

## О планировании движения космического робота

© Г.К. Боровин<sup>1,2</sup>, В.В. Лапшин<sup>2</sup>

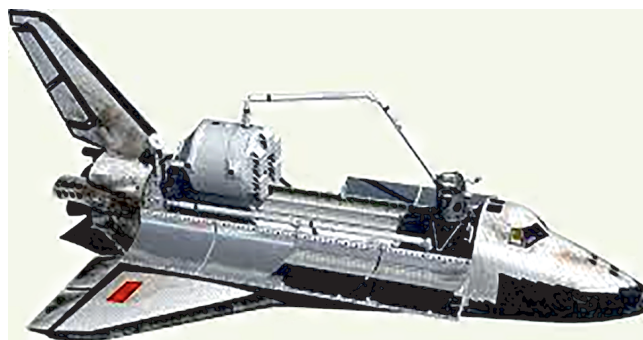
<sup>1</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,  
Москва, 125047, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрена задача управления движением космического робота, состоящего из корпуса и телескопической руки манипулятора. Робот находится в состоянии пассивного полета, не имеет либо не использует двигатели для управления движением своего корпуса. Для управления движением робота используются только двигатели, установленные в степенях подвижности руки манипулятора, поэтому на движение робота влияют только внутренние силы. Движение манипулятора оказывает заметное влияние на движение корпуса робота в силу законов сохранения количества движений и кинетического момента относительно центра масс. При этом предполагается, что векторы количества движения и кинетического момента равны нулю. Имеются ограничения на пределы изменения длины руки манипулятора и угла ее поворота относительно корпуса. Задача решается в плоской постановке. Программное движение руки манипулятора при переводе ее из начального положения в конечное, расположенное в рабочей зоне, состоит из последовательности чередующихся действий: укорочение руки манипулятора до минимального значения, ее поворот относительно корпуса робота, удлинение руки манипулятора до максимального значения, затем снова поворот руки относительно корпуса робота и т. д. Показано, что в результате этих циклических движений манипулятора относительно корпуса можно развернуть корпус робота на произвольный угол. В результате рабочая зона пассивно летящего космического робота оказывается существенно больше рабочей зоны робота с закрепленным корпусом. Рабочей зоной робота в абсолютном пространстве является кольцо, ограниченное двумя окружностями, центр которых расположен в центре масс робота, а радиусы равны минимальному и максимальному расстояниям от центра масс робота до схвата. При построении программного движения можно обеспечить не только выход схвата робота в заданное конечное положение, но и требуемое (более выгодное для проведения работ) значение угла между корпусом робота и рукой манипулятора в конечном положении.*

**Ключевые слова:** космический робот, управление движением, построение программного движения

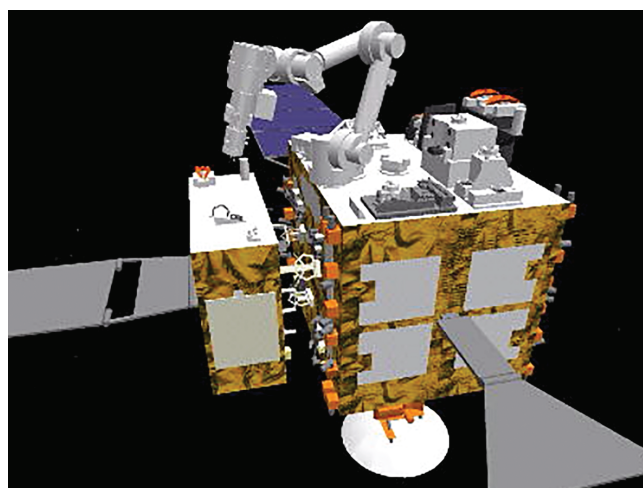
**Введение.** Космические роботы (рис. 1–3), состоящие из основного тела (корпуса) и снабженные одним или несколькими манипуляторами, перспективны для проведения работ в открытом космосе и на орбите спутника Земли, работ по удалению космического мусора, а также по ремонту, обслуживанию и строительству различных объектов (космических станций, орбитальных телескопов и т. д.) [1, 2].



**Рис. 1.** Многоцелевой космический корабль «Буран» (СССР) с манипулятором в грузовом отсеке [3]



**Рис. 2.** Космонавт в открытом космосе (аналог антропоморфного космического робота)



**Рис. 3.** Проект свободно летающего космического робота ETS-VII (Япония) [4]

В настоящей работе исследуется плоское движение космического робота, находящегося в состоянии пассивного полета. Робот состоит из корпуса и руки манипулятора (РМ). Он не имеет либо не использует двигатели для управления движением своего корпуса. Движение манипулятора оказывает заметное влияние на движение корпуса робота (КР) в силу теорем об изменении количества движения и кинетического момента относительно центра масс [1, 2, 5–12].

В [1, 2, 5–12] рассмотрена плоская задача управления движением пассивно летящего робота, состоящего из корпуса и руки манипулятора. Рука манипулятора имеет кинематическую избыточность и состоит не менее чем из трех шарнирно соединенных звеньев. Ограничений на пределы изменения углов в шарнирах руки манипулятора нет. При этом предполагается, что вектор количества движения робота и кинетический момент робота относительно центра его масс равны нулю.

В [1, 2] управление движением робота (перемещение схвата робота из заданного начального положения в заданное конечное положение) основано на локальном принципе построения программного движения. Из текущего положения определяются малые приращения координат в степенях подвижности робота с целью достижения требуемого конечного положения схвата робота. В результате, несмотря на старания авторов [1, 2], не удастся переместить схват манипулятора в значительную часть кинематически достижимых конечных положений, расположенных в рабочей зоне робота. Эта зона является кольцом, ограниченным двумя окружностями с центром в центре масс робота и радиусами, равными максимальному и минимальному расстояниям от центра масс робота до схвата.

В [5–9] задача решается методами теории управления движением без учета особенностей динамики робота, связанной с наличием законов сохранения количества движения и кинетического момента. Управление движением схвата робота строится с помощью обратной связи на основе информации о положении конечной целевой точки робота. При этом перемещения КР, обусловленные движением РМ, рассматриваются как неизвестные возмущения. Как и в [1, 2], оказывается невозможным переместить схват манипулятора из заданного начального в произвольное конечное положение внутри рабочей зоны.

В [10–12] указано, что этот результат представляется ошибочным, обусловленным используемыми методами управления движением робота, которые основаны на локальном принципе их формирования. Необходим переход к глобальному принципу построения программного движения робота, который потребует совершения специальных заранее не очевидных движений для реализации поставленной цели. На простом модельном примере плоского движения робота с телескопической РМ аналитически показано, что можно обеспечить перемеще-

ние схвата робота из произвольного начального в произвольное кинематически достижимое конечное положение. При этом задача решалась в предположении, что имеются ограничения на пределы изменения длины РМ и нет ограничений на пределы изменения угла поворота РМ относительно КР. При решении задачи были учтены данные весьма близких по содержанию работ по управлению движением прыгающего аппарата относительно центра масс в безопорной фазе прыжка [13–24], которые, по-видимому, неизвестны авторам работ [1–9].

В настоящей работе, которая является развитием [10–12], эта задача решена при наличии ограничений как на изменение длины РМ, так и на пределы изменения угла поворота РМ. Показано, что рабочая зона робота существенно больше, чем у аналогичного робота с закрепленным корпусом. За счет специальных движений РМ можно обеспечить разворот КР и перемещение схвата робота из произвольного начального в произвольное конечное положение, если они расположены внутри кольца с центром в центре масс робота, ограниченного окружностями, радиусы которых равны минимальному и максимальному расстояниям от схвата робота до его центра масс. Кроме того, показано, что можно обеспечить требуемое (наиболее удобное для выполнения работ) значение угла между КР и РМ в конечном положении.

**Постановка задачи.** Рассмотрим плоское движение пассивно летящего космического робота.

На рис. 4 приведено схематическое изображение робота, который состоит из корпуса массой  $m_1$  и телескопической РМ, присоединенной к корпусу в его центре масс  $B$ . Момент инерции корпуса относительно его центра масс равен  $J_1$ . Рука манипулятора состоит из цилиндра, который вращается относительно точки его подвеса к корпусу, и штока, который перемещается вдоль телескопического звена РМ. Обозначим через  $m_2, m_3, J_2, J_3$  соответственно массу цилиндра и штока РМ и их моменты инерции относительно их центров масс  $C_2$  и  $C_3$ .

При движении робота на него действуют только внутренние силы в степенях подвижности РМ. Имеют место закон сохранения кинетического момента относительно центра масс робота и закон сохранения количества движения. Рассмотрим проблему управления движением робота при нулевых значениях вектора количества движения робота  $\bar{Q}^0 = 0$  и кинетического момента робота относительно центра масс  $\bar{K}^0 = 0$ . Центр масс робота  $C$  остается неподвижным, и его положение примем за начало инерциальной (орбитальной) системы координат  $C\eta\zeta$ .

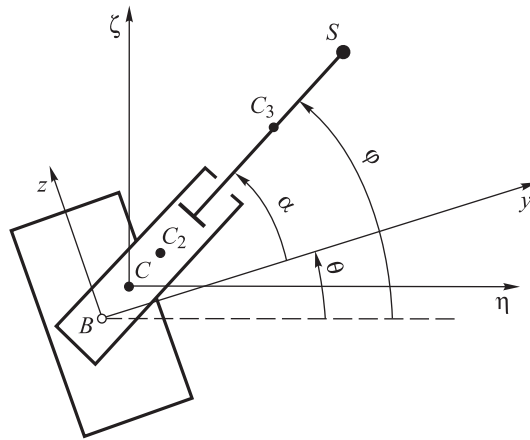


Рис. 4. Конструктивная схема аппарата

Система координат  $Buz$  связана с КР, ось  $Bz$  является конструктивной вертикалью, ось  $Bu$  — продольной осью КР. Положение робота в абсолютной системе координат  $C\eta\zeta$  определяется координатами центра масс КР, углом  $\theta$  поворота КР, углом  $\alpha$  между осью  $Bu$  и РМ и длиной РМ  $l = BS$ . Точка  $S$  — схват манипулятора. Угол  $\varphi$  задает ориентацию телескопического звена РМ в абсолютном пространстве:

$$\varphi = \theta + \alpha. \quad (1)$$

Центр масс цилиндра  $C_2$  лежит на оси телескопического звена РМ на расстоянии  $r_2 = BC_2$  от точки ее подвеса к КР. Центр масс штока  $C_3$  лежит на оси телескопического звена РМ на расстоянии  $r_3 = SC_3$  от схвата  $S$ . Центр масс робота  $C$  лежит на оси телескопического звена РМ на расстоянии  $\rho_B = BC$  от точки  $B$  подвеса РМ к КР [7, 8]:

$$\rho_B = \frac{m_2 r_2 + m_3 (l - r_3)}{m_1 + m_2 + m_3}.$$

Тогда  $l$  (длина РМ) и  $\rho = l - \rho_B$  (расстояние от центра масс робота до схвата) связаны соотношением

$$(m_1 + m_2 + m_3)\rho = (m_1 + m_2)l - m_2 r_2 + m_3 r_3. \quad (2)$$

Закон сохранения кинетического момента относительно центра масс имеет вид [7]

$$k\dot{\varphi} + J_1\dot{\theta} = k\dot{\alpha} + (k + J_1)\dot{\theta} = 0, \quad (3)$$

где

$$k = k(l) = \mu_1(l - \lambda)^2 + \mu_2, \quad \mu_1 = \frac{(m_1 + m_2)m_3}{m_1 + m_2 + m_3}, \quad \lambda = \frac{m_2 r_2}{m_1 + m_2},$$

$$\mu_2 = J_2 + J_3 + \frac{m_3^2 r_3^2}{m_1 + m_2 + m_3} + \frac{m_1 m_2 r_1^2}{m_1 + m_2}. \quad (4)$$

Предположим, что имеются ограничения на пределы изменения длины РМ и угол поворота РМ относительно КР:

$$l \in [l_{\min}, l_{\max}], \quad \alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]. \quad (5)$$

Положение схвата робота определяется полярными координатами  $\rho = CS$  и  $\varphi$ .

Целью управления является перемещение схвата робота из произвольного начального положения  $(\rho_0, \varphi_0)$  в произвольное конечное положение  $(\rho_D, \varphi_D)$  внутри рабочей зоны. Рабочая зона при этом ограничена двумя окружностями с центром в центре масс робота  $C$  и радиусами  $\rho_{\min} = \rho(l_{\min})$  и  $\rho_{\max} = \rho(l_{\max})$ . Кроме того, потребуем, чтобы угол между КР и РМ в конечном положении имел заданное значение  $\alpha_D$  (например, наиболее удобное для выполнения работ). Из (1), (2) следует, что для этого необходимо и достаточно перевести робот из начального состояния  $\theta_0, \alpha_0, l_0$  в конечное —  $\theta_D, \alpha_D, l_D$ , где  $\theta_D = \varphi_D - \alpha_D$ ,  $l_0 = l(\rho_0)$ ,  $l_D = l(\rho_D)$ .

**Построение программного движения.** Движение робота будем осуществлять таким образом, чтобы оно разбивалось на отрезки времени (этапы), в течение каждого из которых работает только один привод РМ. Изменяется либо длина РМ при фиксированном угле  $\alpha$  (тогда угол  $\theta$  остается постоянным в силу (3)), либо угол поворота РМ относительно КР  $\alpha$  при фиксированной длине РМ. Тогда в силу (3)

$$\dot{\theta} = -b(l)\dot{\alpha}, \quad (6)$$

где

$$b(l) = \frac{k(l)}{k(l) + J_1}.$$

*Утверждение 1.* Коэффициент  $b(l)$  является возрастающей функцией  $l$ .

В силу (4)  $k(l) > 0$  и является монотонно возрастающей функцией  $l$  в области (5), так как  $l_{\min} > r_2 > \lambda$ . Следовательно, если  $l_2 > l_1$ , то

$$b(l_2) - b(l_1) = \frac{J_1(k(l_2) - k(l_1))}{(k(l_1) + J_1)(k(l_2) + J_1)} > 0.$$

Интегрируя выражение (6) при  $l = \text{const}$  из начального положения  $\tilde{\alpha}, \tilde{\theta}$ , получаем

$$\theta = f(\tilde{\theta}, l, \alpha, \tilde{\alpha}) = \tilde{\theta} - b(l)(\alpha - \tilde{\alpha}), \quad (7)$$

т. е. поворот РМ на угол  $\Delta\alpha = \alpha - \tilde{\alpha}$  относительно КР приводит к повороту КР на угол  $\Delta\theta = \theta - \tilde{\theta}$ . На плоскости переменных  $\alpha$  и  $\theta$  эта зависимость  $\theta(\alpha)$  имеет вид семейства прямых, наклон которых обусловлен длиной РМ  $l$ . При максимальном значении длины РМ  $l = l_{\max}$  ее поворот оказывает максимальное влияние на движение КР, поэтому прямая (7) в данном случае имеет наибольший наклон. При минимальном значении длины РМ  $l = l_{\min}$  ее поворот оказывает минимальное влияние на движение КР, прямая (7) имеет наименьший наклон. Остальные прямые, проходящие через точку  $(\tilde{\alpha}, \tilde{\theta})$ , реализуются при промежуточных значениях  $l \in (l_{\min}, l_{\max})$ .

Назовем затемненную область и ее границы на рис. 5 областью достижимости из положения  $(\tilde{\alpha}, \tilde{\theta})$  при фиксированном  $l \in [l_{\min}, l_{\max}]$ .

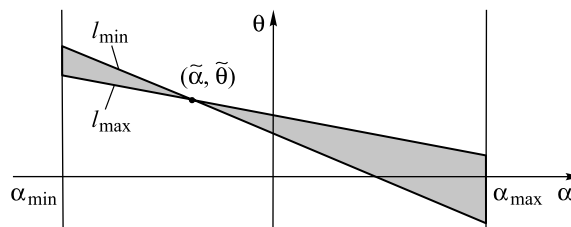


Рис. 5. Область достижимости из положения  $(\tilde{\alpha}, \tilde{\theta})$

Отметим, что на каждом этапе движения робота его конечное положение не зависит от закона изменения соответствующей координаты руки манипулятора  $l$  или  $\alpha$ , а определяется только начальными и конечными значениями этой координаты.

*Утверждение 2.* Робот можно переместить из начального положения  $\alpha_0, \theta_0, l_0$  в конечное положение  $\alpha_D, \theta_D, l_D$ , если они удовлетворяют ограничениям (5) и изображающая точка  $(\alpha_D, \theta_D)$  лежит в области достижимости точки  $(\alpha_0, \theta_0)$ .

В этом случае из (7) следует

$$\theta_D = \theta_0 - b(l^*)(\alpha_D - \alpha_0) \quad (8)$$

при значении  $l^* \in [l_{\min}, l_{\max}]$ , которое определяется из соотношений (4), (8):

$$l^* = \lambda + \sqrt{-\frac{1}{\mu_1} \left( \mu_2 + \frac{J_1(\theta_D - \theta_0)}{\theta_D - \theta_0 + \alpha_D - \alpha_0} \right)}, \quad (9)$$

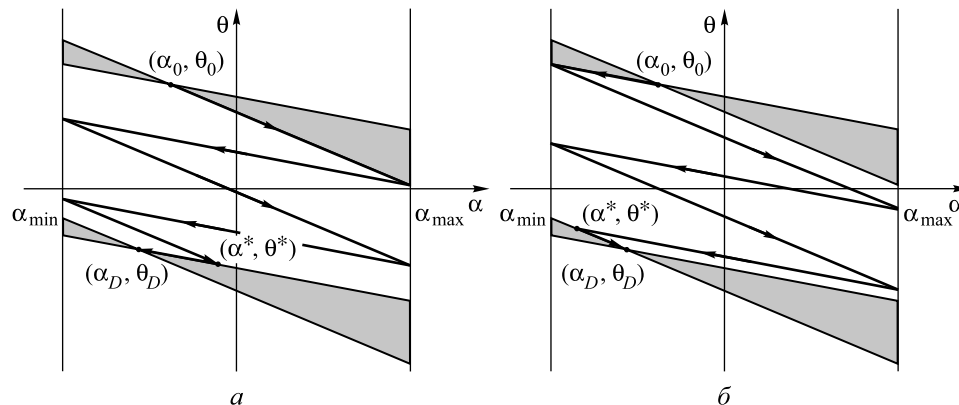
где в силу утверждения 1  $l^* \in [l_{\min}, l_{\max}]$ .

*Замечание.* Здесь и далее вместо  $l_{\min}$  и  $l_{\max}$  можно использовать два других значения:  $\hat{l}_{\min}$  и  $\hat{l}_{\max}$ , которые удовлетворяют условиям  $l_{\min} \leq \hat{l}_{\min} < \hat{l}_{\max} \leq l_{\max}$ .

*Утверждение 3.* Робот можно переместить из произвольного начального положения  $\alpha_0, \theta_0, l_0$  в произвольное конечное положение  $\alpha_D, \theta_D, l_D$ , если они удовлетворяют ограничениям (5).

Если конечное положение изображающей точки  $(\alpha_D, \theta_D)$  лежит внутри области достижимости из ее начального положения, то программное движение строится в соответствии с утверждением 2.

Если изображающая точка  $(\alpha_D, \theta_D)$  лежит ниже области достижимости из начального положения  $(\alpha_0, \theta_0)$ , существует два способа построения программного движения. На рис. 6 показаны соответствующие им траектории изображающей точки на плоскости  $\alpha, \theta$ .



**Рис. 6.** Два способа построения траектории изображающей точки для случая, когда ее конечное положение лежит ниже области достижимости из начального положения

При использовании первого способа (рис. 6, а) схват РМ в относительной системе координат *Вуз*, связанной с КР, движется по траектории, показанной на рис. 7. Начальное положение схвата обозна-



чено  $S_0$ , а конечное —  $S_D$ . Если конечное положение изображающей точки  $(\alpha_D, \theta_D)$  лежит близко к области достижимости из ее начального положения  $(\alpha_0, \theta_0)$ , то схват РМ движется по траектории  $S_0S_1S_2S_3S_4S_D$ . В противном случае схват РМ движется по траектории  $S_0S_1S_2S_3S_5S_6S_2S_3S_4S_D$ , при этом выделенный замкнутый участок  $S_2S_3S_5S_6S_2$  траектории схвата может повторяться несколько раз.

На этом циклическом движении схвата РМ на участках  $S_2S_3$  и  $S_5S_6$  изменяется только длина РМ, а угол  $\theta$  поворота КР в абсолютном пространстве остается неизменным.

На участке  $S_3S_5$  РМ поворачивается относительно корпуса по ходу часовой стрелки при  $l = l_{\min}$ , а КР в соответствии с (7) поворачивается против хода часовой стрелки на угол

$$|\Delta\theta_1| = b(l_{\min})(\alpha_{\max} - \alpha_{\min}).$$

На участке  $S_6S_2$  РМ поворачивается относительно корпуса против хода часовой стрелки при  $l = l_{\max}$ , а КР в соответствии с (7) поворачивается по ходу часовой стрелки на угол

$$|\Delta\theta_2| = b(l_{\max})(\alpha_{\max} - \alpha_{\min}).$$

В силу утверждения 1  $b(l)$  является монотонно возрастающей функцией  $l$  (длины РМ), а следовательно,

$$|\Delta\theta_2| - |\Delta\theta_1| = (b(l_{\max}) - b(l_{\min}))(\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) > 0.$$

В результате каждого цикла движения схвата РМ по участку  $S_2S_3S_5S_6S_2$  КР разворачивается по ходу часовой стрелки на угол  $|\Delta\theta_2| - |\Delta\theta_1| > 0$ .

Если изображающая точка  $(\alpha_D, \theta_D)$  лежит выше области достижимости из начального положения  $(\alpha_0, \theta_0)$ , то программное движение строится аналогично.

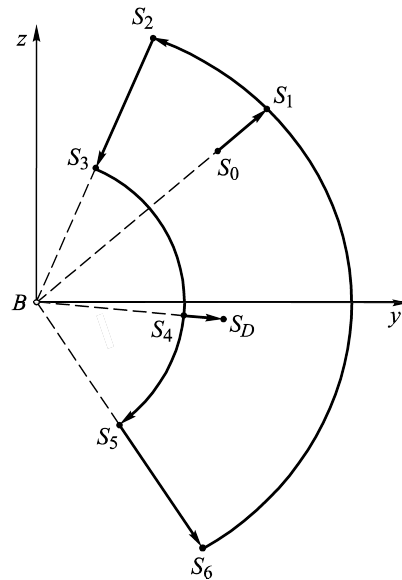


Рис. 7. Траектория схвата РМ в относительной системе координат, связанной с КР

**Заключение.** Исследовано плоское движение космического робота, находящегося в состоянии пассивного полета, в предположении, что вектор количества движения и кинетический момент робота равны нулю. Рассмотрен робот, состоящий из корпуса и телескопической РМ. Предполагается, что имеются ограничения как на пределы изменения длины РМ, так и на угол поворота РМ относительно корпуса. Показано, что за счет специальных циклических движений РМ относительно корпуса можно развернуть КР на произвольный угол. В результате рабочая зона пассивно летящего космического робота (возможные конечные положения схвата робота) оказывается существенно больше рабочей зоны робота с закрепленным корпусом. Рабочей зоной робота в абсолютном пространстве является кольцо, ограниченное двумя окружностями с центром в центре масс робота и радиусами, равными минимальному и максимальному расстояниям от центра масс робота до схвата. При построении программного движения можно обеспечить не только выход схвата робота в заданное конечное положение, но и требуемое (более выгодное для проведения работ) значение угла между корпусом и РМ в конечном положении.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-01-00521).*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dubovsky S., Papadopoulos E. The Kinematics, Dynamics, and Control of Free-Flying and Free-Floating Space Robotics Systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, vol. 9 (5), pp. 531–543.
- [2] Moosavian S., Ali A., Papadopoulos E. Free-Flying Robots in Space: an Overview on Dynamics Modelling, Planning and Control. *Robotica*, 2007, vol. 25 (5), pp. 537–547.
- [3] *Буря*. URL: <http://www.buran.ru> (дата обращения 24.06.2017).
- [4] Inaba N., Oda M. Autonomous Satellite Capture by a Space Robot — World First on Orbit Experiments on a Japanese Robot Satellite ETS-VII. *Proc. of 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2000, pp. 1169–1174.
- [5] Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Глумов В.М. Уравнения движения и управление свободнолетающим космическим роботом. *Автоматика и телемеханика*, 2010, № 1, с. 80–98.
- [6] Rutkovskiy V.Yu., Sukhanov V.M., Glumov V.M. Motion Equations and Control of the Free-Flying Space Manipulator in the Reconfiguration Mode. *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71 (1), pp. 70–86.
- [7] Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Глумов В.М. Управление многорежимным космическим роботом при выполнении манипуляционных операций во внешней среде. *Автоматика и телемеханика*, 2010, № 11, с. 84–99.
- [8] Rutkovskiy V.Yu., Sukhanov V.M., Glumov V.M. Control of Multimode Manipulative Space Robot in Outer Space. *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71 (11), pp. 2345–2359.
- [9] Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Глумов В.М. Новый подход к решению основной задачи управления свободнолетающим космическим манипуляционным роботом. *Тр. XII Всероссийского совещания по проблемам управления*. Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014, с. 3853–3865.

- [10] Лапшин В.В. Управление движением робота в условиях невесомости. *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2017, № 1, с. 161–167.
- [11] Lapshin V.V. Robot Motion Control in Zero-Gravity Conditions. *Journal Computers and System Sciences International*, 2017, vol. 56 (1), pp. 157–163.
- [12] Borovin G.K., Lapshin V.V. About a Motion of Free-Floating Space Robot. *Mathematica Montesnigri*, 2017, vol. XXXIX, pp. 67–78.
- [13] Лапшин В.В. Динамика и управление движением прыгающего аппарата. *Известия АН СССР. Механика твердого тела*, 1983, № 5, с. 42–51.
- [14] Лапшин В.В. Управление движением прыгающего аппарата в фазе полета. *Известия АН СССР. Механика твердого тела*, 1984, № 1, с. 159–165.
- [15] Hemami J., Zheng Y. Dynamics and Control of Motion on the Ground and in the Air with Application to Biped Robot. *Journal of Robotics Systems*, 1984, № 1, pp. 101–116.
- [16] Raibert M.H. *Legged robots that balance*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1986, 234 p.
- [17] Hodgins J., Raibert M.H. Biped Gymnastics. *Robotics Research: The Fourth Int. Symp.*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1987, pp. 5–14.
- [18] Lapshin V.V. Motion Control of a Legged Machine in the Supportless Phase of Hopping. *The International Journal of Robotics Research*, 1991. vol. 10 (4), pp. 327–337.
- [19] Okhotsimsky D., Platonov A., Kiril'chenko A., Lapshin V., Tolstousova V. Walking Machines. *Advances in Mechanics*, 1992, vol. 15 (1–2), pp. 39–70.
- [20] Лапшин В.В., Колесникова Г.П. Оптимальное по времени управление движением связки двух тел вокруг центра масс. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2007, № 4, с. 20–28.
- [21] Лапшин В.В., Чашников С.П. Управление ориентацией прыгающего аппарата в безопорной фазе движения при нулевом кинетическом моменте. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2011, № 1, с. 55–67.
- [22] Лапшин В.В. *Механика и управление движением шагающих машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 199 с.
- [23] Боровин Г.К., Лапшин В.В. Оптимальное управление ориентацией двух шарнирно соединенных тел в безопорной фазе движения. *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2014, № 4, с. 148–160.
- [24] Borovin G.K., Lapshin V.V. Optimal Attitude Control of Two Pivotaly Connected Bodies in the Supportless Phase of Motion. *Journal Computers and System Sciences International*, 2014, vol. 53 (4), pp. 610–622.

Статья поступила в редакцию 06.10.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Боровин Г.К., Лапшин В.В. О планировании движения космического робота.

*Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 12.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-12-1830>

**Боровин Геннадий Константинович** — д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, SPIN-код РИНЦ 6604-4668. e-mail: borovin@keldysh.ru

**Лапшин Владимир Владимирович** — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теоретическая механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, SPIN-код РИНЦ 2292-7446. e-mail: lapshin032@bmstu.ru

## On space robot motion planning

© G.K. Borovin<sup>1,2</sup>, V.V. Lapshin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, 125047, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The paper focuses on the problem of motion control of a space robot. The robot consists of a body and a telescopic manipulator, and is in state of passive flight, i.e. it does not use any propulsion that controls movement and navigation of the robot body. Only the actuators installed at the axes are used to control robot movements. Thus, the robot movement is affected only by internal forces. The movement of the manipulator has a noticeable effect on the movement of the robot body due to the conservation laws of robot momentum and its angular momentum relative to the center of mass. We assumed that the robot momentum and angular momentum are equal to zero. There are constraints both on the variation limits in the length of the manipulator arm and the angle of its rotation relative to the body. The problem is solved as a plane problem. When the manipulator arm moves from the initial position to the final one, the latter being located in the working space, the program motion includes the sequence of the following alternating actions: shortening the manipulator arm length to the minimum value, its rotation relative to the robot body, extending the manipulator arm length to the maximum value, then again the arm rotation relative to the robot body, etc. Findings of the research show that due to these cyclic motions of the manipulator arm relative to the body, the robot body can be rotated at an arbitrary angle. As a result, the working space of a passively flying space robot is significantly larger than the working space of a robot with a fixed body. The working space of the robot in absolute space is a ring bounded by two circles centered at the center of the robot mass and radii equal to the minimum and maximum distance from the center of the robot mass to the robot gripper. Moreover, when constructing the program motion, it is possible to provide not only the robot gripper taking a given final position, but also the required value of the angle between the robot body and the manipulator arm in the final position, which is more advantageous for the work.*

**Keywords:** space robot, motion control, construction of the program motion

### REFERENCES

- [1] Dubovsky S., Papadopoulos E. The Kinematics, Dynamics, and Control of Free-Flying and Free-Floating Space Robotics Systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, vol. 9 (5), pp. 531–543.
- [2] Moosavian S., Ali A., Papadopoulos E. Free-Flying Robots in Space: an Overview on Dynamics Modelling, Planning and Control. *Robotica*, 2007, vol. 25 (5), pp. 537–547.
- [3] *Buran* [“Molniya”. Research Industrial Corporation]. Available at: <http://www.buran.ru> (accessed June 24, 2017).
- [4] Inaba N., Oda M. Autonomous Satellite Capture by a Space Robot — World First on Orbit Experiments on a Japanese Robot Satellite ETS-VII. *Proc. of 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2000, pp. 1169–1174.
- [5] Rutkovskiy V.Yu., Sukhanov V.M., Glumov V.M. *Avtomatika i telemekhanika — Automation and Remote Control*, 2010, no. 1, pp. 80–98.
- [6] Rutkovskiy V.Yu., Sukhanov V.M., Glumov V.M. Motion Equations and Control of the Free-Flying Space Manipulator in the Reconfiguration Mode. *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71 (1), pp. 70–86.

- [7] Rutkovskiy V.Yu., Sukhanov V.M., Glumov V.M. *Avtomatika i telemekhanika — Automation and Remote Control*, 2010, no. 11, pp. 84–99.
- [8] Rutkovskiy V.Yu., Sukhanov V.M., Glumov V.M. Control of Multimode Manipulative Space Robot in Outer Space. *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71 (11), pp. 2345–2359.
- [9] Rutkovskiy V.Yu., Sukhanov V.M., Glumov V.M. Novyi podhod k resheniyu osnovnoy zadachi upravleniya svobodnoletayushchim kosmicheskim manipulyatsionnym robotom [A new approach to solving the basic task of controlling a free-flying space manipulation robot]. *Trudy XII Vserossiyskogo simposiuma po problemam upravleniya* [Proc. of XII All-Russian symposium on the problems of control]. Moscow, 2014, pp. 3853–3865.
- [10] Lapshin V.V. *Izvestia RAN. Teoriya i sistemy upravleniya — Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, no. 1, pp. 161–167.
- [11] Lapshin V.V. Robot Motion Control in Zero-Gravity Conditions. *Journal Computers and System Sciences International*, 2017, vol. 56 (1), pp. 157–163.
- [12] Borovin G.K., Lapshin V.V. About a Motion of Free-Floating Space Robot. *Mathematica Montesnigri*, 2017, vol. XXXIX, pp. 67–78.
- [13] Lapshin V.V. *Izvestia AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela — Mechanics of Solids*, 1983, no. 5, pp. 42–51.
- [14] Lapshin V.V. *Izvestia AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela — Mechanics of Solids*, 1984, no. 1, pp. 159–165.
- [15] Hemami J., Zheng Y. Dynamics and Control of Motion on the Ground and in the Air with Application to Biped Robot. *Journal of Robotics Systems*, 1984, no. 1, pp. 101–116.
- [16] Raibert M.H. *Legged robots that balance*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1986, 234 p.
- [17] Hodgins J., Raibert M.H. Biped Gymnastics. *Robotics Research: The Fourth Int. Symp.*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1987, pp. 5–14.
- [18] Lapshin V.V. Motion Control of a Legged Machine in the Supportless Phase of Hopping. *The International Journal of Robotics Research*, 1991, vol. 10 (4), pp. 327–337.
- [19] Okhotsimsky D., Platonov A., Kirilchenko A., Lapshin V., Tolstousova V. Walking Machines. *Advances in Mechanics*, 1992, vol. 15 (1–2), pp. 39–70.
- [20] Lapshin V.V., Kolesnikova G.P. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2007, no. 4, pp. 20–28.
- [21] Lapshin V.V., Chashnikov S.P. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2011, no. 1, pp. 55–67.
- [22] Lapshin V.V. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagayuschikh mashin* [Mechanics and motion control of walking machines.]. Moscow, BMSTU Publ., 2012, 199 p.
- [23] Borovin G.K., Lapshin V.V. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya — Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2014, no. 4, pp. 148–160.
- [24] Borovin G.K., Lapshin V.V. Optimal Attitude Control of Two Pivotaly Connected Bodies in the Supportless Phase of Motion. *Journal Computers and System Sciences International*, 2014, vol. 53 (4), pp. 610–622.

**Borovin G.K.**, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Chief Research Fellow, Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS. e-mail: borovin@keldysh.ru  
SPIN-code of RISC 6604-4668

**Lapshin V.V.**, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Theoretical Mechanics,  
Bauman Moscow State Technical University.  
e-mail: lapshin032@bmstu.ru  
SPIN-code of RISC 2292-7446