

# СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ РАБОТЫ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

## ADAPTIVE CONTROL SYSTEM AND MANIPULATOR TRAJECTORY PLANNING FOR OPERATING IN A DYNAMIC ENVIRONMENT

**R. Galemov  
G. Masalsky**

*Summary.* Currently, industrial robots manipulators perform operations involving cyclic actions. However, with the 4th industrial revolution, requiring the expansion of robots' areas of use, new requirements to robot control systems have appeared, bringing the capabilities of manipulators, in the tasks of interaction with objects, closer to the capabilities of humans. This paper presents an adaptive control system for robot manipulator, which includes a tracking system for a moving object and a system for adapting the parameters of controllers after capturing the object. Both systems use similar direct search algorithms to adapt the parameters while the manipulator is moving. Experiments were conducted on motion planning along a predetermined trajectory and tracking an object moving along the same trajectory.

*Keywords:* robotic manipulator, adaptive control, trajectory planning, tracking, optimization.

**Галемов Руслан Тахирович**

Старший преподаватель, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск  
galemovruslan@gmail.com

**Масальский Геннадий Борисович**

К.т.н., доцент, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск  
gmasalsky@sfu-kras.ru

*Аннотация.* В настоящее время промышленные роботы манипуляторы используются для выполнения циклических операций. Однако с 4-й промышленной революцией, предполагающей расширение областей использования роботов, появились новые требования к системам управления, приближающие возможности манипуляторов, в задачах взаимодействия с объектами, к возможностям человека. В статье представлена адаптивная система управления роботом-манипулятором, включающая систему слежения за движущимся объектом и систему адаптации параметров регуляторов звеньев после захвата объекта. Обе системы используют алгоритмы прямого поиска для адаптации параметров в процессе движения манипулятора. Были проведены эксперименты по планированию движения по заранее заданной траектории и слежению за объектом, движущимся по той же самой траектории.

*Ключевые слова:* робот-манипулятор, адаптивное управление, планирование траектории, слежение, оптимизация.

## Введение

**В** настоящее время для захвата движущихся объектов промышленные манипуляторы используют методы с предварительным планированием движения. Такие методы работают только в случаях, когда состояние движущегося объекта известно заранее либо предсказуемо, например, если объект движется по конвейерной ленте. Если реальное состояние объекта будет отличаться от предсказанного, то манипулятор не сможет произвести захват. Было произведено множество исследований на тему захвата объектов движущихся по произвольным траекториям [1–12].

Для захвата предсказуемо движущихся объектов часто используются методы предсказания, планирования и исполнения (PPE). При использовании PPE система управления, используя предсказания положения объекта, определяет точку захвата на пути объекта. После этого позиционирует рабочий орган в точку захвата

и ждет прибытия объекта [1], [2]. Поскольку все расчеты производятся до начала движения, и если объект отклонится от предполагаемой траектории, то он может не попасть в точку захвата. Для решения этой проблемы были разработаны методы активного предсказания, планирования и исполнения (APPE), которые пересчитывали траекторию движения робота согласно изменениям в траектории движения объекта [3].

Были разработаны другие методы планирования движения рабочего органа в процессе движения робота. В [4] предложен регулятор перестраивающий траекторию по полиному с условиями равенства положения, скорости и ускорения РО и объекта. В [5] предложен планировщик траектории на основе потенциальных полей. В [6] используется разложение вектора движения объекта и модификация вектора ускорения рабочего органа для приближения к цели и синхронизации скорости с целью. Данный метод требует нахождения и обновления Якобиана манипулятора. В [7] управля-

ющее воздействие, в виде ускорения рабочего органа, получается из управляющей таблицы пространства состояний. Эти таблицы необходимо составлять заранее для каждой точки пространства состояний. В [8] для получения заданной скорости звеньев манипулятора, по известным векторам относительной линейной и угловой скорости движущегося объекта, используется обратная кинематика по скорости манипулятора.

Для решения задачи захвата движущегося объекта широко применяется компьютерное зрение. Камера может быть закреплена на неподвижной основе [9]. В [10] предложена система с камерой закрепленной на манипуляторе. В [11] требуемое положение рабочего органа формируется на основе предсказания положения объекта, которое получается фильтром Кальмана из данных с камеры, расположенной на последнем звене манипулятора. Управление получается из классической замкнутой системы с расчетом псевдообратного Якобиана манипулятора.

Целью данной статьи является исследование системы управления робота-манипулятора для работы в динамической среде, включающую алгоритмы адаптации и планирования траектории, разработанные в [12]. Под динамической средой понимается наличие движущихся объектов манипулирования и их влияние на инерцию манипулятора при захвате.

В данной статье рассматривается задача слежения рабочего органа манипулятора за движущейся целью с компенсацией изменения массы в рабочем органе при захвате или отпуске объекта. Слежение достигается путем непрерывного контроля положения объекта и обновления решения обратной задачи кинематики (ОЗК) в процессе движения робота. Решение ОЗК производится комбинированным поисковым методом (КПМ), представляющим комбинацию генетического алгоритма и симплексного поиска. Компенсация изменения массы достигается адаптацией параметров регулятора в процессе движения. Адаптация производится модифицированным симплексным поиском.

## Теоретический анализ

### Планирование траектории

Поскольку цель движется непрерывно, то слежение за движущейся целью можно рассматривать, как задачу оптимизации с дрейфующим экстремумом. В качестве задачи оптимизации используется обратная задача кинематики, которая служит для поиска углов в сочленениях манипулятора  $\mathbf{q}$  при известной матрице трансформации рабочего органа  $\mathbf{T}$ .

$$\mathbf{q} = f^{-1}(\mathbf{T}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{q}$  — вектор  $n \times 1$  обобщенных координат (углов поворота в звеньях) манипулятора;  $n$  — число степеней свободы манипулятора;

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{r} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} -$$

матрица размерности  $4 \times 4$ ;  $\mathbf{r}$  — вектор, размерно-

сти  $3 \times 1$ , положения РО рабочем пространстве  $\mathbf{x}_0\mathbf{y}_0\mathbf{z}_0$ ;  $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \rho_x & \rho_y & \rho_z \end{bmatrix}$  — матрица размерности  $3 \times 3$ ;  $\hat{\mathbf{n}}_x, \hat{\mathbf{n}}_y, \hat{\mathbf{n}}_z$  — векторы, размерности  $3 \times 1$ , составляющие локальную систему координат РО манипулятора в пространстве  $\mathbf{x}_0\mathbf{y}_0\mathbf{z}_0$ .

Запишем задачу слежения в виде задачи оптимизации

$$Q(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (w_i \cdot q_{0i} - q_i)^2 \rightarrow \min_{\mathbf{q} \in V}, \quad (2)$$

$$\text{где } V = \{ \mathbf{q} : \mathbf{q} \in R^n, g(t, \mathbf{q}) = 0, \mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max} \},$$

$t$  — время,  $q_{0i}$  — начальное значение обобщенных координат  $i$ -го звена,  $w_i$  — нормированная кумулятивная сумма длин звеньев манипулятора с  $i$ -го до  $n$ -го,

$$g(t, \mathbf{q}) -$$

функциональное ограничение на положение и ориентацию рабочего органа и определяется формулой

$$g(t, \mathbf{q}) = \omega \cdot \sqrt{\sum_i^{\{x,y,z\}} (r_{d,i}(t) - r_i(\mathbf{q}))^2} + (1 - \omega) \cdot \sqrt{\sum_j^{\{x,y,z\}} (\rho_{d,j}(t) - \rho_j(\mathbf{q}))^2}, \quad (3)$$

где индекс  $d$  обозначает требуемое значение.

Целевая функция (2) имеет дрейф экстремума, обусловленный изменением во времени функции ограничения (3). Алгоритм оптимизации использует компенсированное (с учетом дрейфа цели) значение целевой функции

$$C(\mathbf{q}_l) = Q(\mathbf{q}_l) + \sum_{i=l+1}^k d_i, \quad (4)$$

где  $l$  — индекс текущей вершины поиска;  $k$  — шаг поиска;  $d_i$  — смещение поверхности целевой функции в  $i$ -й вершине. Поскольку смещения  $d_k$  неизвестны, то в (4) используются их оценки на основе скорости дрейфа. Для оценки скорости дрейфа используем рекуррентный метод наименьших квадратов [12]. Оценка дрейфа производится численным интегрированием оценок скорости дрейфа для всех вершин КПМ. Подробности работы КПМ описаны в [13].

### Адаптация регуляторов

Манипулятор в движении является постоянно изменяющейся системой, по причине изменения инерции звеньев, гравитации и вязкого трения. Эти изменения происходят вследствие движения звеньев, а так же из-за изменения массы в рабочем органе вследствие захвата или отпущения объектов, и приводят к дрейфу экстремума целевой функции адаптера. В этих условиях для адаптации в реальном времени используются специальные методы оптимизации.

В статье использован комбинированный подход к адаптации, на основе симплексного поиска (СП) при котором на каждом шаге адаптации происходит изменение параметров и компенсирующего воздействия. Целевая функция для настройки параметров регулятора имеет вид

$$Q(\kappa, z_\kappa | \theta_{\kappa-1}) = (q_d(\kappa) - q(\kappa, z_\kappa | \theta_{\kappa-1}))^2 \rightarrow \min_{\theta_{\kappa-1} \in \Theta}, \quad (5)$$

$$\text{где } \Theta = \{\theta_\kappa : \theta_\kappa \in R^n, \theta^- \leq \theta_\kappa \leq \theta^+\};$$

$\theta_\kappa$  — вектор настраиваемых параметров регулятора;

$q_d(\kappa)$  — значение задающего воздействия на  $\kappa$ -м шаге адаптации;

$q(\kappa | \theta_{\kappa-1})$  — выход системы на шаге  $\kappa$  для набора параметров, полученных на предыдущем шаге адаптации;  $z_\kappa$  — контролируемое возмущение, измеренное в момент адаптации. Для компенсации возмущений СП хранит значения целевой функции для каждой вершины текущего симплекса и вектор контролируемых возмущений  $z_\kappa$  [14].

Компенсированное значение целевой функции в  $l$ -й вершине симплекса равно

$$C_l = Q(\kappa_l, z_l | \theta_l) + \Delta z_l^T \cdot \hat{b}_\kappa, \quad (6)$$

$$l = 1 \dots n + 1,$$

где  $\hat{b}_\kappa$  — оценка дрейфа целевой функции;  $\theta_l$  — набор параметров регулятора, с которым вычислялась целевая функция для  $l$ -й вершины;  $\Delta z_l = z_\kappa - z_l$  — разница между текущим вектором контролируемых возмущений и вектором, полученным во время вычисления целевой функции в  $l$ -й вершине;  $n$  — размерность пространства поиска.

Поскольку дополнительное управление и параметры регулятора меняются одновременно, то использование измеряемой ошибки управления в качестве целевой функции в двух адаптерах приведёт к неопределенности типа: изменения параметров в каком адаптере привели к улучшению (ухудшению) значения измеряемой ошибки. Для избегания этой неопределенности используется целевая функция от моделируемого задающего воздействия.

Использование моделируемого задающего воздействия позволяет оценить влияние альтернативных наборов параметров на качество управления, не используя их в работе системы. Для этого вычисляется оценка качества управления

$$\begin{aligned} \tilde{Q}(\kappa | \hat{\theta}_\kappa^{(i)}) &= \\ &= \left( \hat{q}(\kappa | \hat{\theta}_\kappa^{(i)}) - q(\kappa | \theta_{\kappa-1}) \right)^2 \rightarrow \min_{\hat{\theta}_\kappa^{(i)} \in \Theta}, \quad (7) \\ \hat{q}(\kappa | \hat{\theta}_\kappa^{(i)}) &= P_d \tilde{r}(\kappa, \hat{\theta}_\kappa^{(i)}), \\ i &= 1 \dots n + 1, \end{aligned}$$

где  $\Theta = \{\hat{\theta}_\kappa^{(i)} : \hat{\theta}_\kappa^{(i)} \in R^n, \theta^- \leq \hat{\theta}_\kappa^{(i)} \leq \theta^+\};$   $\theta^-, \theta^+$  — вектора минимальных и максимальных значений параметров регулятора;

$\tilde{r}(\kappa, \hat{\theta}_\kappa^{(i)})$  — моделируемое задающее воздействие;  $P_d$  — эталонная модель переходного процесса замкнутой системы управления. Подробности о вычислении моделируемого задающего воздействия описаны в [14].

Структура системы управления представлена на рисунке 1. Здесь источник траектории для РО может предоставлять, как заранее рассчитанные траектории РО, так и текущее положение цели. В системе управления звена происходит комбинированная адаптация параметров ПД-регулятора адаптивными методами и расчет заданных моментов для двигателя.

### Эксперименты

Система управления разработана для прототипа робота предназначенного для образовательных и промышленных целей и имеет следующие характеристики: грузоподъемность до 6 килограмм; 5 вращательных

Таблица 1. Динамические параметры звеньев робота

Звено	Масса, кг	Осевые моменты инерции, кг·м <sup>2</sup>	Центрбежные моменты инерции, кг·м <sup>2</sup>
1	60.8	[0.016; 0.008; 0.015]	[-0.000; -0.000; -0.000]
2	31.4	[0.191; 0.124; 0.215]	[0.025; -0.000; -0.000]
3	5.4	[0.270; 0.284; 0.014]	[0.001; 0.011; 0.000]
4	5.0	[0.016; 0.008; 0.020]	[0.004; -0.002; 0.003]
5	1.2	[0.014; 0.074; 0.072]	[-0.000; -0.000; -0.001]

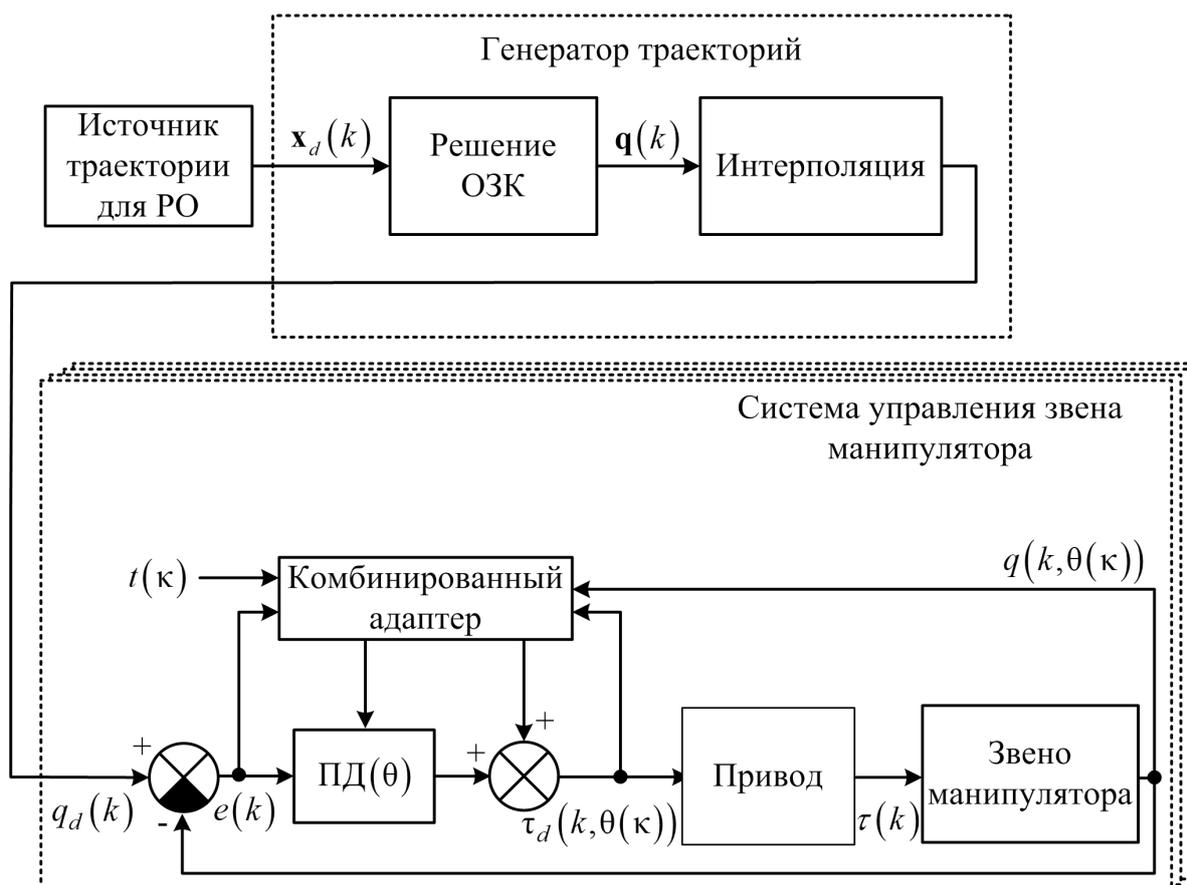


Рис. 1. Структурная схема системы управления

степеней свободы с рабочим органом. Кинематическая схема представлена на рисунке 2. Значения параметров динамики манипулятора представлены в таблице 1.

Параметры кинематики по модели Денавита-Хартенберга для рассматриваемого манипулятора представлены в таблице 2.

Эксперименты проводились на модели системы управления, представленной на рисунке 1. Частота обновления выхода генератора траекторий равна частоте обновления управляющего воздействия. Эксперименты проводились на траекториях, представленных в таблице 3.

*Эксперимент 1:* Цель эксперимента: сравнение точности движения по траектории и слежения за целью при заданной скорости движения РО. Эксперимент разделен на два этапа. В первом на вход системы подавалась траектория, заранее разбитая на сегменты для предварительного расчета. Во втором этапе траектория подавалась как текущее положение цели. На каждом этапе проводились испытания с пустым РО, с грузом в РО  $m_l = 6$  кг и с имитацией поднятия и сброса груза во время прохождения траектории. В качестве критерия сравнения выбрано среднее расстояние от рабочего органа до текущей точки траектории. В таблице 4 приведены значения критерия для двух этапов эксперимента.

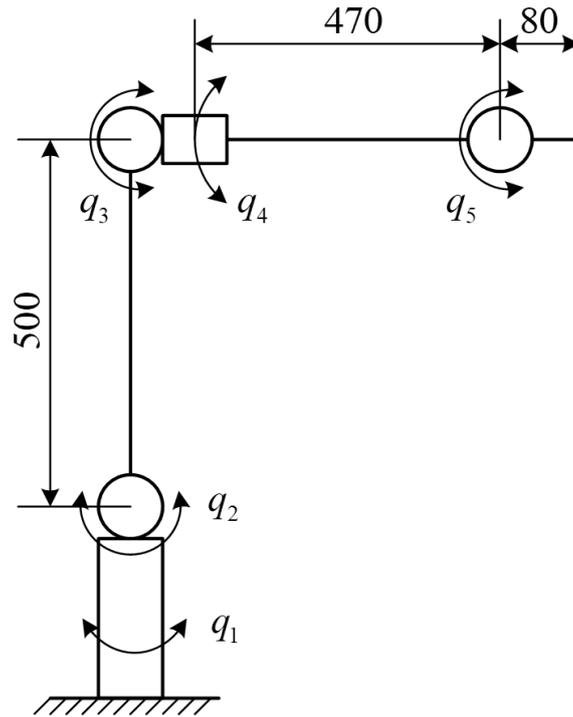


Рис. 2. Кинематическая схема манипулятора

Таблица 2. Параметры Денавита-Хартенберга для пятизвенного манипулятора

	Звено 1	Звено 2	Звено 3	Звено 4	Звено 5
$a$ , м	0	0.500	0	0	0.08
$d$ , м	0.318	0	0	0.470	0
$\alpha$ , рад	$-\pi/2$	0	$\pi/2$	$\pi/2$	0
$\Theta$ , рад	0	0	0	0	0
$\sigma$	1	1	1	1	1

По результатам эксперимента видно, что средняя ошибка при движении по траектории составляет 2.2 мм. При слежении за целью средние ошибки составляют 7.6 мм. Разница в средней ошибке объясняется поисковыми движениями, которые совершает КПМ во время слежения за движущейся целью, и отставанием поиска от оптимума целевой функции.

*Эксперимент 2:* цель эксперимента показать влияние скорости дрейфа на ошибку позиционирования РО. Эксперимент проводится в режиме следования за целью. Цель движется по траектории 1 из таблицы 3 при различных значениях  $b$ . Для траектории 1 величина  $b$  является линейной скоростью движения и представлена в результатах в м/с. В качестве критерия выбрана средняя ошибка позиционирования РО. В таблице 5 приведены значения критерия.

По результатам эксперимента видно, что среднее расстояние до рабочего органа превышает 10 мм при линейной скорости цели более 0.2 м/с.

### Результаты

В статье показано, что разработанный алгоритм построения траектории и адаптивный регулятор могут использоваться для построения системы управления манипуляционными роботами. Полученная система способна выполнять задачи по следованию по заранее рассчитанной траектории, а так же рассчитывать траекторию для отслеживания движущейся цели. Система управления робота обеспечивает точность менее 5 мм и следит за целью с ошибкой, не превышающей 10 мм при линейной скорости цели не более 0.15 м/с при управлении рассматриваемым манипулятором.

Таблица 3. Траектории рабочего органа

№	$r_{di}$ , м	$\rho_{di}$ , рад	$b$
1	$\begin{bmatrix} 0.6 \\ 0.4 - b \cdot t \\ 0.8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ -\pi/2 \\ 0 \end{bmatrix}$	0.1
2	$\begin{bmatrix} 0.6 \cdot \cos\left(b \cdot t - \frac{\pi}{4}\right) \\ 0.6 \cdot \sin\left(b \cdot t - \frac{\pi}{4}\right) \\ 0.8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \pi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	0.1
3	$\begin{bmatrix} 0.6 + 0.05 \cdot \cos(10b \cdot t) \\ 0.4 - b \cdot t \\ 0.8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ -\pi/2 \\ 0 \end{bmatrix}$	0.1
4	$\begin{bmatrix} 0.6 + 0.05 \cdot \cos(5b \cdot t) \\ 0.4 - b \cdot t \\ 0.8 + 0.05 \cdot \cos(10b \cdot t) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ -\pi/2 \\ 0 \end{bmatrix}$	0.1
5	$\begin{bmatrix} 0.8 \\ \frac{0.2 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(b \cdot t)}{\sin(b \cdot t)^2 + 1} \\ 0.8 + \frac{0.2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(b \cdot t) \cdot \cos(b \cdot t)}{\sin(b \cdot t)^2 + 1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ -\pi/2 \\ 0 \end{bmatrix}$	0,1

Таблица 4. Значения критерия в эксперименте 1

		Траектория					средняя
		1	2	3	4	5	
Движение по траектории	Без груза, мм	2.1	1.2	2.3	2.4	3.2	2.2
	С грузом, мм	1.9	0.9	3.2	3.0	6.6	3.1
	С изменением массы, мм	2.1	1.9	1.6	2.3	4.8	2.5
Слежение за целью	Без груза, мм	4.2	3.4	4.5	7.7	18.1	7.6
	С грузом, мм	5.0	4.9	5.0	7.9	23.8	9.3
	С изменением массы, мм	4.4	4.8	4.4	7.4	19.8	8.1

Таблица 5. Значения критерия эксперимента 2

$b$ , м/с	0.03	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
Критерий, мм	3.4	3.4	4.2	5.9	9.0	19.6	45.5

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kimura H., Mukai N., Slotine J.J.E. Adaptive visual tracking and Gaussian network algorithms for robotic catching //Advances in robust and nonlinear control systems. — 1992. — С. 67–74.
2. Park T.H., Lee B.H. An approach to robot motion analysis and planning for conveyor tracking //IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. — 1992. — Т. 22. — №. 2. — С. 378–384.
3. Croft E.A., Fenton R.G., Benhabib B. Optimal rendezvous-point selection for robotic interception of moving objects //IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). — 1998. — Т. 28. — №. 2. — С. 192–204.
4. Zhang M., Buehler M. Sensor-based online trajectory generation for smoothly grasping moving objects //Proceedings of 1994 9th IEEE International Symposium on Intelligent Control. — IEEE, 1994. — С. 141–146.
5. Masoud A.A., Bayoumi M.M. Intercepting a maneuvering target in a multidimensional stationary environment using a wave equation potential field strategy // Proceedings of 1994 9th IEEE International Symposium on Intelligent Control. — IEEE, 1994. — С. 243–248.
6. Ye X., Liu S. Velocity decomposition based planning algorithm for grasping moving object //2018 IEEE7th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS). — IEEE, 2018. — С. 644–649.
7. Archibald C., Van de Panne M. Tracking and grasping moving objects using reflex behaviour //Fifth International Conference on Advanced Robotics' Robots in Unstructured Environments. — IEEE, 1991. — С. 643–648.
8. Zhang G. et al. Grasp a moving target from the air: System & control of an aerial manipulator //2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — IEEE, 2018. — С. 1681–1687.
9. Mirtich B., Canny J. Easily computable optimum grasps in 2-D and 3-D //Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. — IEEE, 1994. — С. 739–747.
10. Nomura H., Naito T. Integrated visual servoing system to grasp industrial parts moving on conveyer by controlling 6DOF arm //Smc 2000 conference proceedings. 2000 ieee international conference on systems, man and cybernetics. 'cybernetics evolving to systems, humans, organizations, and their complex interactions' (cat. no. 0. — IEEE, 2000. — Т. 3. — С. 1768–1775.
11. Shaw J., Chi W.L. Automatic classification of moving objects on an unknown speed production line with an eye-in-hand robot manipulator //Journal of Marine Science and Technology. — 2018. — Т. 26. — №. 3. — С. 10.
12. Галемов Р.Т. Компенсация знакопеременного дрейфа целевой функции в решении обратной задачи кинематики манипулятора в условиях движущейся цели // Кибернетика и программирование. — 2018. — №. 4. — С. 1–18.
13. Галемов Р.Т., Масальский Г.Б. Комбинированный поисковой метод решения обратной задачи кинематики многозвенного манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. — М: Новые технологии. — 2018. — № 7 –Т.19. — С464–473
14. Галемов Р.Т. Адаптация параметров и компенсирующего воздействия ПД-регулятора работа-манипулятора// В кн. Проспект Свободный — 2019. Секция «Электротехнологии, электротехника и робототехника»: материалы Междунар. студ. конф. Красноярск, 24 апреля 2019 г, С 15–17.

© Галемов Руслан Тахирович ( galemovruslan@gmail.com ), Масальский Геннадий Борисович ( gmasalsky@sfu-kras.ru ).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»