УДК 681.5

В. Ю. Рутковский, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., rutkov@ipu.ru,
В. М. Суханов, д-р техн. наук, зав. лаб., suhv@ipu.ru,
В. М. Глумов, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., vglum@ipu.ru,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва

К задаче управления маломерным свободнолетающим космическим роботом

Рассматривается возможность использования принципа обратной связи в решении задачи управления свободнолетающим космическим роботом в режиме манипуляционного функционирования. В рамках данного подхода вводится математическая модель космического манипуляционного робота (КМР), содержащая в явном виде координаты отклонения схвата от цели в инерциальном пространстве. Предлагается алгоритм вычисления оценок указанных координат при наличии информации о направлении на цель и расстоянии до нее, получаемой с помощью размещенной на корпусе КМР видеокамеры со встроенным дальномером. Решается задача формирования алгоритма управления манипуляционным захватом цели в инерциальном пространстве. Приводится пример компьютерного моделирования динамики космического робота, подтверждающий работоспособность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: *свободнолетающий космический манипуляционный робот, уравнения движения, алгоритм управления, манипуляционный захват цели, инерциальное пространство*

Введение

Рассматриваемые в работе свободнолетающие космические манипуляционные роботы (КМР) относятся к новому классу маломерных объектов космической техники, предназначенных для выполнения различных работ в открытом космосе, в том числе для сборки больших космических конструкций различного назначения, для технического обслуживания внешних устройств пилотируемых орбитальных станций, для удаления с орбит космического мусора и т. д. [1—3]. Очевидная важность этих приложений привлекла внимание ученых к решению целого ряда проблем, связанных с разработкой теории и методов управления свободнолетающими космическими роботами. Наиболее серьезные проблемы управления КМР возникают при решении задач манипуляционного захвата цели и установки полезного груза в заданную точку инерциального (внешнего) пространства. Особые сложности, не встречающиеся в практике использования наземной робототехники, возникают при управлении манипулятором в режиме свободного дрейфа КМР, т. е. при отключенной в целях экономии расхода рабочего тела системе управления положением корпуса робота. Динамика и кинематика КМР в таком режиме существенно усложняется из-за возмущающего влияния движений манипулятора на положение корпуса, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на поведении рабочего инструмента (схвата) при решении задачи достижения цели. Весьма сложной по сравнению с рассмотрением манипуляторов на неподвижном основании в этом случае оказывается и задача определения рабочего пространства [4].

В большинстве публикаций, рассмотренных в обзорной работе [2], задача управления манипулятором свободно дрейфующего КМР решается на основе концепции планирования траектории схвата в инерциальном пространстве с использованием предложенной в работе [4] обобщенной матрицы Якоби для расчета вектора шарнирных скоростей манипулятора космического робота. Указанный подход к управлению КМР в режиме свободного дрейфа может быть реализован только при отсутствии внешних сил и моментов [1].

В работе [5] был предложен альтернативный (без использования процедуры планирования) подход к управлению КМР в классе систем с обратной связью на основе сигналов об отклонении схвата от цели, получаемых с помощью видеокамеры, размещенной на концевом звене манипулятора. Недостатком такого способа размещения камеры является мешающее влияние собственных движений манипулятора, решающего основную задачу управления, на процессы слежения за целью.

В данной работе рассматривается ряд вопросов, связанных с управлением КМР в классе систем с обратной связью по сигналам отклонения схвата от цели, получаемым с помощью видеокамеры (со встроенным дальномером), размещенной в шарнирном подвесе на корпусе робота. В частности решаются:

- задача формирования математической модели КМР, содержащей в явном виде подлежащие ре-

гулированию координаты отклонения схвата от цели;

- задача построения процедуры вычисления оценок указанных регулируемых координат;
- задача синтеза алгоритма управления КМР в режиме манипуляционного захвата цели.

1. Системы координат и уравнения движения

Для простоты изложения рассматривается модель плоского движения свободнолетающего КМР, состоящего из несущего тела (корпуса), снабженного собственной системой управления поступательным и угловым движениями, и трехзвенного манипулятора с вращающимися степенями свободы (рис. 1).

Предполагается, что источником информации о местонахождении цели и расстоянии до нее является система технического зрения (СТЗ), состоящая из шарнирно связанной с корпусом видеокамеры со встроенным в нее лазерным дальномером.

Для описания движения КМР введем следующие системы координат (СК): Σ_I — инерциальная СК *CXY*, условно называемая инерциальным (внешним по отношению к КМР) пространством; Σ_o — связанная с корпусом КМР СК *oxy* с началом в центре масс корпуса; СК манипулятора $o_{\text{м}}x_{\text{м}}y_{\text{м}}$ с началом в корневой точке манипулятора; СК подвеса видеокамеры СТЗ $o_v x_v y_v$. Оси последних двух СК параллельны соответствующим осям связанной СК Σ_o.

Обозначим: $q = (q^o, q^\alpha)^{\text{т}}$ — вектор обобщенных координат КМР, где $q^o = (q_1, q_2, q_3)^{\text{т}} \doteq (X_o, Y_o, \vartheta)^{\text{т}}$ — подвектор координат, задающих положение несущего тела в инерциальной СК Σ_I; $q^\alpha = (q_4, q_5, q_6)^{\text{т}} \doteq$ $\doteq (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)^{\text{т}}$ — подвектор координат (межзвенные углы), определяющих конфигурацию манипулятора в связанной с корпусом СК *oxy* (Σ_o).

Кроме того, на рис. 1 обозначено: ${}^I\rho_o = (X_o, Y_o)$ — радиус-вектор центра масс корпуса КМР, определенный в СК Σ_I; ${}^I\rho_c = (X_c, Y_c)$, ${}^o\rho_c = (x_c, y_c)$ — радиус-векторы центра масс КМР (точки *c*), определенные в Σ_I и Σ_o соответственно; ρ_A — вектор визирования цели, ρ_{sA} — вектор отклонения схвата от цели; X_s, Y_s — координаты концевой точки "*s*" манипулятора (схвата), определенные в СК Σ_I. Положительным направлением вращения *i*-го звена считаем его угловое отклонение против часовой стрелки по отношению к продольной оси $(i-1)$-го звена; X_A, Y_A — координаты точки цели *A* в Σ_I; ϑ — угловое положение корпуса в Σ_I; φ — угол наклона оптической оси видеокамеры в СК $o_v x_v y_v$.

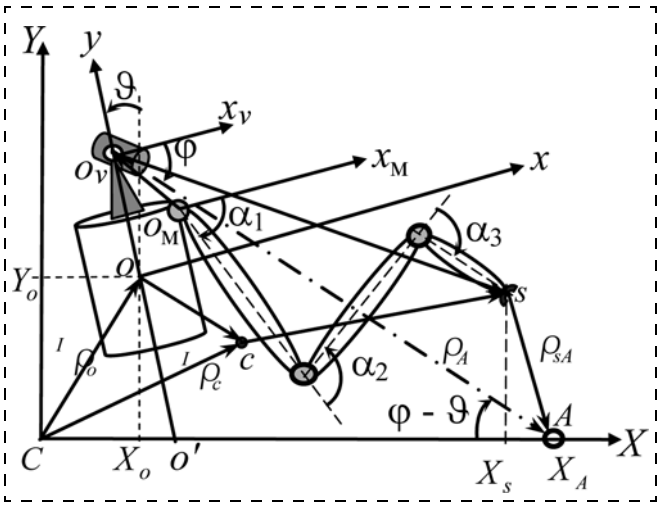

Рис. 1. Текущая конфигурация КМР в режиме захвата цели

Полученная в работе [6] на основе уравнений Лагранжа второго рода математическая модель плоского движения КМР в векторно-матричной форме имеет вид

$$\begin{bmatrix} A_0(q) & A_{0\alpha}(q) \\ A_{0\alpha}^{\text{т}}(q) & A_\alpha(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}^o \\ \ddot{q}^\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_0(q, \dot{q}) \\ B_\alpha(q, \dot{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^0 + M^f \\ M^\alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где A_0, A_α, $A_{0\alpha}$ — матрицы переменных коэффициентов $a_{ij}(q)$, $(i, j = \overline{1, 6})$, зависящих от масс и моментов инерции корпуса и звеньев манипулятора с изменяющейся во времени конфигурацией; B_0, B_α — нелинейные вектор-функции, компоненты которых содержат произведения пар обобщенных скоростей с коэффициентами b_{ij}^k, $k = \overline{1, 6}$, также зависящими от текущего распределения масс КМР. Коэффициенты $a_{ij}(q)$ и $b_{ij}^k(q)$ определены в работе [6]. M^0, M^f — векторы управляющих и возмущающих сил и моментов, приложенных к корпусу КМР; M^α — вектор шарнирных моментов манипулятора.

Учитывая, что регулируемыми координатами при манипуляционном захвате цели являются отклонения $X_\Delta = X_s(t) - X_A$ и $Y_\Delta = Y_s(t) - Y_A$ координат схвата (концевой точки манипулятора *s*) от координат цели и скорости их изменения $\dot{X}_\Delta = \dot{X}_s(t)$, $\dot{Y}_\Delta = \dot{Y}_s(t)$, перейдем от модели (1) к новой модели движения КМР относительно переменных X_Δ, Y_Δ. Для этого в модели (1) надо перейти от вектора $q^o = (X_o, Y_o, \vartheta)^{\text{т}}$ к вектору $q^\Delta = (X_\Delta, Y_\Delta, \vartheta)^{\text{т}}$.

Для перехода от q^o к q^Δ необходимо получить соотношения, связывающие координаты X_o с X_Δ и Y_o с Y_Δ. Перенесем начало инерциальной системы координат *CXY* из точки *C* в точку *A*, соответствующую заданному положению неподвижной цели, т. е. в режиме манипуляционного сближения будем предполагать перевод концевой точки груза в начало координат новой инерциальной системы *AXY*. С учетом этого получим $X_\Delta = -X_s$, $Y_\Delta = -Y_s$, где координаты концевой точки *s* в новой инерциальной СК записываются в виде

$$X_s = X_o + x_s C\vartheta - y_s S\vartheta, \; Y_s = Y_o + x_s S\vartheta + y_s C\vartheta. \quad (2)$$

Отсюда

$$X_o = -x_s C\vartheta + y_s S\vartheta - X_\Delta, \; Y_o = -x_s S\vartheta - y_s C\vartheta - Y_\Delta, \quad (3)$$

где координаты x_s, y_s точки s в связанной СК определяются выражениями

$$x_s = x_м + \sum_{i=1}^{3} l_i C\alpha_{1-i},\ y_s = y_м + \sum_{i=1}^{3} l_i S\alpha_{1-i}. \quad (4)$$

Здесь и далее используется следующие сокращенные обозначения:

$$\alpha_{k-n} = \sum_{i=k}^{n} \alpha_i,\ k < n,$$

$$S\alpha_{1-i} = \sin\alpha_{1-i},\ C\alpha_{1-i} = \cos\alpha_{1-i}.$$

Подставляя (4) в (3), имеем

$$\begin{aligned} X_o &= -X_\Delta - \left(x_м + \sum_{i=1}^{3} l_i C\alpha_{1-i}\right) C\vartheta + \\ &+ \left(y_м + \sum_{i=1}^{3} l_i S\alpha_{1-i}\right) S\vartheta; \\ Y_o &= -Y_\Delta - \left(x_м + \sum_{i=1}^{3} l_i C\alpha_{1-i}\right) S\vartheta - \\ &- \left(y_м + \sum_{i=1}^{3} l_i S\alpha_{1-i}\right) C\vartheta. \end{aligned} \quad (5)$$

Используя (5), получаем выражения для $\ddot{X}_o$ и $\ddot{Y}_o$ в исходной модели (1):

$$\begin{aligned} \ddot{X}_o &= -\ddot{X}_\Delta + \sum_{i=1}^{3}\left\{\ddot{\alpha}_i\left[\sum_{j=1}^{3} l_j S(\vartheta + \alpha_{1-j})\right]\right\} + \\ &+ \ddot{\vartheta}\left[x_м S\vartheta + y_м C\vartheta + \sum_{i=1}^{3} l_i S(\vartheta + \alpha_{1-i})\right] + \\ &+ \dot{\vartheta}^2\left[x_м C\vartheta - y_м S\vartheta + \sum_{i=1}^{3} l_i C(\vartheta + \alpha_{1-i})\right] + \\ &+ 2\dot{\vartheta}\sum_{i=1}^{3} l_i \dot{\alpha}_{1-i} C(\vartheta + \alpha_{1-i}) + \\ &+ \sum_{i=1}^{3} l_i[(\dot{\alpha}_{1-i})^2 C(\vartheta + \alpha_{1-i})]; \\ \ddot{Y}_o &= -\ddot{Y}_\Delta - \sum_{i=1}^{3}\left\{\ddot{\alpha}_i\left[\sum_{j=1}^{3} l_j C(\vartheta + \alpha_{1-j})\right]\right\} - \\ &- \ddot{\vartheta}\left[x_м C\vartheta - y_м S\vartheta + \sum_{i=1}^{3} l_i C(\vartheta + \alpha_{1-i})\right] + \\ &+ \dot{\vartheta}^2\left[x_м S\vartheta + y_м C\vartheta + \sum_{i=1}^{3} l_i C(\vartheta + \alpha_{1-i})\right] + \\ &+ 2\dot{\vartheta}\sum_{i=1}^{3} l_i \dot{\alpha}_{1-i} S(\vartheta + \alpha_{1-i}) + \\ &+ \sum_{i=1}^{3} l_i[(\dot{\alpha}_{1-i})^2 S(\vartheta + \alpha_{1-i})]. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя выражения (6) в уравнения (1) и переходя от вектора $q = (q^0, q^\alpha)^т$ к вектору $\tilde{q} = (q^\Delta, q^\alpha)^т$, после несложных, хотя и громоздких, преобразований получим модифицированную модель движения КМР, содержащую в явном виде вторые производные регулируемых координат X_Δ и Y_Δ. Полученная модель в векторно-матричной форме может быть записана в виде

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_0(\tilde{q}) & \tilde{A}_{0\alpha}(\tilde{q}) \\ \tilde{A}_{0\alpha}^т(\tilde{q}) & \tilde{A}_\alpha(\tilde{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}^\Delta \\ \ddot{q}^\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{B}_0(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}) \\ \tilde{B}_\alpha(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^0 + M^f \\ M^\alpha \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Модифицированная модель (7) структурно идентична исходной модели (1), отличаясь тем, что вместо вектора $q^0 = (X_o, Y_o, \vartheta)^т$ введен вектор $q^\Delta = (X_\Delta, Y_\Delta, \vartheta)^т$. При этом полный вектор $q = (q^0, q^\alpha)^т$ заменяется на вектор $\tilde{q} = (q^\Delta, q^\alpha)^т$. Соотношения для вычисления элементов $\tilde{a}_{ij}$, $i, j = \overline{1, 6}$, матрицы $\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_0 & \tilde{A}_{0\alpha} \\ \tilde{A}_{0\alpha}^т & \tilde{A}_\alpha \end{bmatrix}$ новой модели (7) и векторов $\tilde{B}_0(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}})$, $\tilde{B}_\alpha(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}})$ приведены в работе [7].

2. Определение оценок координат отклонения схвата от цели по измерениям СТЗ, установленной на корпусе КМР

Для определения оценок $\hat{X}_\Delta$, $\hat{Y}_\Delta$ координат отклонения схвата от цели X_Δ, Y_Δ введем в рассмотрение вытекающую из рис. 1 вспомогательную геометрию, представленную на рис. 2.

Углы φ, ϑ и расстояние $|\rho_A| = \overline{o_v A}$ до цели измеряются.

Введем дополнительно углы γ, ϕ (рис. 2). Очевидно, справедливо соотношение

$$\varphi + \phi - \gamma = \frac{\pi}{2}, \quad (8)$$

в котором необходимо найти выражения для определения углов ϕ, γ.

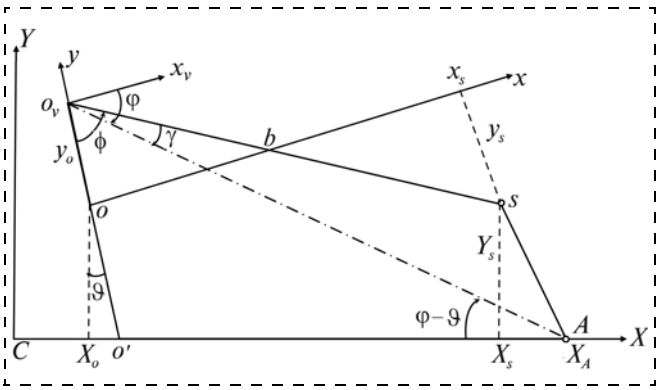

Рис. 2. Вспомогательная геометрия

Из подобия треугольников $\Delta o_v ob \sim \Delta s x_s b$ следует

$$\frac{|y_s|}{|y_{ov}|} = \frac{\overline{x_s b}}{|x_s| - \overline{x_s b}} = \frac{\overline{ab}}{\overline{o_v b}}, \qquad (9)$$

где $\overline{x_s b}$, $\overline{sb}$, $\overline{o_v b}$ — принятые обозначения сторон треугольников (как отрезков прямых), $y_{ov} \equiv \overline{oo_v}$, x_s, y_s — координаты схвата в связанной СК Σ_o, $x_s = x_{o_1} + \sum_{j=1}^{3}\left[l_j \cos\left(\sum_{i=1}^{j}\alpha_i\right)\right]$, $y_s = y_{o_1} + \sum_{j=1}^{3}\left[l_j \sin\left(\sum_{i=1}^{j}\alpha_i\right)\right]$, l_j, (j = 1, 2, 3) — длины звеньев манипулятора; $\alpha_i = \alpha_i(t)$, i = 1, 2, 3, — межзвенные углы.

Из (9) следует

$$\overline{x_s b} = \frac{|x_s y_s|}{|y_s| + |y_{ov}|}. \qquad (10)$$

Поскольку $\mathrm{tg}\phi = \frac{\overline{x_s b}}{|y_s|}$, то с учетом (10) найдем

$$\phi = \mathrm{arctg}\frac{|x_s|}{|y_s| + |y_{ov}|}. \qquad (11)$$

Учитывая (11), получим

$$|\rho_s| = \overline{o_v s} = \frac{x_s}{\sin\phi} = \sqrt{x_s^2 + (y_s + y_{ov})^2} \qquad (12)$$

и, используя (8), найдем

$$\gamma = \varphi - \mathrm{arcctg}\frac{|x_s|}{|y_s| + |y_{ov}|}. \qquad (13)$$

Для треугольника $\Delta o_v sA$ справедливы выражения для угла

$$\angle sAo_v = \mathrm{arctg}\left(\frac{\overline{o_v s} - \overline{o_v A}}{\overline{o_v s} + \overline{o_v A}}\mathrm{ctg}\frac{\gamma}{2}\right) + \frac{\pi - \gamma}{2} \qquad (14)$$

и расстояния от точки "s" до цели A

$$\overline{sA} = |\rho_{sA}| = \frac{\overline{o_v s}\sin\gamma}{\sin(\angle sAo_v)}. \qquad (15)$$

В соответствии с рис. 2 имеем

$$\angle sAC = \varphi - \vartheta + \angle sAo_v. \qquad (16)$$

Выражения (14)—(16) позволяют вычислять оценки координат отклонения точки "s" от целевой точки A:

$$\begin{aligned} \hat{X}_\Delta &= X_s - X_A = \overline{sA}\cos(\angle sAC), \\ \hat{Y}_\Delta &= Y_s - Y_A = \overline{sA}\sin(\angle sAC). \end{aligned} \qquad (17)$$

3. Алгоритм случайного поиска в режиме захвата цели

В работе [8] были решены три задачи, предваряющие возможность перехода КМР в рассматриваемый ниже режим манипуляционного захвата цели в инерциальном пространстве Σ_I:

1) предложен вычислительный алгоритм оперативного построения секторного рабочего пространства КМР, зависящего от исходной конфигурации манипулятора q_0^α и текущего распределения масс системы (с учетом массы переносимого груза);

2) определено расстояние $d^* = \overline{o_v A^*}$, при котором цель A становится манипуляционно достижимой для КМР;

3) определено требуемое значение начальной ориентации КМР ϑ_0^*, при котором заранее построенное секторное рабочее пространство "накроет" целевую точку A.

Полагая указанные задачи решенными, рассмотрим далее задачу формирования алгоритма управления КМР, динамика которого описывается уравнениями (7), при манипуляционном захвате цели с использованием оперативно вычисляемых по формулам (11)—(17) оценок координат отклонения $\hat{X}_\Delta$, $\hat{Y}_\Delta$ концевой точки "s" от целевой точки A.

Пусть КМР, снабженный шарнирно связанной с корпусом видеокамерой, ориентированной на целевую точку A (см. рис. 1), завис в окрестности цели на расстоянии $d^* = \overline{o_v A}$, измеряемом встроенным в видеокамеру дальномером. Конфигурация q_0^α, текущее распределение масс КМР с грузом известны. Требуемая начальная ориентация корпуса ϑ_0^* выполнена с помощью системы управления движением КМР (поступательным и угловым), которая в режиме захвата цели отключается, и дальнейшие движения КМР определяются только действием шарнирных моментов $M_{\alpha r}$. При этом изменяются не только межзвенные углы q^α, но, как следствие, и компоненты вектора q^Δ, из которых в нашем случае X_Δ, Y_Δ являются регулируемыми координатами.

Напомним, что в отличие от известных методов управления космическими роботами, основанных на планировании траектории схвата [1—4], мы будем решать задачу манипуляционного захвата неподвижной цели в заданной точке инерциального пространства на основе принципов управления в классе систем с обратной связью.

В режиме манипуляционной установки груза в заданную точку $A(X_A, Y_A)$ начальное состояние КМР определим в виде

$$q_0^\Delta = (X_{\Delta 0}, Y_{\Delta 0}, \vartheta_0^*),\ q_0^\alpha = (\alpha_1^0, \alpha_2^0, \alpha_3^0),\ \dot{\tilde{q}}_0 = 0.$$

При этом считается, что в начальный момент времени оптическая ось камеры ориентирована на цель. Это позволяет измерять текущее расстояние от камеры до цели с помощью встроенного в видео-

камеру дальномера. Чтобы в процессе управления цель A оставалась в поле зрения видеокамеры, должно быть регулируемым и угловое отклонение оптической оси от цели $\varphi_\Delta = (\varphi - \varphi^*)$, где φ^* — угловое положение камеры, при котором линия визирования СТЗ для заданного начального состояния вектора q_0^Δ проходит через целевую точку. Ошибка φ_Δ может быть определена (измерена) как величина снижения уровня выходного сигнала СТЗ $u_{\text{СТЗ}}(\varphi_\Delta) = f(\varphi_\Delta^{-1})$ при отклонении оси видеокамеры от направления на цель.

Пусть измеряемыми координатами в рассматриваемом режиме манипуляционного функционирования являются:

$$\vartheta,\ r_{sA} = |\rho_{sA}|,\ \varphi,\ \alpha_r,\ \dot{\alpha}_r\ (r = 1, 2, 3).$$

Цель управления определим в виде следующих трех подзадач, в комплексе решающих задачу захвата цели A в инерциальном пространстве:

- задача непрерывности слежения за целью

$$\varphi_\Delta = (\varphi - \varphi^*) \to 0\ \forall t \leqslant t_k; \qquad (18.1)$$

- задача достижимости цели

$$|X_\Delta(t_k)| \leqslant \varepsilon_X,\ |Y_\Delta(t_k)| \leqslant \varepsilon_Y; \qquad (18.2)$$

- задача обеспечения безударного ("мягкого") захвата цели

$$\dot{X}_\Delta(t_k) \approx 0,\ \dot{Y}_\Delta(t_k) \approx 0, \qquad (18.3)$$

где t_k — время выполнения операции, $\varepsilon_X, \varepsilon_Y = \text{const}$ — малые постоянные.

Для решения указанного комплекса задач введем раздельное управление движениями схвата, приняв, что регулирующим воздействием на координату X_Δ является шарнирный момент $M_{\alpha 1}$, вызывающий изменение угла α_1. Координата Y_Δ управляется шарнирным моментом $M_{\alpha 2}$, изменяющим α_2. Управление ориентацией схвата в задаче захвата цели считаем отсутствующим, т. е. $M_{\alpha 3} = 0$ ($\alpha_3 = \text{const}$).

Задача (18.1), связанная с организацией процесса слежения за целью шарнирно связанной с корпусом КМР видеокамеры, является вспомогательной, однако ее решение необходимо для осуществления текущих измерений расстояния $r_{sA} = |\rho_{sA}|$ до целевой точки A. Эти измерения участвуют далее в вычислении по формулам (11)—(17) оценок $\hat{X}_\Delta$ и $\hat{Y}_\Delta$, управляющих приводами плечевого (α_1) и локтевого (α_2) шарниров при решении основной задачи (18.2). Процесс слежения за целью осуществляется с помощью подсистемы управления приводом подвеса камеры на основе использования PD-алгоритма в цепи обратной связи по координате $\varphi_\Delta(t)$, моделирующей сигнал отклонения оси чувствительности видеокамеры от направления на цель.

В качестве возможного пути для решения задачи (18.2), связанной с управлением поступательным движением схвата (X_Δ, Y_Δ), предлагается использовать модификацию известного алгоритма случайного поиска с возвратом [9], работоспособность которого обеспечивается благодаря удержанию только удачных случайных шагов управления $\Delta q^s_{r(n)} < 0$, уменьшающих отклонение концевой точки s от цели. Неудачные шаги ($q^s_{r(n)} \geqslant 0$) исправляются за счет изменения знака воздействия на очередном шаге управления. Введенная здесь оценка $\Delta q^s_{r(n)}$, определяющая характер изменения регулируемых координат $X_{\Delta n}$, $Y_{\Delta n}$ на n-м шаге управления, имеет вид

$$\Delta q^s_{r,n} = |q^\Delta_r(t^r_2)_n| - |q^\Delta_r(t^r_1)_n|,\ r = 1, 2;\ n = 1, 2, \ldots . \qquad (19)$$

Управление шарнирными углами осуществляется на интервалах управления T^r_n, длительность которых пропорциональна модулям значений регулируемых координат $q^\Delta_1 \doteq X_\Delta$, $q^\Delta_2 \doteq Y_\Delta$ в начале n-го интервала управления, т. е.

$$T^r_n = (t^r_2 - t^r_1)_n = k_r|q^\Delta_r(t^r_1)_n|,\ r = 1, 2. \qquad (20)$$

Рекуррентная формула алгоритма по каждому из двух локальных каналов управления может быть записана в виде

$$\begin{aligned} &u^r_{n+1} = \xi^r_{n+1}\,\bar{u}^r\ \ \forall t \in T^r_{n+1}, \\ &\xi^r_{n+1} = \begin{cases} 1\ \forall\ \Delta q^s_{r,n} < 0, \\ -1\ \forall\ \Delta q^s_{r,n} \geqslant 0, \end{cases} \\ &r = 1, 2;\ n = 1, 2, \ldots, \end{aligned} \qquad (21)$$

где ξ^r_{n+1} — знак постоянного по уровню управляющего напряжения $\bar{u}^r$ на входе r-го привода манипулятора на (n + 1)-м интервале управления; оценка $\Delta q^s_{r,n}$ контролирует характер изменения регулируемой координаты на предыдущем шаге управления.

Следует заметить, что в алгоритме (21) оператор случайного шага ξ^r_{n+1} является случайным событием (в смысле выбора одного из значений (+1, −1)) преимущественно на первом шаге управления, совершаемом в качестве пробного движения ($n = 0$). По этой причине значение первого шага выбирается относительно небольшим $T^r_1 = T^r_{\min}$, соответствуя постоянному шагу $T^r_{\min} = \text{const}$, принятому для области малых отклонений от цели ε_1, определенной в виде ($\varepsilon_2 < |q^s_r| \leqslant \varepsilon_1$), где ε_2 — граница области безударного захвата цели. На втором и последующих шагах T^r_n, определяемых выражением (20), знак управляющего напряжения устанавливается правилом, приведенным во второй части алгоритма (21), в соответствии с которым при правильном выборе знака $\xi_n = (+1, -1)$ на n-м шаге управления этот знак должен быть сохранен и на (n + 1)-м шаге. Правильность выбора знака ξ_n оценивается по результату $\Delta q^s_{r,n} < 0$.

Алгоритм управления в области ($\varepsilon_2 < |q^s_r| \leqslant \varepsilon_1$) условно назовем u^r_ε, напомнив, что он не отличается от алгоритма (21) за исключением функции

определения текущего интервала управления (20), принимающего в указанной области вид

$$T_n^r = T_{\min}^r = \text{const}.$$

В целом решение задачи (18.2) может быть осуществлено путем попеременной ($r = 1 \vee 2$) или одновременной ($r = 1$ & 2) активации подсистем управления сближением. В обоих случаях алгоритм, определяемый выражениями (21), сохраняет работоспособность, однако для решения задачи безударной встречи (18.3) область его действия в процессе сближения с целью A должна быть ограничена моментом вхождения в малую ε_2-окрестность, определенную в виде ($|X_\Delta|, |Y_\Delta| \leqslant \varepsilon_2$, $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$) и содержащую точку A. В ε_2-окрестности исходный алгоритм (21) должен быть заменен на такой закон управления u_{ε_2} (например, ПД алгоритм [5]), который способен обеспечить монотонный характер изменения регулируемых координат X_Δ, Y_Δ при $\dot{X}_\Delta$, $\dot{Y}_\Delta \to 0$ в завершающей фазе сближения с целью.

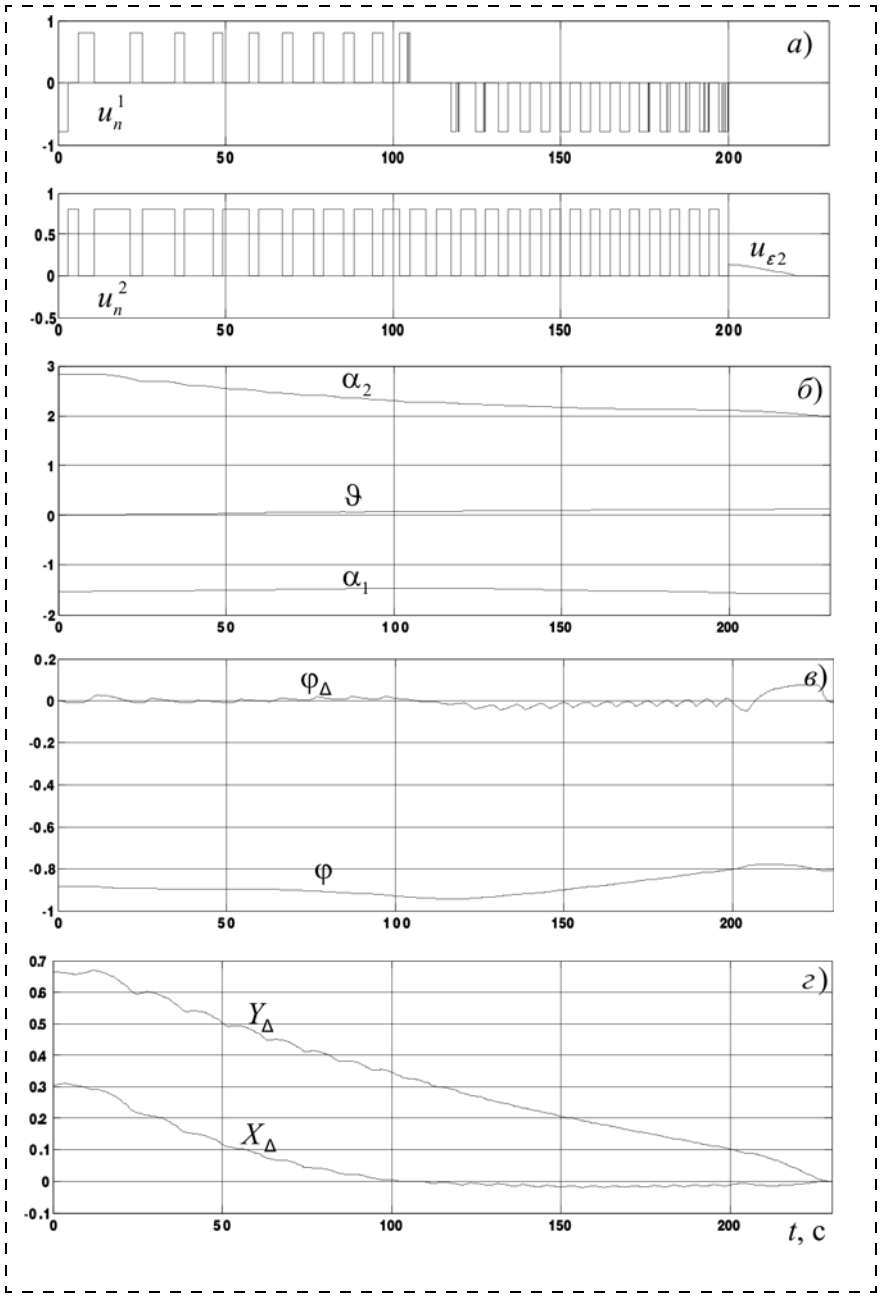

Рис. 3. Управляющие сигналы и переходные процессы в режиме манипуляционного функционирования КМР при использовании алгоритма случайного поиска

Параметры модели КМР

m_i, кг, $i = \overline{0, 4}$	J_i, кг · м^2, $i = \overline{0, 4}$	l_i, кг, $i = \overline{0, 3}$	r_{ci}, м, $i = \overline{1, 3}$	($x_м$, $y_м$), м, $i = 0$
[500;15; 10; 5;10]	[90;2; 0,8; 0,1;0,0]	[1,2; 1,0; 0,4]	[0,7; 0,6; 0,2;]	[0,4; 0,6]

4. Пример компьютерной реализации предложенного подхода к управлению КМР

На рис. 3 приведен пример компьютерной реализации в системе MATLAB-Simulink предложенного подхода к управлению КМР в режиме манипуляционной установки груза для случая попеременной работы подсистем управления плечевым (α_1) и кистевым (α_2) шарнирами. В качестве математической модели объекта были использованы уравнения (7).

Числовые значения основных параметров модели КМР, необходимые для расчета коэффициентов матриц $\tilde{A}_0$, $\tilde{A}_\alpha$, $\tilde{A}_{0\alpha}$ и нелинейных функций $\tilde{B}_0$, $\tilde{B}_\alpha$ (см. работы [6, 7]) в уравнениях (7), представлены в таблице; $X_{\Delta 0} = 0{,}31$ м, $Y_{\Delta 0} = 0{,}67$ м; ϑ_0, $\dot{\vartheta}_0 = 0$. Начальная конфигурация манипулятора q_0^α определена значениями ($\alpha_1^0 = -1{,}5$ рад; $\alpha_2^0 = 2{,}8$ рад; $\alpha_3^0 = -1{,}5$ рад).

Из осциллограмм видно, что управляемые в соответствии с алгоритмами u_n^r, u_{ε_1} и u_{ε_2} (рис. 3, *а*) перемещения звеньев (α_1, α_2) (рис. 3, *б*) обеспечивают перевод характерной точки "*а*" груза из начального положения $X_\Delta(t_0) = 0{,}3$ м, $Y_\Delta(t_0) = 0{,}67$ м в малую окрестность целевой точкой A ($\varepsilon_2 \leqslant 0{,}1$ м) за время $t_{\varepsilon_2} = 200$ с (рис. 3, *г*). При этом ПД алгоритм

управления приводом подвеса камеры с достаточной точностью ($\varphi_\Delta \leqslant 0{,}05$) поддерживает требуемое направление оптической оси видеокамеры на целевую точку (рис. 3, *в*), позволяющее встроенному в нее дальномеру измерять текущее расстояние до цели и вычислять оценки регулируемых координат X_Δ, Y_Δ, используемые в алгоритмах управления (21) и u_{ε_1}.

На завершающем участке моделирования, начиная с момента $t_{\varepsilon_2} = 200$ с, реализован процесс "мягкой" стыковки груза с целью (рис. 3, *а*, *г*), осуществленный с помощью адаптивного ПД алгоритма u_{ε_2}, описанного в работе [5].

Заключение

Решена конкретная задача, связанная с разработкой нового (без использования известной процедуры планирования траектории схвата) подхода к управлению свободнолетающим космическим роботом в режиме манипуляционного функционирования в инерциальном пространстве. Представляется, что разработанная процедура вычисления оценок координат отклонения схвата манипулятора от цели должна позволить практически реализовать предложенный в работе поисковый алгоритм управления манипулятором КМР в классе систем с обратной связью, использующей сигналы размещенной на корпусе робота видеокамеры со встроенным дальномером.

Полученные в работе результаты носят достаточно локальный характер, что пока затрудняет осуществление углубленного сравнения с результатами применения традиционного подхода к проблеме управления свободнолетающими КМР на основе процедуры планирования траектории схвата.

Дальнейшее развитие предложенного в работе подхода к управлению КМР в классе систем с обратной связью заключается в постановке и решении задач формирования алгоритмов, обеспечивающих работоспособность и требуемое качество функционирования КМР при наличии внешних возмущений и плохой определенности модели объекта.

Список литературы

1. **Dubowsky S., Papadopoulos E.** The Kinematics, Dynamics, and Control of Free-Flying and Free-Floating Space Robotic Systems // IEEE Transact. Robot. Automat. 1993. V. 9. № 5. P. 531—543.
2. **Moosavian S. Ali A., Papadopoulos E.** Free-flying Robots in Space: an Overview of Dynamics Modeling, Planning and Control // J. Robotica. 2007. N. 25 (5). P. 537—547.
3. **Xu W. F., Liu Yu., Liang B.** et al. Autonomous Path Planning and Experiment Study of Free-floating Space Robot for Target Capturing // J. Intell. Robot. Syst. 2008. N. 51. P. 303—331.
4. **Umetani Y., Yoshida K.** Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix // IEEE Trans. Robot. Automat. 1989. N. 5 (3). P. 303—314.
5. **Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М.** Некоторые вопросы управления свободнолетающим космическим манипуляционным роботом // Автоматика и Телемеханика. 2013. № 11. С. 62—83.
6. **Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М.** Уравнения движения и управление свободнолетающим космическим манипуляционным роботом в режиме реконфигурации // Автоматика и Телемеханика. 2010. № 1. С. 80—98.
7. **Силаев А. В., Суханов В. М.** Математическая модель свободнолетающего космического робота в режиме манипуляционного функционирования во внешнем пространстве // Матер. конф. "Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах" (УТЭОСС—2012). СПб.: ОАО "Концерн ЦНИИ "Электроприбор", 2012. С. 806—809.
8. **Суханов В. М., Рутковский В. Ю., Глумов В. М.** Определение рабочей зоны и требуемого начального положения свободнолетающего космического робота при захвате цели // Автоматика и Телемеханика. 2014. № 11. С. 150—159.
9. **Справочник** по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.

On a Small Free-Flying Space Robot Control Task

V. Yu. Rutkovsky, rutkov@ipu.ru, **V. M. Sukhanov,** suhv@ipu.ru, **V. M. Glumov,** vglum@ipu.ru,
Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 117997, Moscow, Russian Federation

Date received: 19.11.14

The authors discuss a possibility of application of the feedback principle for the task of control of a free-flying space handling robot (SHR) in the mode of handling operation. They propose a robot consisting of the main body (case), which has the control system by rotation and translational movement, and the three-links manipulator with rotation degree of freedom for each link. The SHR is expected to have a system of technical vision for obtaining information about the location of the target and the distance to it. The mathematical model of the space handling robot is introduced. For simplicity reasons the plane motion of the SHR is considered. The model has the coordinates of a grip deflection from a target in the inertial space in an explicit form. An algorithm is proposed for estimation of the coordinates with account of the information about the direction of the target and the distance to it. This information is obtained with the use of the range finder built in the video camera which is placed on the SHR case. The task of the control algorithm formation by the target capture in the inertial space is solved. The control task is determined as the solution of the three subtasks: 1) continuous target tracking, 2) accessibility of the target and 3) guarantee of soft-docking. The first subtask is an auxiliary one. But its solution is necessary for realization of measurements of the distance between the grip and the target. As a way to solve the second subtask the authors suggest a modification of the well-known random search with a return algorithm. Its efficiency is guaranteed by taking into account only the successful random steps of control which decrease the distance to the target. For soft docking (subtask 3) the area of the suggested algorithm must be restricted by the time moment when the SHR enters the small area which includes point A (target). An example of the free-flying space robot dynamics computer simulation is presented, which proves the efficiency of the proposed algorithm.

Keywords: *free-flying space handling robot, equation of motion control algorithm, manipulation takeover target, inertial space*

For citation:

Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M. On a Small Free-Flying Space Robot Control Task, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 159—166.*

DOI: 10.17587/mau.16.159-166

References

1. **Dubowsky S., Papadopoulos E.** The Kinematics, Dynamics, and Control of Free-Flying and Free-Floating Space Robotic Systems, *IEEE Transact. Robot. Automat.,* 1993, vol. 9, no. 5, pp. 531—543.
2. **Moosavian S. Ali A., Papadopoulos E.** Free-flying Robots in Space: an Overview of Dynamics Modeling, Planning and Control, *J. Robotica, 2007*, no. 25 (5), pp. 537—547.
3. **Xu W. F., Liu Yu., Liang B., Yangsheng Xu, Wenyi Qiang.** Autonomous Path Planning and Experiment Study of Free-floating Space Robot for Target Capturing, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2008, no. 51, p. 303—331.
4. **Umetani Y., Yoshida K.** Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix, *IEEE Trans. Robot. Automat.,* 1989, no. 5 (3), pp. 303—314.
5. **Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M.** Nekotorye voprosy upravlenija svobodnoletajushhim kosmicheskim manipuljacionnym robotom, *Avtomatika i Telemehanika,* 2013, no. 11, pp. 62—83 (in Russian).
6. **Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M.** Uravnenija dvizhenija i upravlenie svobodnoletajushhim kosmicheskim manipuljacionnym robotom v rezhime rekonfiguracii, *Avtomatika i Telemehanika,* 2010, no. 1, pp. 80—98 (in Russian).
7. **Silaev A. V., Sukhanov V. M.** Matematicheskaja model' svobodnoletajushhego kosmicheskogo robota v rezhime manipuljacionnogo funkcionirovanija vo vneshnem prostranstve, *Materialy konferencii "Upravlenie v tehnicheskih, jergaticheskih, organizacionnyh i setevyh sistemah" (UTJeOSS-2012),* Saint Peterburg, OAO "Koncern CNII "Jelektropribor", 2012, pp. 806—809 (in Russian).
8. **Sukhanov V. M., Rutkovsky V. Yu., Glumov V. M.** Opredelenie rabochej zony i trebuemogo nachal'nogo polozhenija svobodnoletajushhego kosmicheskogo robota pri zahvate celi, *Avtomatika i Telemehanika,* 2014, no. 11, pp. 150—159 (in Russian).
9. **Krasovskyi A. A.** *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija* (Handbook of automatic control theory), Moscow, Nauka, 1987, 712 p. (in Russian).

Corresponding author:

Sukhanov Victor M., Leading Resercher, Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 117997, Moscow, Russian, suhv@ipu.ru

---

УДК 621.86

В. Г. Градецкий[1], гл. науч. сотр., д-р тех. наук, проф., gradet@ipmnet.ru,
М. М. Князьков[1], ст. науч. сотр., канд. тех. наук, **Е. А. Семёнов**[1], ст. науч. сотр., канд. тех. наук,
А. Н. Суханов[1, 2], инженер, аспирант, sukhanov-artyom@yandex.ru
[1] Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва,
[2] Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", Москва

Движение мобильного робота по горизонтальным, наклонным и вертикальным поверхностям при наличии возмущений и подвижных препятствий[1]

Выполнен анализ управляемого движения мобильного робота по поверхностям, расположенным под различными углами к горизонту в неструктурированных условиях окружающей среды, в случае возмущающих воздействий, вызванных особенностями поверхностей передвижения. Анализируются различные ситуации взаимного расположения робота и подвижных препятствий, двигающихся с определяемыми сенсорной системой робота относительными скоростями, в которых обеспечивается обход препятствий посредством выбранной стратегии.

Предложены алгоритмы управления, обеспечивающие объезд подвижных препятствий.

Ключевые слова: *мобильный робот, горизонтальная, наклонная, вертикальная поверхности, внешние возмущения, неструктурированная среда, алгоритм, стратегия управления*

Введение

Исследования в области динамики и управляемых движений мобильных роботов, способных перемещаться не только по горизонтальным поверхностям, но и по поверхностям, расположенным под различными углами к горизонту, в том числе под углами 90°, ведутся в известных лабораториях многих стран [1—17]. Исследования в основном были направлены на обеспечение выполнения технологических процессов при инспекции, неразрушающем контроле, очистке, покраске протяженных поверхностей таких объектов, как корпуса кораблей [3, 5], энергетические установки на атомных электростанциях [6—8], резервуары [10—13]. Выполнение таких технологических операций не требовало больших скоростей движения мобильных роботов и ограничивалось скоростями 0,3...3 м/мин при перемещении в детерминированных средах. Возникшие новые задачи использования мобильных роботов в экстремальных неструктурированных условиях, связанных с пожаротушением, мониторингом окружающей среды, разведкой местности, потребовали разработки новых подходов к исследованию динамики и созданию систем управления, связанных с увеличением скоростей движения в заранее неизвестной обстановке.

Рассматривается движение мобильных роботов в таких неструктурированных условиях, которые характеризуются наличием внешних возмущений

[1] Работа выполнена при поддержке РНФ, Грант № 14-11-00298.