

О ДВИЖЕНИИ КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА ПРИ ПАССИВНОМ ПОЛЕТЕ

Г.К.БОРОВИН^{*}, В.В.ЛАПШИН[†]

^{*} Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
Москва, Россия
e-mail: borovin@keldysh.ru

[†] Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
Москва, Россия
Email: vladimir@lapshin.net

Ключевые слова: космический робот, управление движением

Аннотация. Рассматривается задача управления движением космического робота, состоящего из корпуса и руки манипулятора (РМ). Робот находится в состоянии пассивного полета, т.е. не имеет (либо не использует) двигатели, которые позволяют управлять движением КР. При управлении движением робота, используются только двигатели в степенях подвижности РМ. Движение РМ относительно корпуса робота (КР) оказывает заметное влияние на движение КР в силу теорем об изменении количества движений и кинетического момента относительно центра масс [1-3,5-7]. Предполагается, что вектор количества движений и кинетический момент робота относительно центра масс равны нулю.

В отличие от ранее полученных результатов [1-3,5] показано, что задача перемещения схвата робота из произвольного начального положения в произвольное конечное положение внутри области кинематической достижимости всегда имеет решение. Таких решений бесконечное множество. При этом среди них существуют решения, которые обеспечивают выход в конечное положение схвата робота при заданном (наиболее удобном для выполнения рабочих операций) значении угла между рукой манипулятора и корпусом робота.

Благодарности: работа выполнена при частичной поддержке грантами РФФИ 16-01-00521 и РНФ 16-19-10705.

ABOUT A MOTION OF FREE-FLOATING SPACE ROBOT

G.K.BOROVIN^{*}, V.V.LAPSHIN[†]

^{*} Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS
Miusskaya sq., 4, 125047 Moscow, Russia
e-mail: borovin@keldysh.ru

[†] Bauman Moscow State Technical University
2-nd Baumanskaya st., 5, 105005 Moscow, Russia
Email: vladimir@lapshin.net

2010 Mathematics Subject Classification: 70E60, 70Q05.

Key words and Phrases: Space Robot, Motion Control.

Key words: space robot, motion control

Summary. The problem of motion control of free-floating space robot plane was investigated. The robot consists of a body and a telescopic manipulator arm. The robot is in a state of passive flight, i.e. does not have (or do not use) engines, which allow to control the movement of space robot. When controlling the movement of the robot, used engines only in the degrees of freedom of manipulator arm. The movement of the manipulator arm relative to the body of the robot has a significant impact on the movement of space robot in virtue of theorems on change of amount of motion and kinetic moment about the center of mass [1-3,5-7]. It is assumed that the vector amount of movement and angular momentum of the robot about the center of mass is zero.

In contrast to the earlier published results of [1-3,5] it is shown that the task of moving the gripper of the robot from an arbitrary start position to arbitrary end position inside the working space of the kinematic reachability always has a solution.

Such solutions are endless. Moreover, among them there are solutions that provide access to the end positions of the gripper of the robot at a given value of the angle between the manipulator arm and main body of the robot, which is the most convenient for working operations.

Acknowledgements: this work was partially supported grants by RFBR 16-01-00521 and by RSF 16-19-10705.

1 ВВЕДЕНИЕ

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

На рис. 1 показан космонавт в открытом космосе, который является полным аналогом антропоморфного космического робота. На рис. 2 приведен проект японского свободно летающего космического робота [3]. На рис.3 представлен многоразовый космический корабль «Буран» с манипулятором в грузовой кабине [4].



Рис. 1. Космонавт в открытом космосе (антропоморфный космический робот).

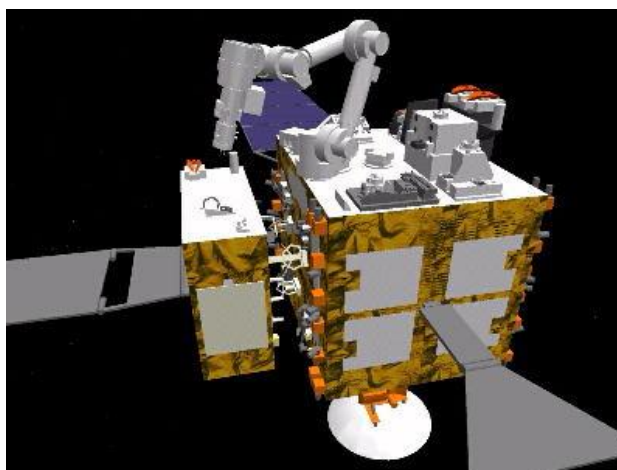


Рис. 2. Проект свободно летающего космического робота ETS-VII (Япония).

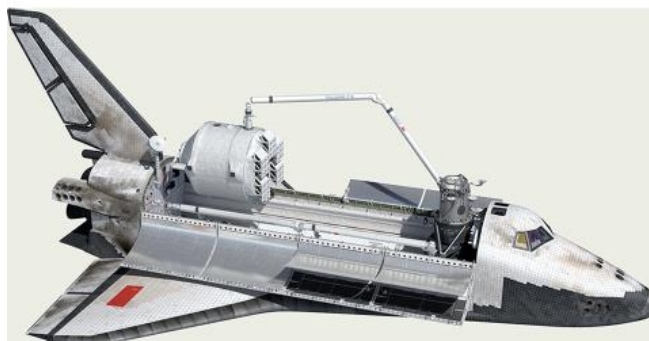


Рис. 3. Многоцелевой космический корабль «Буран» с манипулятором в грузовой кабине.

В работе исследуется плоское движение космического робота, находящегося в состоянии пассивного полета. Робот состоит из корпуса и руки манипулятора. Он не имеет либо не использует двигатели для управления движением корпуса робота.

Движение манипулятора оказывает заметное влияние на движение корпуса робота в силу теорем об изменении количества движений и кинетического момента относительно центра масс [1-3, 5-7].

В [1-3, 5] 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. Нет ограничений на пределы изменения углов в шарнирах руки манипулятора. При этом предполагается, что вектор количества движений 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) строится на основе построения программного движения. Программное движение строится локально. 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, не удается переместить схват манипулятора в значительную часть кинематически достижимых конечных положений, расположенных в рабочей зоне робота, которая является кольцом, ограниченным двумя окружностями с центром в центре масс робота и радиусами, равными максимальному и минимальному расстоянию от центра масс робота до схвата.

В [3, 5] задача решается методами теории управления движением без учета особенностей динамики робота, связанной с наличием законов сохранения количества движений и кинетического момента. Управление движением схвата робота строится с помощью обратной связи на основе информации о положении конечной целевой точки робота. При этом перемещения корпуса робота, обусловленные движением руки манипулятора, рассматриваются как неизвестные возмущения. Так же, как и в [1, 2] оказывается невозможным переместить схват манипулятора из заданного начального в произвольное конечное положение внутри рабочей зоны.

Этот результат работ [1-3, 5] представляется ошибочным и вызванным не принципиальной невозможностью осуществления требуемого перемещения схвата робота, а используемыми методами построения алгоритмов управления движением, основанными на локальном (тактическом) принципе их формирования. Необходим переход к глобальному (стратегическому) принципу построения программного движения робота, который потребует совершения специальных заранее не очевидных движений для реализации поставленной цели.

Данная работа является развитием [7]. Рассмотрена задача управления движением пассивно летящего космического робота на простом модельном примере плоского движения робота, состоящего из корпуса и телескопической руки манипулятора. Аналитически показано, что задача перемещения схвата робота внутри рабочей зоны из произвольного начального в произвольное конечное положение имеет бесконечное множество решений. Среди них можно выбрать такие решения, при которых в конечном положении угол поворота руки манипулятора относительно корпуса будет иметь заданное (наиболее комфортное для выполнения работ) значение. При решении этой задачи существенно использован опыт весьма близких по содержанию работ по

управлению движением прыгающего аппарата относительно центра масс в безопорной фазе прыжка [8–22], которые, по-видимому, неизвестны авторам [1-3, 5].

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим плоское движение космического робота, находящегося в состоянии пассивного полета. Робот либо не имеет, либо не использует двигатели для управления движением центра масс робота и ориентацией корпуса робота (движением вокруг центра масс).

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

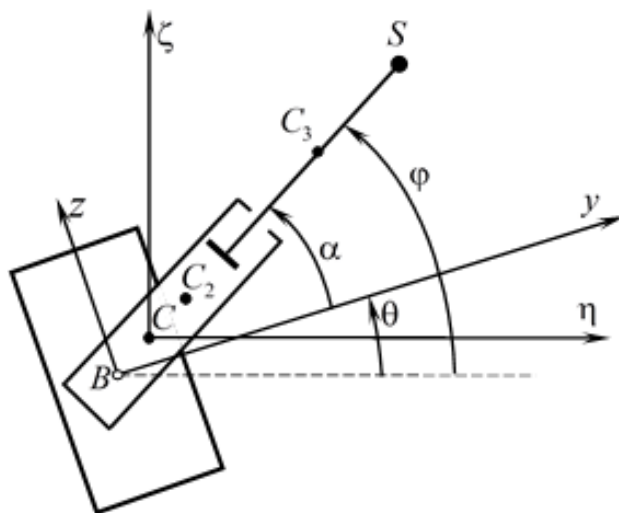


Рис 4. Конструктивная схема аппарата

При движении робота на него действуют только внутренние силы в степенях подвижности руки манипулятора, а поэтому имеет место закон сохранения кинетического момента относительно центра масс робота и закон сохранения количества движений.

Рассмотрим проблему управления движением робота при нулевых значениях вектора количества движений робота $\bar{Q}^0 = 0$ и кинетического момента робота относительно центра масс $K^0 = 0$. Тогда центр масс робота C остается неподвижным и его положение примем за начало инерциальной (орбитальной) системы координат.

Система координат Buz связана с корпусом робота, ось Bz является конструктивной вертикалью, а ось Bu — продольной осью корпуса. Положение робота в абсолютной инерциальной (орбитальной) системе координат $Cηζ$ определяется

координатами центра масс корпуса, углом поворота корпуса θ , углом α между осью Bu и телескопическим звеном руки и длиной руки манипулятора $l = BS$. Точка S является схватом манипулятора. Угол φ задает ориентацию телескопического звена руки манипулятора в абсолютном пространстве:

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

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

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

тогда l – длина руки манипулятора и $\rho = l - \rho_B$ расстояние от центра масс робота до схвата связаны соотношением

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

Закон сохранения кинетического момента относительно центра масс имеет вид [5]

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

где

$$k = k(l) = \mu_1 (l - \lambda)^2 + \mu_2 \quad , \quad \mu_1 = \frac{(m_1 + m_2)m_3}{m_1 + m_2 + m_3} \quad , \quad \lambda = \frac{m_2 r_2}{m_1 + m_2} \quad , \quad (4)$$

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

Положим, что имеются ограничения на пределы изменения длины руки манипулятора:

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

Диапазон изменения угла поворота руки манипулятора относительно корпуса α не ограничен.

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

Целью управления является перемещение схвата робота из произвольного начального положения (ρ_0, φ_0) в произвольное конечное положение (ρ_D, φ_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 корпусом робота и рукой манипулятора в конечном положении имел заданное значение α_D (например, наиболее удобное для выполнения работ). Тогда в силу (1)–(2) робот необходимо перевести из начального положения

θ_0, α_0, l_0 в конечное положение θ_D, α_D, l_D , где $\theta_D = \varphi_D - \alpha_D$, $l_0 = l(\rho_0)$, $l_D = l(\rho_D)$.

3 ПОСТРОЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ДВИЖЕНИЯ

Движение аппарата будем осуществлять таким образом, чтобы оно разбивалось на отрезки времени (этапы), в течение каждого из которых работает только один привод руки манипулятора. Либо изменяется длина руки манипулятора при фиксированном угле α , тогда угол θ остается постоянным в силу (3). Либо изменяется угол поворота руки манипулятора относительно корпуса α при фиксированной длине руки манипулятора, тогда в силу (3)

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

где

$$b(l) = \frac{k(l)}{k(l) + J_1} \quad . \quad (7)$$

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

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

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

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

$$\theta = f(\tilde{\theta}, l, \alpha, \tilde{\alpha}) = \tilde{\theta} - b(l)(\alpha - \tilde{\alpha}) \quad , \quad (8)$$

т.е. поворот руки манипулятора на угол $\Delta\alpha = \alpha - \tilde{\alpha}$ относительно корпуса приводит к повороту корпуса на угол $\Delta\theta = \theta - \tilde{\theta}$. На плоскости переменных α и θ эта зависимость $\theta(\alpha)$ имеет вид семейства прямых, наклон которых зависит от l . При максимальном значении длины руки манипулятора $l = l_{\max}$ ее поворот оказывает максимальное влияние на вращение корпуса, поэтому прямая (8) в этом случае имеет наибольший наклон. При минимальном значении длины руки манипулятора $l = l_{\min}$ ее поворот оказывает минимальное влияние на вращение корпуса, прямая (8) 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 кинематической достижимости из положения $\tilde{\alpha}, \tilde{\theta}$ при фиксированном $l \in [l_{\min}, l_{\max}]$.

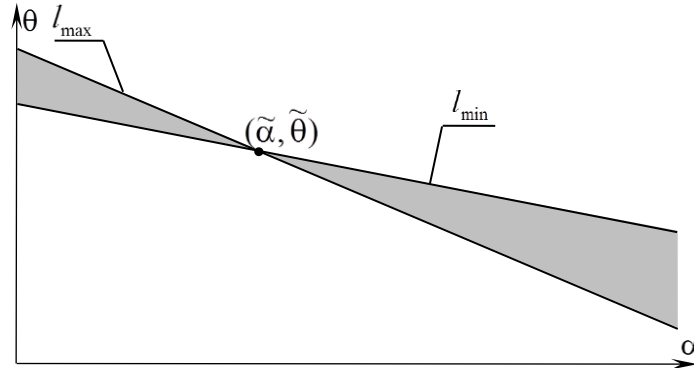


Рис. 5. Область кинематической достижимости из положения $(\tilde{\alpha}, \tilde{\theta})$

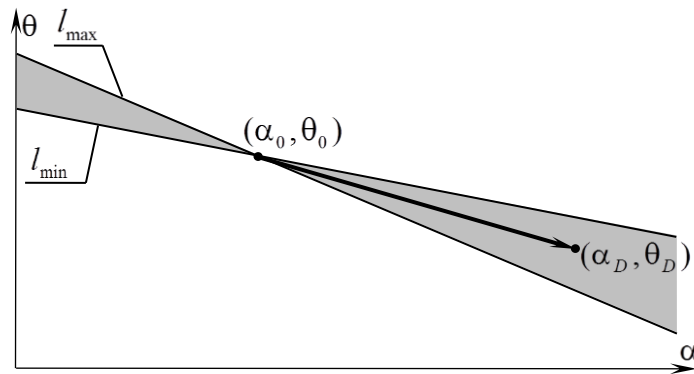


Рис. 6. Траектория движения изображающей точки (α, θ) для случая, когда ее конечное положение лежит в области кинематической достижимости из начального положения

Отметим, что на каждом из этапов движения робота его конечное положение не зависит от закона изменения соответствующей координаты руки манипулятора l или α , а определяется только начальным и конечным значением этой координаты.

У т в е р ж д е н и е 2. Робот можно переместить из начального положения α_0, θ_0, l_0 в конечное положение α_D, θ_D, l_D , если изображающая точка α_D, θ_D лежит в области достижимости точки α_0, θ_0 (рис. 6), а l_0 и l_D удовлетворяют ограничениям (5).

Д о к а з а т е л ь с т в о. В этом случае из (8) следует, что

$$\theta_D = \theta_0 - b(l^*)(\alpha_D - \alpha_0) \quad , \quad (9)$$

при значении длины руки манипулятора $l = l^*$, которое определяется из соотношений (4), (8)–(9)

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

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

Траектория изображающей точки α, θ показана на рис. 6.

Программное движение робота строится следующим образом:

1. При $\alpha = \alpha_0$ длина руки манипулятора изменяется до значения l^* .
2. При фиксированном $l = l^*$ рука манипулятора поворачивается, угол α изменяется от α_0 до α_D , тогда угол поворота корпуса θ становится равным θ_D .
3. При $\alpha = \alpha_D$ длина руки манипулятора изменяется до требуемого значения l_D .

Утверждение 3. Робот можно переместить из произвольного начального положения α_0, θ_0, l_0 в произвольное конечное положение α_D, θ_D, l_D , если l_0 и l_D удовлетворяют ограничениям (5).

Доказательство. Если конечное положение изображающей точки α_D, θ_D лежит внутри области достижимости из ее начального положения, то программное движение строится в соответствии с утверждением 2.

Если изображающая точка α_D, θ_D лежит ниже области достижимости из начального положения α_0, θ_0 существует два способа построения программного движения. Первому способу соответствует движение изображающей точки α, θ по траектории, показанной на рис. 7а. Программное движение робота строится следующим образом:

1. При $\alpha = \alpha_0$ длина руки манипулятора изменяется от l_0 до l_{\min} .
2. Определяются значения α_1, θ_1 , при которых конечное положение α_D, θ_D попадает на границу области достижимости из положения α_1, θ_1 . Угол α изменяется от α_0 до α_1 .
3. При $\alpha = \alpha_1$ длина руки манипулятора изменяется от l_{\min} до l_{\max} .
4. Угол α изменяется от α_1 до α_D .
5. При $\alpha = \alpha_D$ длина руки манипулятора изменяется от l_{\max} до l_D .

Второму способу построения программного движения соответствует траектория движения изображающей точки на плоскости α, θ , показанная на рис. 7б. Тогда

1. При $\alpha = \alpha_0$ длина руки манипулятора изменяется от l_0 до l_{\max} .
2. Определяются значения α_1, θ_1 , при которых конечное положение α_D, θ_D попадает на границу области достижимости из положения α_1, θ_1 . Угол α изменяется от α_0 до α_1 .
3. При $\alpha = \alpha_1$ длина руки манипулятора изменяется от l_{\max} до l_{\min} .
4. Угол α изменяется от α_1 до α_D .
5. При $\alpha = \alpha_D$ длина руки манипулятора изменяется от l_{\max} до l_D .

Если изображающая точка α_D, θ_D лежит выше области достижимости из начального положения α_0, θ_0 программное движение строится аналогично (см. рис. 8).

З а м е ч а н и е. Вместо l_{\min} и l_{\max} можно использовать любые значения \hat{l}_{\min} и \hat{l}_{\max} , которые удовлетворяют условиям $l_{\min} \leq \hat{l}_{\min} < \hat{l}_{\max} \leq l_{\max}$.

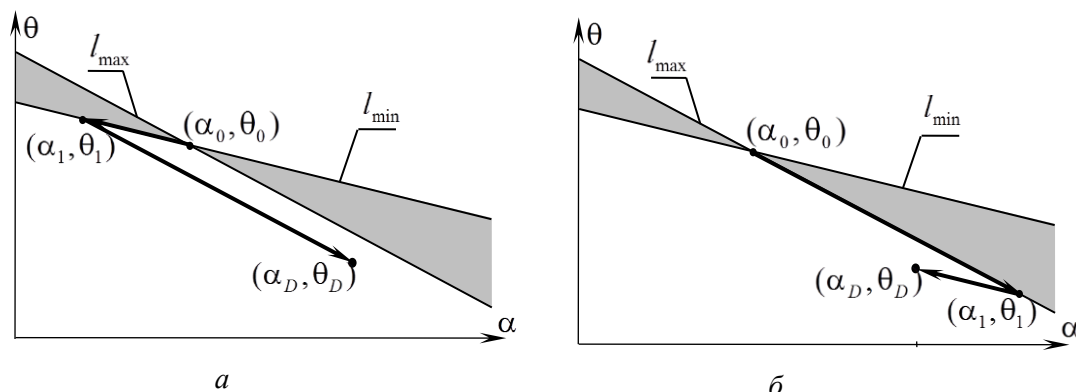


Рис. 7. Траектории движения изображающей точки (α, θ) для случая, когда ее конечное положение лежит ниже области кинематической достижимости из начального положения.

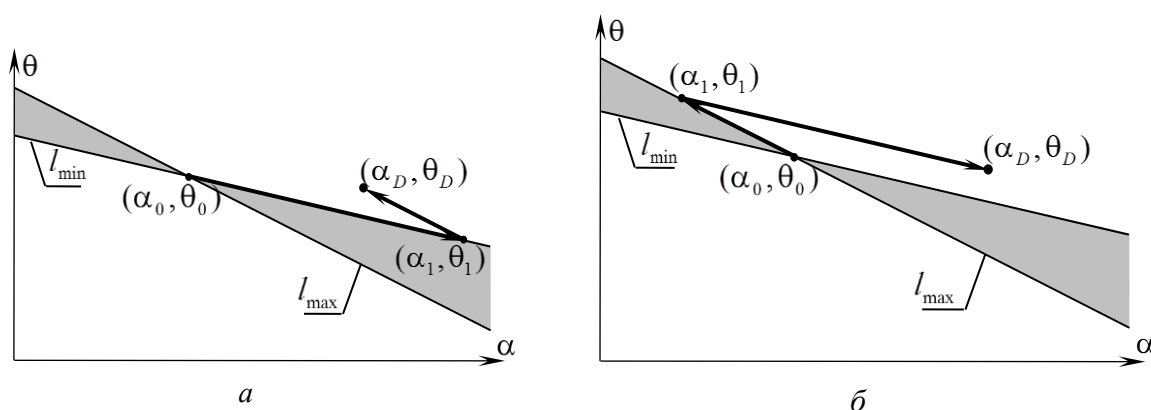


Рис. 8. Траектории движения изображающей точки (α, θ) для случая, когда ее конечное положение лежит выше области кинематической достижимости из начального положения.

4 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 руки манипулятора. В отличие от ранее полученных результатов [1-3, 5, 6] показано, что задача перемещения схвата робота из произвольного начального положения в произвольное конечное положение внутри рабочей зоны всегда имеет решение. При этом можно дополнительно обеспечить выход в конечное положение схвата робота при заданном (наиболее удобном для выполнения рабочих операций) значении угла между рукой манипулятора и корпусом робота. Следует ожидать, что аналогичный результат может быть получен и для более сложных конструктивных схем робота, в которых центр масс корпуса не совпадает с точкой крепления руки

манипулятора к корпусу и (или) рука манипулятора состоит из шарнирно соединенных звеньев. Для этого потребуется численное решение краевой задачи о перемещении схвата робота из заданного начального в заданное конечное положение внутри рабочей зоны. Эта задача, по-видимому, имеет бесконечное число решений. При ее решении не следует стремиться сразу (локально) к требуемому конечному положению, а необходимо задуматься о специальных движениях руки манипулятора, которые обеспечат желательный разворот корпуса робота в конечном положении.

REFERENCES

- [1] S. Dubovsky, E. Papadopoulos, "The Kinematics, Dynamics and Control of Free-Flying and Free-Floating Space Robotics Systems", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **9** (5), 531-543 (1993).
- [2] S. Moosavian S., A. Ali., E. Papadopoulos, "Free-Flying Robots in Space: an Overview on Dynamics Modeling, Planning and Control", *J. Robotica*, **25** (5), 537-54 (2007).
- [3] Inaba N, Oda M. "Autonomous Satellite Capture by a Space Robot - World First on Orbit Experiments on a Japanese Robot Sattelite ETS-VII", *Proc. of 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1169-1174 (2000).
- [4] "Molniya" Research & Industrial Corporation -- Official website. Available at: <http://www.buran.ru>, accessed 17.12.2016.
- [5] V.Yu. Rutcovski, V.M. Sukhanov, V.M. Glumov, "Motion Equations and Control of the Free-flying Space Manipulator in the Reconfiguration Mode", *Automation and Remote Control*, **71** (1), 70-86 (2010).
- [6] V.Yu. Rutcovski, V.M. Sukhanov, V.M. Glumov, "[Control of Multimode Manipulative Space Robot in Outer Space](#)", *Automation and Remote Control*, **71** (11), 2345-2349 (2010).
- [7] V.V. Lapshin, "Robot Motion Control in Zero-Gravity Conditions", *J. Computers and System Sciences Int.*, **56** (1), 157-163 (2017).
- [8] T.R. Kane, M.P. Scher, "A Dynamical Explanation of the Falling Cat Phenomenon", *Int. J. Solids and Structures*, (7) (1969).
- [9] P.G. Smith, T.R. Kane, "On the Dynamics of Human Body in Free Fall", *J. Applied Mechanics*, (1) (1968).
- [10] C. Frohlich, "Do Springboard Divers Violate Angular Momentum Conservation?", *American J. Physics*, **47**, 583-592 (1979).
- [11] C. Frohlich, "The Physics of Somersaulting and Twisting", *Scientific American*, (242), 113-120 (1980).
- [12] V.V. Lapshin, "Dynamics and Motion Control of Hopping Vehicle", *Izv. AN SSSR. Mekhanika Tverdogo Tela*, (5), 42-51 (1983) [in Russian].
- [13] V.V. Lapshin, "Motion Control of Hopping Vehicle in the Flight Phase", *Izv. AN SSSR. Mekhanika Tverdogo Tela*, (1), 159-165 (1984) [in Russian].
- [14] J. Hemami, Y. Zheng, "Dynamics and Control of Motion on the Ground and in the Air with Application to Biped Robot", *J. Robotics Systems*, (1), 101-116 (1984).
- [15] M.H. Raibert, "Legged robots that balance", *Cambridge, Massachusetts: MIT Press* (1986).
- [16] J. Hodgins, M.H. Raibert, "Biped Gymnastics", *Robotics Research: The Fourth International Symposium. Cambridge, Massachusetts: MIT Press*, 5-14 (1987).
- [17] V.V. Lapshin, "Motion Control of a Legged Machine in the Supportless Phase of Hopping", *The Int. J. of Robotics Research*, **10** (4), 327-337 (1991).
- [18] D. Okhotsimsky, A. Platonov, A. Kiril'chenko, V. Lapshin, V. Tolstousova, "Walking Machines",

- [19] V.V. Lapshin, G.P.Kolesnikova, "Time Optimal Control of Two Bundles Bodies about their Center of Mass", *Vestnik MGTU im. N.E.Baumana. Seria "Estestvennye Nauki"*, (4), 20-28 (2007) [in Russian].
- [20] V.V. Lapshin, S.P. Chashnikov, "Control of Hoping Vehicle Orientation in the Supportless Phase with Zero Angular Momentum", *Vestnik MGTU im. N.E.Baumana. Seria "Estestvennye Nauki"*, (1), 55-67 (2011) [in Russian].
- [21] V.V. Lapshin, "Mechanics and Motion Control of Walking Machines", *Moscow, izdatel'stvo MGTU im. N.E.Baumana*, (2012) [in Russian].
- [22] G.K. Borovin, V.V. Lapshin, "Optimal Attitude Control of Two Pivotaly Connected Bodies in the Supportless Phase of Motion", *J. Computers and System Sciences Int.*, **53** (4), 610-622 (2014).

The results were presented at the 16-th International seminar "Mathematical models & modeling in laser-plasma processes & advanced science technologies" (5 - 10 June, 2017, Petrovac, Montenegro).

Received April 17, 2017