УДК 517.977

Глумов В.М., Суханов В.М.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАХВАТА ЦЕЛИ МАНИПУЛЯТОРОМ СВОБОДНОЛЕТАЮЩЕГО КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА

Введение

Наиболее серьезные проблемы управления космическими роботами-манипуляторами (КРМ) возникают при решении задач манипуляционного захвата цели или установки полезного груза в заданную точку инерциального (внешнего) пространства в режиме свободного дрейфа [1]. Задача управления движением концевой точки манипулятора (схвата) в процессе достижения целевой точки в этом режиме является непростой из-за ограниченного подвижного рабочего пространства, в котором осуществляются манипуляционные операции; наличия динамических сингулярностей, нарушающих условия технической управляемости КРМ; траекторной неоднозначности достижения цели; неоднозначности результирующего положения корпуса при одном и том же конечном положении схвата в инерциальном пространстве [2, 3].

Методы управления манипулятором с использованием планирования траектории схвата в применении к свободнолетающим КРМ неработоспособны при наличии внешних сил и моментов, действующих на космический робот, поскольку базируются на принципах разомкнутого (программного) управления. Рассматривается подход к управлению манипулятором свободнолетающего КРМ, реализуемый в классе систем с обратной связью и основанный на оценке отклонения схвата от целевой точки. Предполагается, что источник первичной информации – система технического зрения (СТЗ), которая позволяет определить направление линии визирования на цель и расстояние до нее.

Для обеспечения выполнения операций манипуляционного функционирования, в том числе захвата пассивной цели КРМ необходимо решать следующие основные задачи:

– текущее оценивание координат отклонения схвата от цели по измерениям СТЗ;

– определение и формирование рабочего пространства КМР;

– определение требуемого начального состояния КРМ при сближении с рабочей зоной, содержащей целевую точку.

1. Оценивание координат отклонения схвата от цели

Рассматривается свободнолетающий КРМ, состоящий из корпуса и трехзвенного манипулятора с вращающимися степенями свободы. На корпусе установлена СТЗ, состоящая из шарнирно связанной с корпусом видеокамерой со встроенной в нее лазерным дальномером. Текущая конфигурация механической системы КРМ, обозначение координат и положение точки цели представлены на рис. 1.

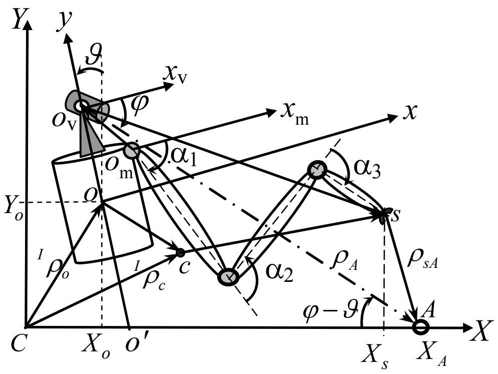

Рис. 1.

Для описания плоского движения КРМ используются системы координат:

– CXY – инерциальная;

– Oxy – связанная с корпусом КРМ;

– O$_m x_m y_m$ – манипулятора, с началом в центре вращения корневого шарнира;

– O$_v x_v y_v$ – подвеса видеокамеры СТЗ. Точка цели обозначена "***A***", "***s***" – концевая точка схвата, "***c***" – центр масс КРМ. Регулируемыми координатами при манипуляционном захвате цели являются отклонения $X_\Delta(t) = X_s(t) - X_A$, $Y_\Delta(t) = Y_s(t) - Y_A$ и скорости их изменения. При определении оценок $\hat{X}_\Delta(t)$, $\hat{Y}_\Delta(t)$ предполагаются измеряемыми угол наклона оптической оси видеокамеры φ, угловое положение корпуса в инерциальной системе координат ϑ и расстояние $|\rho_A| = \overline{\mathrm{O}_v A}$ до цели.

Из геометрических соотношений в соответствии с рис. 1 получены выражения для оценок $\hat{X}_\Delta = \overline{sA}\cos(\angle sAC)$, $\hat{Y}_\Delta = \overline{sA}\sin(\angle sAC)$, где $\overline{sA} = \overline{\mathrm{O}_v s}\dfrac{\sin\gamma}{\sin(\angle sA\mathrm{O}_v)}$,

$\angle sAC = \varphi - \vartheta + \operatorname{arctg}\left(\dfrac{\overline{\mathrm{O}_v s} - \overline{\mathrm{O}_v A}}{\overline{\mathrm{O}_v s} + \overline{\mathrm{O}_v A}}\operatorname{ctg}\dfrac{\gamma}{2}\right) + \dfrac{\pi-\gamma}{2}$, $\gamma = \varphi - \operatorname{arctg}\dfrac{x_s}{y_s + y_{ov}}$, x_s, y_s – координаты точки ***s*** в связанной системе координат, $y_{ov} = \overline{\mathrm{O}_v\mathrm{O}}$.

2. Формирование рабочего пространства

Использование обратной связи при манипуляционном функционировании свободнолетающего КРМ требует определять рабочее пространство (РП) робота с учетом ограниченного диапазона значений углов ориентации относительно направления на цель. Задача определения РП космических манипуляционных роботов рассматривалась в [1].

Для свободнолетающего КРМ целесообразно определять в инерциальном пространстве, заданном системой координат CXY, свободное РП, которое представляет собой ограниченную область (*W*-область), каждая точка которой является манипуляционно достижимой для концевой точки "*s*" без каких-либо требований к ориентации корпуса робота.

Пусть в инерциальном пространстве (рис. 1) при $t(0) = t_0$ заданы начальное положение корпуса КМР $q_0^o = (X_{o0}, Y_{o0}, \vartheta_0)^{\mathrm{T}}$ и начальная конфигурация манипулятора $q_0^\alpha = (\alpha_1^0, \alpha_2^0, \alpha_3^0)^{\mathrm{T}}$, соответствующие моменту t_0 "зависания" робота на предполагаемой границе рабочей зоны. При этом производные $\dot{q}_0^o = 0$ и $\dot{q}_0^\alpha = 0$. Внешние возмущения и управление корпусом отсутствуют. Конечное состояние q_k получается из начального q_0 в результате манипуляционного перевода схвата в предельно удаленное от корневой точки манипулятора О$_m$ положение $q_k^\alpha = (\alpha_1^k, \alpha_2^k = 0, \alpha_3^k = 0)$, соответствующее вытянутому положению манипулятора вдоль произвольно заданного положения (α_1^k) оси первого звена. Предполагается, что подобная процедура реализует максимально возможное перемещение характерной точки "*s*" в инерциальном пространстве из начального положения, определяемого вектором $\rho_{sA0} = (X_{s0}, Y_{s0})$, в конечное положение $\rho_{sAk} = (X_{sk}, Y_{sk})$. В конечном положении манипулятора точка "*s*" принадлежит границе *W*-области, а норма вектора разности $\rho_{a\Delta} = (\rho_{ak} - \rho_{a0})$ может быть принята в качестве ее локального размера.

Для *i*-го фиксированного значения ϑ_0^i существует секторное подпространство W$_i$ рабочей области КРМ, определяемое с помощью w$_1$-границы, образованной конечным множеством точек $s_{kn}, n = 1, 2, ..., N$, построенных для N процессов траекторного перемещения точки "**s**" в инерциальном пространстве при переводе манипулятора из единого начального состояния КМР $q_0 = (q_0^o, q_0^\alpha)$ в состояния $q_k^\alpha = (\alpha_{1n}^k, 0, 0)$.

На рис. 2 приведен пример компьютерного построения секторного РП для $\vartheta_0^i = 0$ в случае последовательного перемещения звеньев вида $(\alpha_1^0 \to \alpha_{1n}^k, \alpha_2^0 \to 0, \alpha_3^0 \to 0)$ при $N = 9$. Внешняя w_1-граница секторного РП, замкнутого двумя траекториями движения концевой точки $\overset{\frown}{s_0 s_{k1}}$ и $\overset{\frown}{s_0 s_{k9}}$, соответствующими левой и правой границам интервала $\left(\alpha_{1\min}^k, \alpha_{1\max}^k\right)$, может быть заменена дугой окружности $\tilde{w}_i$ радиуса $r_{cs_k} = \left|\rho_{cs_0} + \rho_{s\Delta}^{\min}\right|$ с центром в точке $\boldsymbol{c}$, где $\rho_{s\Delta}^{\min}$ – радиус-вектор минимальной длины на множестве из $N = 9$ векторов, связывающих точки $s_{0i} \to s_{kn}$. Множество секторных РП, соответствующих множеству значений ϑ_0^i, $i = \overline{1, M}$, $M = \text{const}$, образуют в инерциальном пространстве полномерную рабочую область КМР, имеющую кольцевую структуру вокруг центра инерции КМР $\boldsymbol{c}$. Пример компьютерного построения W-области для случая 4-х секторов, соответствующих значениям $\vartheta_0^i \in \{0; \pi/2; \pi; 3\pi/2\}$, приведен на рис. 3. Внешняя граница w_2 образована последовательностью конечных положений точек $s_{k\bar{n}}$. РП заполнено множеством сколь угодно близко расположенных друг относительно друга траекторий характерной точки "$\boldsymbol{s}$". Это гарантирует возможность манипуляционной достижимости всех точек сформированной указанным способом рабочей области КМР. Суженное кольцевое подпространство $W_G \subset W$, в котором внешняя граница w_2 заменена окружностью w_G с центром в точке $\boldsymbol{c}$ и с радиусом $r_G = \left|\rho_{a0} + \rho_{a\Delta\min}\right|$, является гарантированным РП.

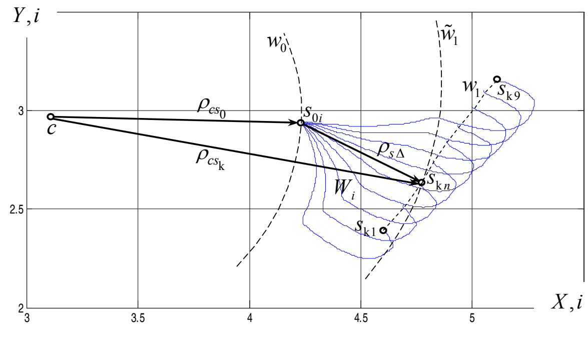

Рис. 2.

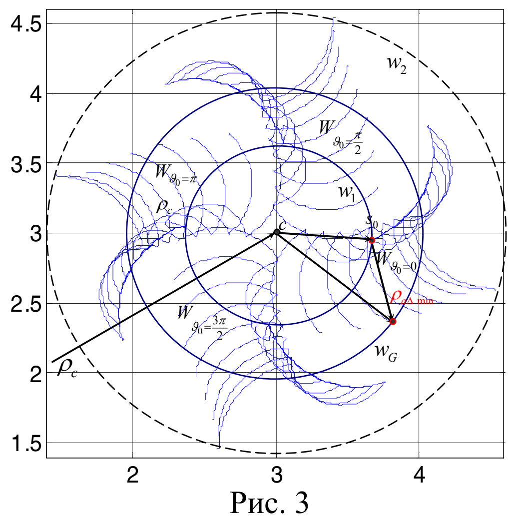

Рис. 3

3. Определение требуемого начального положения КРМ

Для проведения манипуляционных операций КРМ необходимо обеспечить выход робота на границу РП, содержащего целевую точку A, и привести его в начальное положение, гарантирующее манипуляционное достижение цели. Для обеспечения перехода КРМ в требуемое начальное положение необходимо решить две задачи:

– определение расстояния $d^* = \left(\overline{\mathrm{O}_v A}\right)^*$, при котором цель A становится манипуляционно достижимой;

– определение требуемого угла ориентации корпуса $\vartheta_0^i = \vartheta_0^*$, при котором секторное пространство КРМ содержит целевую точку A.

В предположении, что геометрические параметры РП, в том числе радиус r_{cs_k}, оперативно могут быть вычислены, первая задача решается из условия: граница $\tilde{w}_1$ в точке «зависания» КРМ на расстоянии d^* в предельном случае должна проходить через точку A. Этому условию соответствует неравенство

$$\left(X_A - X_c\right)^2 + \left(Y_A - Y_c\right)^2 \le r_{cs_k}^2 .$$

В инерциальной системе CXY имеем

$$X_c = X_o + x_{c0}\cos\vartheta_0 - y_{c0}\sin\vartheta_0,\ Y_c = Y_o + x_{c0}\sin\vartheta_0 + y_{c0}\cos\vartheta_0, \tag{1}$$

где $X_o = X_A + y_v\sin\vartheta_0 - d\,\dfrac{\cos\varphi + \sin(\varphi - \vartheta_0)\sin\vartheta_0}{\cos\vartheta_0}$, $Y_o = d\sin(\varphi - \vartheta_0) - y_v\cos\vartheta_0$, x_{c0}, y_{c0} – координаты точки $\boldsymbol{c}$ в связанной системе координат Оxy.

На основе (1) формируется квадратное уравнение относительно d, решение которого d^* определяет требуемое расстояние от точки «зависания» КРМ до цели $\boldsymbol{A}$.

Оптимальное значение угла ϑ_0^* соответствует минимальному расстоянию от точки s_0 до цели $\boldsymbol{A}$ при d^*. Поскольку изменение угла ϑ_0 осуществляется путем разворота КРМ относительно центра масс $\boldsymbol{c}$, то данное минимальное расстояние возникает при направлении вектора ρ_{cs_0} на целевую точку $\boldsymbol{A}$. Для такого положения КРМ справедливо трансцендентное уравнение относительно угла ϑ_0

$$\frac{Y_A - Y_o - x_{c0}\sin\vartheta_0 - y_{c0}\cos\vartheta_0}{X_A - X_o - x_{c0}\cos\vartheta_0 + y_{c0}\sin\vartheta_0} = \frac{\left(x_{s0} - x_{c0}\right)\sin\vartheta_0 + \left(y_{s0} - y_{c0}\right)\cos\vartheta_0}{\left(x_{s0} - x_{c0}\right)\cos\vartheta_0 - \left(y_{s0} - y_{c0}\right)\sin\vartheta_0}. \tag{2}$$

Уравнение (2) имеет два решения, из которых необходимо выбрать значение ϑ_0^*, обеспечивающее наименьшее начальное отклонение концевой точки манипулятора s_0 от цели $\boldsymbol{A}$:

$$\min_{\vartheta_0}\left\{\left(X_A - X_s(\vartheta_0)\right)^2 + \left(Y_A - Y_s(\vartheta_0)\right)^2\right\} \to \vartheta_0^* .$$

Предварительный разворот свободно летающего КРМ в угловое положение ϑ_0^* обеспечивает нахождение цели $\boldsymbol{A}$ в секторном РП, что позволяет перейти в режим выполнения операций при манипуляционном функционировании робота, в том числе к захвату цели.

Заключение

Предложенные в работе решения задач, обеспечивающие захват цели свободнолетающим КРМ, позволяют реализовать подход к управлению в режиме манипуляционного функционирования на основе систем с обратной связью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-01708).

Библиографический список

1. Dubowsky S. The Kinematics, Dynamics, and Control of Free-Flying and Free-Floating Space Robotic Systems [Текст] / Dubowsky S., Papadopoulos E. // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1993. – V. 9. – No 5. – P. 531-543.

2. Глумов В.М. Техническая управляемость автоматизированного космического модуля [Текст] / Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 3. – С. 31-44.

3. Васильев С.Н. Проблемы управления сложными динамическими объектами авиационной и космической техники: монография [Текст]/ Васильев С.Н. и др.; под ред. акад. РАН С.Н. Васильева. – М.: Машиностроение, – 2015. –519 с.