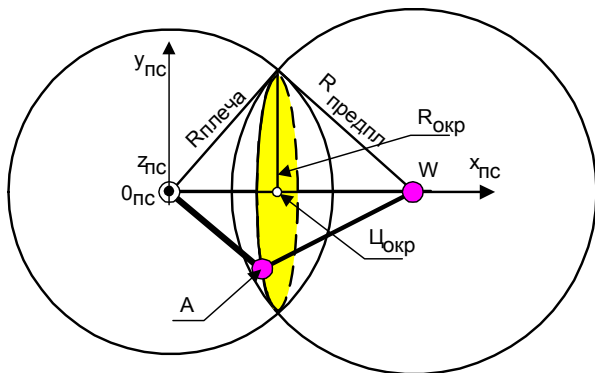


Рис.3. Определение точки положения локтя при оптимальном составном движении руки

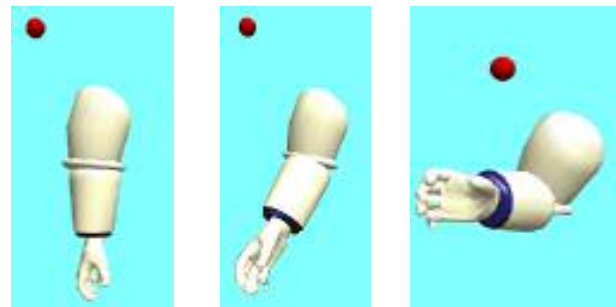
Движение руки будет производиться посредством поочередных дискретных изменений углов положения плеча и предплечья астронавта до тех пор пока локоть не достигнет точки A , а конец руки не будет находиться в точке W .

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ВИРТУАЛЬНОГО КОСМОНАВТА

4.1. Оптимальное движение руки космонавта в заданную точку

Оптимальное движение (по принципу «марионетки») в отличие от неоптимального осуществляется при одновременных вращениях и плеча и предплечья вокруг соответствующих осей. На рис. 4 представлены кадры составных движений руки космонавта в заданную точку (расположена «спереди-справа-вверху» по отношению к исходному положению руки) 3-мерного виртуального пространства по оптимальной траектории. Очевидно, что при оптимальном движении угловые скорости в разных плоскостях будут различными. Так, в рассматриваемом примере угловая скорость вращения плеча вокруг оси $0x$ составила 6 град./сек., вокруг оси $0y$ – 4,5 град./сек., вокруг оси $0z$ – 9 град./сек. Скорость вращения предплечья в округ оси $0z$ – 5 град./сек. Цикл выполнения движения – 10 сек.

В рассматриваемом эксперименте параметр неоптимальности траектории ξ составил менее 20%. В качестве критерия неоптимальности траектории ξ принималось относительное удлинение пути (в процентах) по отношению к теоретически кратчайшему.



а) фаза $t=0$ сек.; б) фаза $t=2,0$ сек.; в) фаза $t=4,8$ сек.;



г) фаза $t=7,2$ сек.; д) фаза $t=10,0$ сек.

Рис. 4. Оптимальная траектория движения руки в заданную точку.

4.2. Моделирование простых операций

На рис.5 и рис.6 приведены кадры визуализации процессов выполнения космонавтом простых операций:

- нажатие кнопки на пульте управления (см. рис.5);
- взятие подручного инструмента (см. рис.6).

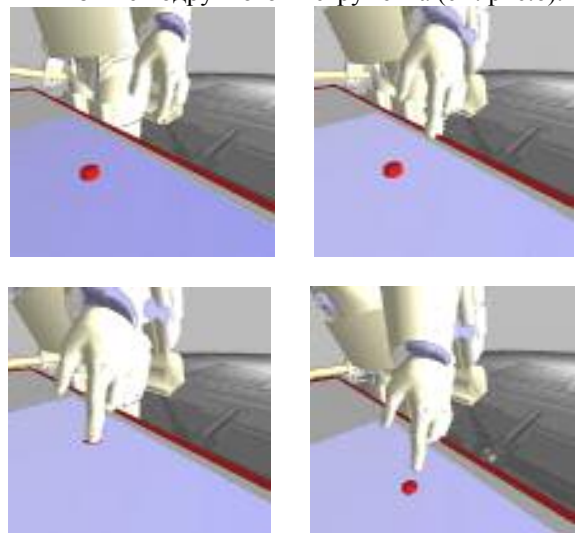


Рис. 5. Выполнение космонавтом типовой операции «Нажать кнопку».

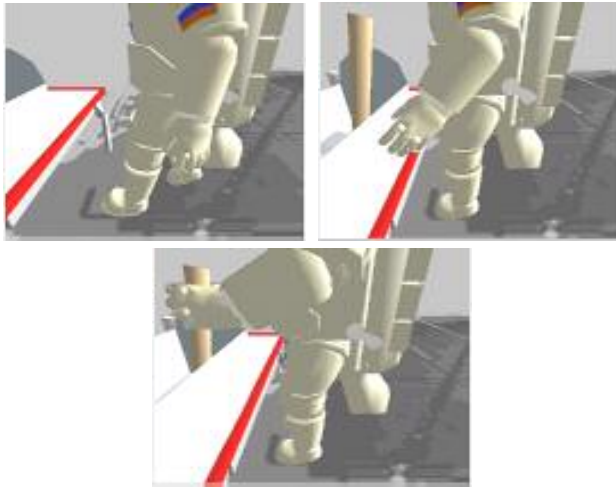


Рис.6. Выполнение космонавтом типовой операции "Взять инструмент".

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены материалы, полученные при конструировании динамической виртуальной модели космонавта. Модель предназначена для использования в среде виртуальной реальности в тренажно-моделирующих комплексах профессиональной подготовки космонавтов.

Abstract

The geometrical method of the decision of a task of modeling of simple and complex(difficult) movements of virtual model astronaut is stated. In a basis of a method the concept of an optimality of a trajectory of movement hinge of the mechanism by a principle "puppet" is necessary. Modeling operations of activity astronaut as combinations of various movements is shown.

Key words: movement, compound movement, outspacecraft activity, virtual model, typical operation, the hinge mechanism.

Авторы:

Валерий Ли, д.т.н зав. каф. ИГ и КД ТРТУ. Адрес: Таганрог, 347900, переулок Некрасовский, 44, т. (863-44) , E-mail:

Игорь Сурженко, к.т.н. директор НКБ "МИУС" при ТРТУ. Адрес: Таганрог, 347900, ул. Ленина, 81, т. (863-44) 649-93, E-mail: otchel15@ttpark.ru

Валерий Сапрунов, начальник отдела НКБ "МИУС" при ТРТУ. Адрес: Таганрог, 347900, ул. Ленина, 81, т. (863-44) 692-56, E-mail: otchel15@ttpark.ru

Денис Коломийцев, начальник сектора НКБ "МИУС" при ТРТУ. Адрес: Таганрог, 347900, ул. Ленина, 81, т. (863-44) 692-24, E-mail: otchel15@ttpark.ru

Александр Улядунов, инженер НКБ "МИУС" при ТРТУ. Адрес: Таганрог, 347900, ул. Ленина, 81, т. (863-44) 692-24, E-mail: skyword@ttpark.ru

Igor Surzhenko, Director of Design Bureau, State University of Radio Engineering
Address: TSURE, 81, Lenin street, Taganrog, 347928, Russia, e-mail: root@ttpark.ru

Valery Saprunov, Chief of Department, State University of Radio Engineering.
Address: TSURE, 81, Lenin street, Taganrog, 347928, Russia, e-mail: otchel15@ttpark.ru

Denis Kolomiytsev
Chief of Laboratory, State University of Radio Engineering
Address: TSURE, 81, Lenin street, Taganrog, 347928, Russia, e-mail: otchel15@ttpark.ru

Alexandr Ulyadurov
Engineer, State University of Radio Engineering
Address: TSURE, 81, Lenin street, Taganrog, 347928, Russia, e-mail: skyword@ttpark.ru