

УДК 621.865

ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Егоров И.Н., Умнов В.П.

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), Владимир, e-mail: mex-rob@yandex.ru

Для автоматизированного высокоскоростного и высокопроизводительного фрезерования концевыми фрезами деталей сложной формы предлагается робототехническая система, исполнительное устройство которой состоит из манипулятора инструмента и манипулятора детали. Задача управления такой системой – согласованное относительное перемещение изделия и инструмента по заданным траекториям с требуемой точностью. Исходя из возможности формирования двухканального воздействия, управление траекторным движением рассматриваемого исполнительного устройства предлагается осуществлять позиционно-силовым способом, при котором одним из манипуляторов создается дозированное силовое взаимодействие между инструментом и обрабатываемым изделием, а другим осуществляется заданное относительное перемещение. Представлена обобщенная структура системы управления, содержащая подсистему стабилизации динамических характеристик, датчик силового взаимодействия, расположенный на выходном звене манипулятора инструмента, устройство управления, осуществляющее позиционное и (или) позиционно-силовое гибридное управление перемещением звеньев манипуляторов. Приведены математические зависимости для управляющих моментов.

Ключевые слова: гибридная обработка, манипуляционная система, функциональные связи, нарушения связей, синтез

POSITION-FORCE MANAGEMENT IN ROBOTIC SYSTEM OF TOOLING

Egorov I.N., Umnov V.P.

The Federal State budgetary educational institution of higher professional education «The Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs» (VLSU), Vladimir, e-mail: mex-rob@yandex.ru

For the automated high-speed and high-performance milling trailer mills of details of a difficult form offer robotic system which actuation mechanism consists of the manipulator of the tool and the manipulator of a detail. A problem of management of such system – the coordinated relative movement of a product and the tool on the set trajectories with the demanded accuracy. Proceeding from possibility of formation of two-channel influence, control of the trajectory movement of the considered actuation mechanism is offered to be exercised positionally – a power way at which one of their manipulators the dosed power interaction between the tool and the processed product is created, and another carries out the set relative movement. The generalized structure of a control system containing a subsystem of stabilization of dynamic characteristics, the sensor of power interaction located on an output link of the manipulator of the tool, the control unit which is carrying out position and (or) positionally – power hybrid management of movement of links of manipulators is presented. Mathematical dependences for the operating moments are given.

Keywords: hybrid processing, handling system, functional communications, violations of communications, synthesis

В последние годы целый ряд основных операций в механической обработке стали успешно выполнять промышленные роботы (фрезерование концевыми фрезами, шлифование, полирование и другие) с погрешностью обработки до 0,01 мм. Преимущества использования роботов следующие: стоимость робота в несколько раз меньше стоимости 5-координатного станка с ЧПУ; высокая маневренность (в одной роботизированной ячейке можно организовать несколько рабочих зон); гибкость функционирования (вариативность решений «инструмент к детали», «деталь к инструменту» или совместные движения инструмента и детали в процессе выполнения операции); значительно меньшая масса и потребление энергии в процессе работы.

Для автоматизированного высокоскоростного и высокопроизводительного фрезеро-

вания деталей сложной формы может быть использовано исполнительное устройство, состоящее из манипулятора инструмента и манипулятора детали [5], построенных с использованием подходов параллельной кинематики [1]. Такое решение сочетает в себе высокую жесткость и разделение движений между инструментом и обрабатываемой деталью (двухканальность управления), присутствующие обрабатывающим центрам, с высокой кинематической маневренностью и относительно малой массой звеньев, свойственными технологическим роботам. Кроме этого, система обладает высокой динамичностью приводов, высокой скоростью относительного перемещения детали и инструмента, стабильностью температурных параметров, высокой жесткостью за счет замыкания кинематической цепи, возможностью эффективной реализации статической разгрузки [2].

Эффективность технического функционирования рассматриваемой робототехнической системы во многом определяется эффективностью его системы управления. Задача системы управления – обеспечение согласованного перемещения инструмента и детали по запрограммированной траектории с требуемой ориентацией и заданной контурной скоростью и с погрешностями, не превышающими допустимые уровни.

На погрешности исполнительных движений робота-станка влияет целый ряд факторов. В общем случае наиболее сильное влияние могут оказывать упругость и люфты механических передач манипулятора, а также значения контурной скорости движения инструмента и кривизны обрабатываемой поверхности. В предлагаемой исполнительной системе люфты отсутствуют, а упругие деформации могут быть сведены к минимальным допустимым значениям на этапе конструирования. В работе [4] отмечается, что значительное увеличение точности механообработки обеспечивается в результате одновременного увеличения жесткости по нормали к поверхности обрабатываемого объекта и снижения до требуемого уровня жесткости «технологической пружины». Это достигается путем использования более прогрессивных структур управления, способных компенсировать упругие смещения инструмента по нормали к поверхности объекта. При этом с целью увеличения производительности необходимо стремиться к наиболее полному использованию силовых возможностей привода, предотвращая, однако, их перегрузки. Таким образом, управление осуществляется в результате одновременного использования обратных связей по контролируемым силам, которые с учетом текущей конфигурации манипулятора динамически корректируют контурную скорость и регулируют эквивалентную податливость инструмента вдоль траектории.

Исходя из отмеченных выше положений, управление обработкой в предлагаемой исполнительной системе может строиться в пространстве базовых координат с регулированием контурной скорости в функции силового взаимодействия между инструментом и заготовкой. В то же время высокая жесткость исполнительного механизма и его высокие демпфирующие возможности указывают на необходимость импедансного управления в рассматриваемом случае. Большая величина скорости резания при высокоскоростной обработке практически сглаживает пульсации сил резания от отдельной режущей кромки фрезы, и изменения сил резания могут быть лишь при изме-

нении припуска на обработку как медленно меняющееся воздействие. Более того, при синтезе программной траектории выбираются гладкие траектории, а также стремятся к постоянству глубины резания и подаче на зуб. Учитывая сказанное выше, а также исходя из возможности формирования двуканального управляющего воздействия, управление траекторным движением рассматриваемого исполнительного устройства предлагается осуществлять позиционно-силовым способом [3], при котором одним их манипуляторов создается дозированное силовое взаимодействие между инструментом и обрабатываемым изделием, а другим осуществляется заданное относительное перемещение. Процесс перемещения инструмента и обрабатываемого изделия, с точки зрения их взаимодействия состоит из нескольких этапов: этап «свободного» движения, заключающийся в относительном перемещении инструмента и изделия до момента касания; этап врезания, при котором необходимо обеспечить плавное нарастание сил резания во избежание поломки инструмента и этап резания с управляемым положением инструмента относительно изделия, при котором (например, при трохoidalном фрезеровании) происходит циклическое чередование этапов свободного движения и резания. Исходя из сказанного, управление движением робота-станка должно быть гибридным позиционно-силовым с переключением структуры.

На рис. 1 приведена обобщенная структура системы управления роботом-станком, содержащая подсистему стабилизации динамических характеристик, датчик силового взаимодействия, расположенный на выходном звене манипулятора инструмента, устройство управления, осуществляющее позиционное и (или) позиционно-силовое гибридное управление перемещением звеньев манипуляторов.

Задача стабилизации динамических характеристик исполнительной системы может быть ограничена обеспечением инвариантности к изменению только одного параметра – приведенного момента инерции, и она может быть решена на уровне привода без рассмотрения вопроса динамической коррекции программного движения. Этим освобождаются вычислительные ресурсы для решения задачи формообразования в процессе обработки в реальном масштабе времени, что является важным фактором при высокоскоростном резании. При решении задачи синтеза предпочтение может быть отдано методу сигнально-параметрической коррекции на основе модели системы с заданными свойствами.

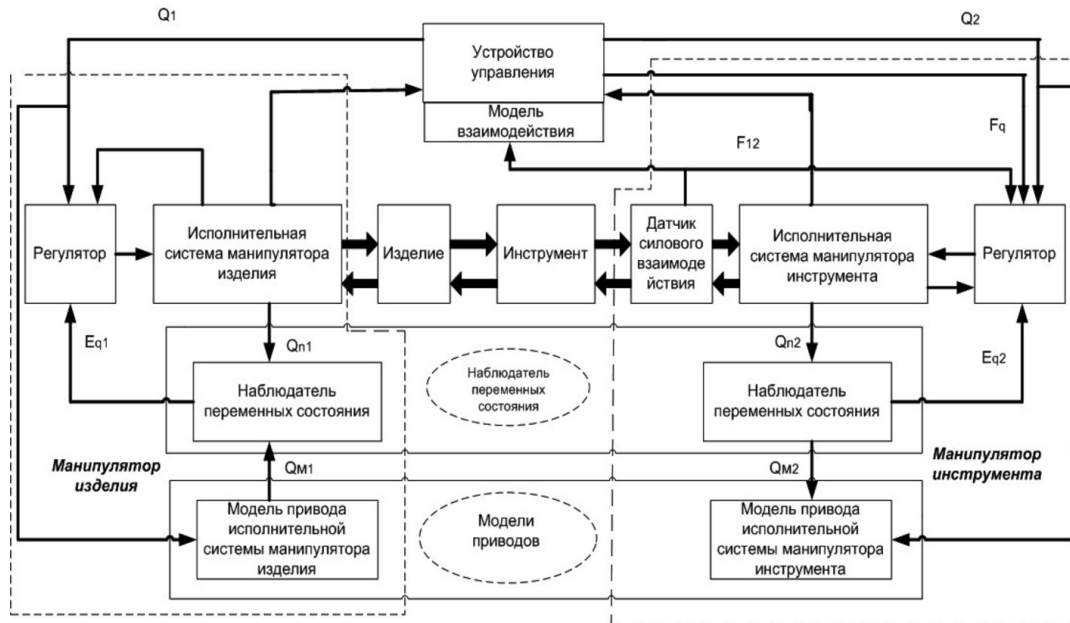


Рис. 1. Обобщенная структура системы управления роботом-станком

Запишем уравнение движения автономного привода с регулятором тока, которое содержит момент инерции и его первую производную и имеет вид

$$p^3 q_n = a_1 \mu - a_2 (1 + T_{KT} J p J^{-1}) p^2 q_n - a^3 p q_n. \quad (1)$$

Здесь a_1, a_2, a_3 – коэффициенты, μ – управляющий момент, T_{KT} – постоянная времени контура тока, J – переменный момент инерции, p – оператор дифференцирования.

Представим выражение (1) в векторно-матричном виде относительно ошибки выходной координаты и ее производных:

$$p E_Q = A E_Q - B \mu;$$

$$E_Q = \begin{bmatrix} E_q \\ E_{pq} \\ E_{p^2q} \end{bmatrix}^T. \quad (2)$$

Полагая, что указанные ошибки являются отклонениями от эталонных значений, в качестве минимизирующего функционала используем квадратичную интегральную форму

$$S = \frac{1}{2} \int_{t_0}^T \left(\sum_{i=0}^3 k_{i+1} E_{p^i q}^2 + \mu^2 \right) dt, \quad (3)$$

где k_{i+1} – весовые коэффициенты.

Управляющее воздействие, доставляющее минимум выражению (3), будем формировать в виде

$$\mu(t) = \int_{t_0}^T h_1 (X - E_Q) dt + h_2 (X - E_Q), \quad (4)$$

где h_1, h_2 – коэффициенты регулятора, а X – входное воздействие на регулятор.

В соответствии с выражениями (1) – (4) для обеспечения инвариантности динамических свойств манипуляционной системы предлагается использовать ее внутреннюю эталонную компьютерную модель с наблюдателем и сигнальной компенсацией отклонений между объектом и моделью (рис. 2).

На рис. 2 обозначено:

$$Q_n = \begin{bmatrix} q_n \\ p q_n \\ p^2 q_n \\ p^3 q_n \end{bmatrix};$$

$$Q_m = \begin{bmatrix} q_m \\ p q_m \\ p^2 q_m \\ p^3 q_m \end{bmatrix};$$

$$E_Q = k_i (Q_n - Q_m)_{i=1,4}$$

– векторы состояния привода, модели и ошибок.

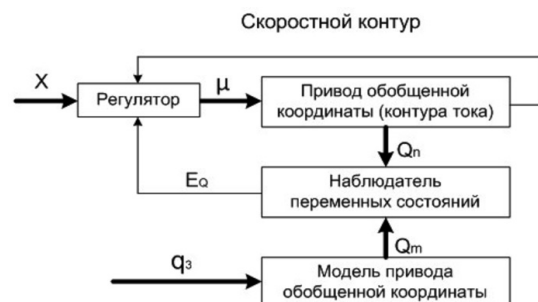


Рис. 2. Структура системы коррекции привода обобщенной координаты

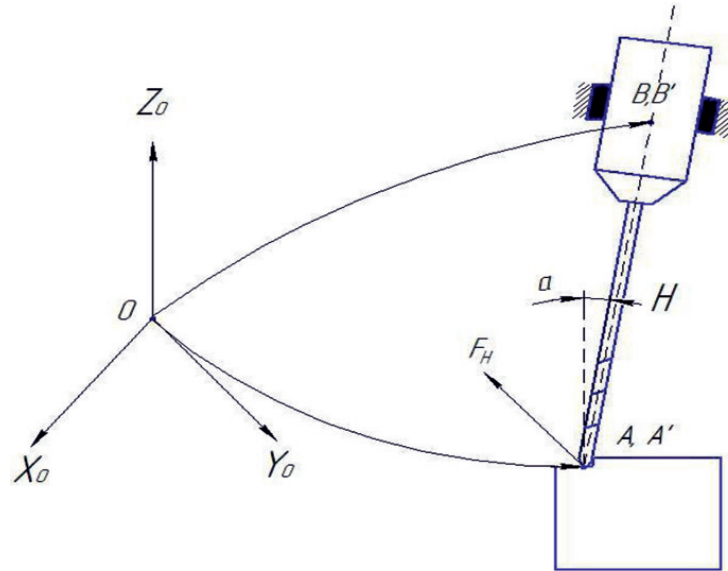


Рис. 3. Системы координат при реализации предлагаемого способа обработки

Управление каждым манипулятором осуществляется в базовой системе координат. На рис. 3 приведены системы координат при реализации предлагаемого способа обработки.

Выбранные системы координат можно связать матричным соотношением (4.16)

$$T_o^A(g_d) = T_o^B(g_v) T_B^{B'}(H) T_{A'}^A \quad (5)$$

Здесь $T_o^A(g_d)$ – матрица координатных преобразований точек траектории обработки детали в базовую систему; $T_o^B(g_v)$ – матрица координатных преобразований характеристической точки манипулятора инструмента в базовую систему; $T_B^{B'}$ – матрица упругих перемещений инструмента; $T_{A'}^A(H)$ – матрица координатных преобразований режущей кромки инструмента относительно т.В; $T_{A'}^A$ – матрица составляющих погрешности обработки.

Уравнение для решения обратной задачи кинематики манипулятора изделия имеет вид

$$T_o^A(g_d) = \prod_0^3 A_i^{i+1} \quad (6)$$

Здесь A_i^{i+1} – матрицы преобразования связанных координат в представлении Денавита-Хартенберга.

При решении обратной задачи компоненты матрицы $T_o^A(g_d)$ – задаваемые величины.

Для решения обратной задачи относительно линейных скоростей необходимо

продифференцировать соотношения (6) по времени и записать выражение

$$[V_A]^T = J(q)[Q_g]^T, \quad (7)$$

где V_A – вектор линейной скорости конечной точки выходного манипулятора изделия, $J(q)$ – матрица Якоби для преобразования скоростей, Q_g – вектор обобщенных скоростей. Полагая величину V_A заданной, Q_g определяется с помощью обратного преобразования:

$$[Q_g]^T = J(q)^{-1} [V_A]^T. \quad (8)$$

При «свободном» движении задачей управления формально является сведение к единичной матрицы $\tilde{T}_{A'}^A$ в выражении 6 при отсутствии силового взаимодействия (нулевого сигнала с силомоментного датчика). Тогда согласованное движение манипуляторов можно описать матричными соотношениями:

$$T_v(t) = T_{ov} T_o^{A'}(g_v t);$$

$$T_d(t) = T_{od} T_o^A(g_d t); \quad T_B^{B'} = E.$$

Задача управления:

$$\tilde{T}_{A'}^A = T_o^{A'}(g_v, t) - T_o^A(g_d, t), \quad \text{при } t = t_k;$$

$$\tilde{T}_{A'}^A \rightarrow \begin{vmatrix} c\varphi & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} 4 \times 4. \quad (9)$$

Управляющие моменты определяются следующим образом:

$$M_v = W_v(g_v); \quad M_d = W_d(g_d); \quad W_v = D_1^v p^2 g_v + D_2^v (p g_v, g_v \xi_v) + D_3^v (g_v);$$

$$W_d = D_1^d p^2 g_d + D_2^d (p g_d, g_d \xi_d) + D_3^d (g_d). \quad (10)$$

При позиционно-силовом управлении целесообразно организовать компенсацию позиционного возмущения. Управляющие моменты при этом имеют следующий вид:

$$\mu_d = W_d + J_d^T(q_d) F_H;$$

$$\mu_v = w_v + J_v^T(q_v) \cdot (F_d) + \mu_k;$$

$$\mu_k = \left[T_{A'}^A - T_{A'}^A(F_H) \right] G(p);$$

$$T_B^{B'}(Y) \Rightarrow Y = \Phi \times F_d;$$

$$T_A^{A'} = T_O^A(q_d) T_O^{B^{-1}}(q_v) \cdot T_{B'}^{A'}(H) \cdot T_B^{B^{-1}}(Y). \quad (11)$$

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-01364).

Список литературы

1. Афонин В.Л. Обработка оборудования на основе механизмов параллельной структуры / В.Л. Афонин, П.В. Подзоров, В.В. Слепцов. – М.: МГТУ Станкин, 2006. – 449 с.
2. Власенков А.В. Исполнительная система технологического робота-станка для обработки лопаток газотурбинных двигателей / А.В. Власенков, С.В. Молостов, В.П. Умнов // Авиационная промышленность. – 2013. – № 1. – С. 1–4.
3. Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление технологическими роботами при действии внешних связей / И.Н. Егоров, В.С. Кулешов // Экстремальная робототехника: Матер. VIII научно-технич. конфер. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 1997. – С. 269–274.
4. Илюхин Ю.В. Концептуальный синтез структуры управления исполнительными системами технологических роботов / Ю.В. Илюхин // Новые материалы и технологии НМТ-98; матер. Всероссийской научно-технической конференции. – Москва, 1998. – 4 с.
5. Умнов В.П. Комплексирование манипуляционной исполнительской системы роботизированных технологических центров гибридной обработки / В.П. Умнов, И.Н. Егоров, С.В. Молостов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1.