DOI: 10.15593/2224-9982/2019.58.04

УДК 621.95.04

А.С. Дударев¹, А.В. Подвинцев^{1, 2}

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² АО «Пермский завод «Машиностроитель»», Пермь, Россия

ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПЕРФОРАЦИИ ОТВЕРСТИЙ В ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Приведен анализ способов перфорации оболочечных конструкций. Показано, что для массового формообразования мелкоразмерных отверстий в оболочечных звукопоглощающих конструкциях авиационных двигателей наиболее приемлема технология с применением роботизированного комплекса. Такие роботизированные комплексы уникальны, позволяют заменить монотонный ручной труд, составляют пригодную альтернативу современным станкам. Описана проблема погрешности обработки при перфорации отверстий роботизированным комплексом оболочечных многослойных звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей. Погрешность заключается в искажении идеальной требуемой формы отверстий и вызвана несовершенством кинематики шестиосевого робота. Форма отверстий звукопоглощающих конструкций играет важную роль, потому что напрямую влияет на выходные акустические характеристики – эффективность шумоглушения авиационных двигателей. На основе методики управления кинематикой робота в полярных координатах возможно существенно повысить точность обработки. Представлена модель управления движением для робота-манипулятора, основанная на использовании децентрализованной и централизованной структур управления. Схема имеет саморегулирующую возможность благодаря наличию механизмов принятия решений, которые используют переключения в качестве альтернатив активировать одну из двух управляющих структур. Технически проблема повышения точности решается размещением датчиков на подвижных звеньях робота, измеряющих крутящие моменты, и надстройкой системы динамического управления, благодаря чему расширяются технологические возможности робота и повышается точность перфорации отверстий. Предложенный подход опирается на модель промышленного антропоморфного робота-манипулятора Kuka KR 60 HA в составе роботизированного комплекса для перфорации и фрезерования оболочечных звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей.

Ключевые слова: робот, роботизированный комплекс, перфорация, сверление, оболочечная конструкция, звукопоглощающая панель, сверло, инструмент, круглость, отверстие, точность.

A.S. Dudarev¹, A.V. Podvintsev^{1, 2}

¹ Perm National Research Politechnic University, Perm, Russian Federation

² JSC "Perm Plant "Mashinostroitel", Perm, Russian Federation

FEATURES OF PERFORMANCE OF PERFORATION HOLES IN THE SHELL-ABSORBING STRUCTURES AIRCRAFT ENGINE

The article provides an analysis of methods for perforation of shell structures. It is shown that for mass shaping of small-sized holes in shell sound-absorbing structures of aircraft engines, the most acceptable technology with the use of a robotic complex. Such robotic systems are unique, they allow to replace monotonous manual labor, they are a suitable alternative to modern machines. The problem of machining error in the perforation of the holes by a robotic complex of shell multi-layer sound-absorbing structures of aircraft engines is described. The error lies in the distortion of the ideal desired shape of the holes and is caused by the imperfection of the kinematics of the six-axis robot. The shape of the openings of sound-absorbing structures plays an important role, because it directly affects the output acoustic characteristics - the efficiency of sound attenuation of aircraft engines. Based on the method of controlling the kinematics of the robot in polar coordinates, it is possible to significantly improve the processing accuracy. This article presents a motion control model for a robotic arm based on the use of a decentralized and centralized control structure. The scheme has a self-regulating ability due to the presence of decision-making mechanisms that use switching as an alternative to activate one of the two control structures. Technically, the problem of increasing the accuracy is solved by placing sensors on the moving links of the robot, measuring torques and the superstructure of the dynamic control system, thereby expanding the technological capabilities of the robot and increasing the accuracy of the perforations of the holes. In the article, the proposed approach is based on the model of the industrial anthropomorphic robotic manipulator Kuka KR 60 HA as part of a robotic complex for perforation and milling of shell sound-absorbing structures of aircraft engines.

Keywords: robot, robotic complex, perforation, drilling, shell construction, sound absorbing panel, drill, tool, roundness, hole, precision.

Введение

В различных машиностроительных отраслях часто возникает задача перфорации отверстий в деталях и сборочных единицах особого класса – оболочечных конструкциях со сложными криволинейными поверхностями, причем в подавляющем большинстве случаев перфорация выполняется по внутренним поверхностям. Примерами таких деталей и сборочных единиц оболочечной конструкции с внутренней перфорацией являются роторные машины (центрифуги, сепараторы) [1], звукопоглощающие конструкции авиационных двигателей, шпангоуты и др.

Для оболочечных конструкций в качестве конструкционных материалов применяют стали, сплавы, полимерные композиционные материалы (ПКМ). Изделия из ПКМ обладают специфическими особенностями обработки [2–6].

Классификация методов перфорации деталей и сборочных единиц со сложными поверхностями иррегулярной формы

Все множество деталей и сборочных единиц оболочечных конструкций со сложными поверхностями иррегулярной формы перфорируют различными методами:

1. Ручной обработкой сверловщиками по накладному кондуктору или шаблону обрезки и кондуктору (ШОК) для сверления отверстий.
2. На металлообрабатывающих горизонтально-расточных, фрезерных, универсальных многоосевых станках.
3. На специализированных станках, созданных под конкретные изделия со сложными формами поверхностей.
4. На робототехнических комплексах.
5. На станках гидроабразивной резки.
6. На оборудовании со светолучевой (лазерной) техникой.

Каждый из приведенных методов проанализирован, анализ сведен в таблицу.

Сравнительный анализ методов перфорации

№ п/п	Метод перфорации	Оборудование и технологическое оснащение	Преимущества	Недостатки	Пригодность к обработке ПКМ
1	Ручное сверление	Пневмо/электродрель, ШОК	Высокое качество у высококвалифицированного сверловщика, отсутствие брака (из-за чувствительности человека)	Вредные условия труда при обработке ПКМ, низкая производительность	++++
2	Машинное сверление	Универсальные станки с технологической оснасткой	Высокая жесткость системы СПИЗ*, работа по программе ЧПУ	Необходимость адаптации, ограниченность рабочей зоны, низкие значения скорости обработки	++++
3	Машинное сверление	Специализированные станки с технологической оснасткой	Высокая жесткость системы СПИЗ, работа по программе ЧПУ	Экономически оправданно при серийном и крупносерийном производстве	+++++
4	Машинное сверление	Робототехнический комплекс	Гибкость, универсальность, производительность	Несовершенство и сложность кинематики	+++++
5	Гидроабразивная резка	Станки гидроабразивной резки	Высокое качество реза, отсутствие износа и расхода инструмента	Отсутствуют научно обоснованные припуски обработки, экономически оправданно в крупносерийном производстве	++++

Окончание таблицы

№ п/п	Метод перфорации	Оборудование и технологическое оснащение	Преимущества	Недостатки	Пригодность к обработке ПКМ
6	Прожиг лазером	Лазерная техника	Высокое качество обработки, отсутствие износа инструмента	Затруднено получение глухих отверстий, экономически оправданно в крупносерийном производстве	++

Примечание. *СПИЗ – Станок – Приспособление – Инструмент – Заготовка.

Несквозная односторонняя перфорация оболочечных конструкций из ПКМ с внутренней стороны существенно ограничивает применение гидроабразивной струйной резки или лазерной техники. А применение лазерной техники приводит к оплавлению обрабатываемых поверхностей [7], хотя в России и в США [8] имеются наработки [9, 10], исключаящие это явление. Исходя из данных таблицы наиболее приемлемым методом перфорации отверстий является традиционная механическая обработка резанием (сверлами). Перфорация имеет высокую трудоемкость, низкий уровень автоматизации. Это приводит к тому, что сверление оболочечных конструкций, как правило, является «узким местом» производственных процессов. Наилучшими средствами оснащения являются специализированные станки или робототехнические комплексы.

Особенности реализации перфорации

Рассмотрим известные примеры использования оборудования и средств технологического оснащения для перфорации с внутренней стороны звукопоглощающих панелей (ЗПК) авиационных двигателей из ПКМ.

На рис. 1 приведен специализированный станок ССП-2 для перфорации ЗПК авиационных двигателей, созданный ЗАО «Завод мехатронных изделий» (ЗАО ЗМИ) по заказу Обнинского научно-производственного предприятия «Технология» им. А.Г. Ромашина. Станок ССП-2 предназначен для скоростного сверления изделий со сложными криволинейными поверхностями из стеклопластиков, пластиков, дерева и других легких металлов двумя специализированными шпинделями одновременно. Размеры рабочей поверхности стола – 1440×2240 мм. В качестве привода перемещений по осям X и Y используются линейные синхронные двигатели. Привод осей Z , W_1 и W_2 осуществляется через высокоточные шариковые винтовые передачи (ШВП), в приводе поворота шпиндельной группы применен червячный беззазорный редуктор

Рис. 1. Специализированный станок ССП-2 (ЗАО ЗМИ)

Gudel (Германия). Частота вращения каждого шпинделя – до 20 000 об/мин. Производительность станка – 4 отверстия в секунду (с учетом работы двух шпинделей). Наибольшие перемещения по осям ($X/Y/Z/W_1/W_2$) – 2000/700/ 350/40/40 мм; $B = \pm 100^\circ$. Точность позиционирования – 0,02 мм. Повторяемость – 0,001 мм. Скорости перемещений по осям ($X/Y/Z/W_1/W_2$) – 174/174/20/20/20 м/мин; поворота (B) – $10^\circ/\text{с}$ (рис. 1).

С помощью станка ССП-2 на НПП «Технология» им. А.Г. Ромашина (г. Обнинск) обрабатываются звукопоглощающие панели авиационных двигателей Sam-146 (Франция, Россия (технология.рф)). Одна из них изображена на рис. 2.

Типовая сборочная единица звукопоглощающей панели изображенная на рис. 2 в форме «лепестка», не замкнута, поэтому с технологической точки зрения формообразовать отверстия с помощью станка ССП-2 реализуемо.

Более сложные геометрические звукопоглощающие панели в форме оболочек авиационных двигателей в России на промышленных предприятиях обрабатывают вручную или с помощью роботизированных комплексов [11, 12].

Возможность использования промышленных роботов для операций сверления, фрезерования зависит от геометрических параметров деталей и заданных допусков. В статьях [12–16] подробно описан роботизированный комплекс для механической обработки оболочечных звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей со сложными поверхностями. Робототехнический комплекс представлен на рис. 3 из работы [13].

Рис. 2. Звукопоглощающая панель авиационного двигателя Sam-146 обнинского НПП «Технология» им. А.Г. Ромашина (технология.рф)

Рис. 3. Роботизированный комплекс на базе робота Kuka

Основой комплекса является робот-манипулятор Kuka KR 60 HA, его основные характеристики приведены ниже.

Характеристики робота-манипулятора Kuka KR 60 HA

Модель		Kuka KR 60 HA	
Тип		Сочлененный	
Количество степеней свободы		6	
Радиус досягаемости, мм		2033	
Точность позиционирования, мм		±0,05	
Грузоподъемность, кг		60	
Углы поворота осей и максимальная угловая скорость		Угол поворота	Максимальная угловая скорость, рад/с
Номер звена (рис. 4)	Звено 1	±185°	2,23
	Звено 2	+35°, –135°	1,78
	Звено 3	+158°, –120°	2,23
	Звено 4	±350°	4,53
	Звено 5	±119°	4,27
	Звено 6	±350°	5,61
Масса, кг		665	

Спецификация робототехнического комплекса включает следующие компоненты:

- робот промышленный Kuka KR 60 HA грузоподъемностью 60 кг;
- пылезащитный герметичный чехол для робота;
- пульт управления с контроллером;
- компьютер с пакетом программ для работы с САМ-файлами;
- шпиндель высокоскоростной сервоприводной мощностью 8 кВт с максимальной скоростью вращения 24 000 об/мин;
- позиционер одноосевой (поворотный стол) с вертикальной осью вращения грузоподъемностью 500 кг;

Рис. 4. Шесть подвижных звеньев робота Kuka

- систему контроля нулевой точки инструмента;
- систему датчиков отслеживания поломки мелкогабаритного инструмента;
- систему вентиляции с местным отсосом и вакуумной фильтрующей установкой;
- патрон сменный для шпинделя;
- цанги для различного режущего инструмента (диаметром 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16 мм);
- магазин автоматический для десяти патронов;
- режущий инструмент;
- приспособление для закрепления изделий;
- ограждения и замки безопасности с монтажным комплектом.

Для обеспечения точности расположения отверстий при перфорации требуется согласованность движений поворотного стола с установленной заготовкой и движениями звена робота со шпинделем. Робот как основа комплекса имеет шесть подвижных звеньев, каждое звено имеет свой диапазон угловых перемещений (см. рис. 4).

У робота Kuka KR 60 HA рабочие зоны представлены на рис. 5.

Рис. 5. Рабочие зоны робота Kuka KR 60 HA: $A = 2498$ мм; $B = 3003$ мм; $C = 2033$ мм; $D = 1218$ мм; $E = 815$ мм; $F = 1084$ мм; $G = 820$ мм

Точность работы робота определяется отклонением фактической траектории его рабочего органа от траектории, заданной управляющей программой. Статистические ошибки позиционирования промышленного робота оценивают по разбросу положений рабочего органа при многократных реализациях программы, т.е. по случайной составляющей, называемой повторяемостью, и средней величине отклонения реального положения звена от заданного программой, так называемой систематической ошибке [17]. У современных роботов повторяемость составляет сотые доли миллиметра, а систематическая составляющая ошибки на порядок превышает повторяемость. Ввиду этого чаще всего у роботизированных комплексов учитывают систематическую ошибку. Величина систематической ошибки зависит от вида процесса обработки управляющей программой: методом обучения или аналитическим программированием [18].

В данном случае метод обучения неприемлем при написании управляющей программы, так как в ручном режиме оператору необходимо перемещать шпиндель робота, да еще для многотысячных положений каждого отверстия ЗПК, что в производственных условиях крайне затруднительно. При аналитическом программировании движения робота базируются на задании перемещений в цикле.

При использовании робота для перфорации отверстия формообразуются в результате сложного сочетания движения всех звеньев и вращательного движения мотор-шпинделя со сверлом.

В результате траектория движения сверла при формообразовании отличается от прямолинейной, сверло входит в отверстие по сложной дуговой траектории (рис. 6). В результате появляется отклонение от круглости, что согласно ГОСТ 24642–83¹ является искажением реального профиля и представляет собой овалообразную фигуру в плане.

Таким образом, из-за отличий траектории движения сверла при подаче, в силу особенности кинематики робота, форма и, следовательно, точность отверстия искажаются. Точность, качество отверстий влияют на их функциональные свойства, например некачественные отверстия в горлах глушителей Гельмгольца изменяют акустические характеристики звукопоглощающих конструкций [5].

Для повышения точности перфорации отверстий рекомендовано дооснастить мотор-шпиндель робототехнического комплекса приводом осевой подачи инструмента – вдоль шестой оси (на рис. 4 по оси А6).

Однако на сегодняшний день у существующего роботизированного комплекса на базе промышленного робота Kuka KR 60 HA алгоритм движения конечного звена построен по принципу навигации в условную ось отверстия с заданными координатами. Движение в ось отверстия с заданными координатами можно решить использованием устройства обратной связи, но этого недостаточно. Исходя из этого при решении задач навигации роботов используют два основных подхода. Глобальный – определение абсолютных координат устройства при движении по траектории. Траектория выбирается еще до начала движения. Локальный – определение координат устройства по отношению к некоторой точке. Планирование задает лишь небольшой отрезок траектории, в конечной точке которого выбирается дальнейшая траектория. Существует многообразие методов локальной навигации, например гистограмма векторного поля [19], потенциальное поле [20, 21], диаграмма близких расстояний [22], тангенциальное избегание [23].

Рис. 6. Перемещение сверла по дуге при формообразовании отверстия

¹ ГОСТ 24642–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения (с изм. № 1).

Отмеченные обстоятельства делают значимыми исследования точности роботов и поиск путей ее повышения. В настоящее время научные работы по теории точности роботов ведутся в следующих направлениях. Первое связано с анализом погрешности позиционирования при заданных ошибках приводов [24] и выбором конфигураций, обеспечивающих минимальную погрешность [25]. Основу второго направления составляют анализ статических и динамических ошибок роботов с упругими звеньями скелета [26] и синтез управления, обеспечивающий гашение колебаний в них [27]. И третье направление – создание методов и средств оценки качества функционирования роботов [28, 29].

Многие из упомянутых работ с подходами к проблеме точности роботов носят подтверждающий характер, в то время как необходимы активные подходы с трансформацией разработанных методик и методов, например создание адаптивных роботов.

Рассмотрим метод тангенциальных избеганий для описания наведения робота к осям отверстий. В работах [30, 31] в отношении алгоритма навигации робота среди движущихся и деформируемых препятствий утверждается, что наиболее подходящим методом для решения нашей задачи является метод тангенциального избегания, впервые описанный профессором Марио Сарцинелли из Университета Эспириту-Санту (Витория, Бразилия).

Модель робота

Для начала опишем математическую модель, определяющую движение робота к цели, в полярных координатах:

$$\begin{cases} \dot{\rho} = -v \cos \alpha; \\ \dot{\alpha} = -\omega + v \frac{\sin \alpha}{\rho}; \\ \dot{\theta} = -v \frac{\sin \alpha}{\rho}, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – расстояние до целевой точки; α – курсовой угол; θ – угол между осью координат отверстий и направлением на целевую точку (азимут); v – линейная скорость робота; ω – угловая скорость.

Робот может полностью управляться с помощью значений линейных и угловых скоростей (v , ω), поэтому нужно найти такие их значения, чтобы выполнялось условие поставленной задачи ($\rho \rightarrow 0$, $\alpha \rightarrow 0$). Для этого предлагается воспользоваться аппаратом функции Ляпунова [31]. Это будет квадратичная функция, включающая в себя расстояние до цели и курсовой угол:

$$V(\rho, \alpha) = \frac{1}{2}\rho^2 + \frac{1}{2}\alpha^2.$$

Производная по времени не должна быть положительна для того, чтобы расстояние до цели и курсовой угол не возрастали. Производная выглядит следующим образом:

$$\dot{V}(\rho, \alpha) = \rho \dot{\rho} + \alpha \dot{\alpha}. \quad (2)$$

Выразив производную (2) через уравнения модели (1), получим

$$\dot{V}(\rho, \alpha) = -\rho v \cos \alpha + \alpha \left(-\omega + v \frac{\sin \alpha}{\rho} \right). \quad (3)$$

В выражении (3) производная определена отрицательно.

Тогда в качестве управляющего воздействия из функции Ляпунова получим следующее значение скоростей:

$$\begin{cases} v = \rho \cos \alpha; \\ \omega = k_{\omega} \alpha + v_{\max} \frac{v}{\rho} \sin \alpha. \end{cases}$$

С помощью данного описания может быть реализовано движение робота со шпинделем к оси отверстий.

Теперь рассмотрим динамическую модель робота с n -сочленениями. Итак, дано

$$B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = \tau; \quad (4)$$

$$n(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + F_v\dot{q} + F_s \operatorname{sgn}(\dot{q}) + g(q), \quad (5)$$

где $B(q)\ddot{q} \in R^{n \times n}$ – матрица инерций; $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ – центробежные и кориолисовы моменты; $F_v \in R^{n \times n}$ – матрица вязкого трения; $F_s \in R^{n \times n}$ – матрица статического трения; $g(q) \in R^n$ – вектор гравитационных моментов; $\tau \in R^n$ – крутящий момент электродвигателя. Система уравнений (4), (5) представляет собой нелинейную спаренную модель. В дальнейшем для упрощения зависимости от времени переменных управления было сделано допущение $(q) = q(t)$ и $(\dot{q}) = \dot{q}(t)$.

На основе динамической модели робота (4), (5) предположим, что q_{ref} – опорный сигнал для звеньев робота и $\dot{q}_{\text{ref}} \in R^n$ – первая производная по времени опорного сигнала звеньев, заданная априори. Предполагается, что компоненты q_{ref} ограничены и $\dot{q}_{\text{ref}}$ – непрерывная функция Липшица. Ошибки отслеживания определяются как

$$e_1 = q_{\text{ref}} - q,$$

$$e_2 = \dot{q}_{\text{ref}} - \dot{q},$$

так что $e = [e_1 \ e_2]^T = [e_1 \ e_2]^T$.

Пусть $e_j = [e_{1j} \ e_{2j}]^T$ – ошибка положения и ошибка скорости звена робота j , $j = 1, \dots, n$, с количеством звеньев n у манипулятора. В работе [32] решена задача управления классическим роботом с проблемой управления движением, где звенья должны следовать заданной траектории.

Предлагается, что робот-манипулятор оснащен датчиками и решателями и крутящий момент, приложенный каждым звеном, можно измерить, чтобы реализовать предложенную схему. Решающим является получение значения эффективной оценки члена, который учитывает связь и немодельную динамику. С этой целью конструкция контроллера типа ISM позволяет оценить неопределенности, действующие на систему роботизированного комплекса, тем самым решить основную задачу повышения точности.

Рассмотрим j -й сустав робота. Цель заключается в разработке закона управления ISM, который нужно использовать в децентрализованном и централизованном вариантах. ISM, как правило, характеризуется контролем переменной $v_j(t)$, разделенной на две части:

$$v_j(t) = u_j(t) + u_{\text{ISM}j}(t),$$

где $u_j(t)$ генерируется подходящим контроллером с опорой на номинальную модель (т.е. модель при условии, что никакой неопределенности нет) и $u_{\text{ISM}j}(t)$ является скользящим режимом (прерывистым), управляющим действием, разработанным для того, чтобы отклонить неопреде-

ленности, влияющие на систему. В частности, последний разработан на основе ошибок e_{1j} , e_{2j} , определяемых заранее. Модель ошибок, описывающая таким образом динамику ошибок, может быть записана в форме

$$\dot{e}_j(t) = A_j e_j(t) + B_j (v_j(t) + h_j(t)), \quad (6)$$

где матрицы A_j , B_j могут быть выведены в децентрализованные и централизованные варианты. В уравнении (6) $v_j(t)$ и $h_j(t)$ содержатся децентрализованные компоненты $v_{\text{dec } j}$ и $h_{\text{dec } j}$ или централизованные компоненты $v_{\text{cen } j}$ и $h_{\text{cen } j}$ для $j = 1, \dots, n$ в зависимости от случая.

Так называемое интегральное изменяющееся множество выбрано как

$$\Sigma_j(t) = \sigma_j(t) + \varphi_j(t) = 0,$$

где Σ_j – вспомогательная скользящая переменная; σ_j – фактическая переменная скольжения, равная ошибке положения сустава ($\sigma_j = m e_{1j} + e_{2j}$, где m – положительная константа); φ_j – интегральный член.

Интегральный член определяется как

$$\varphi_j(t) = -\sigma_j(t_0) - \int_{t_0}^t m e_{2j}(\zeta) + u_j(\zeta) d\zeta$$

с начальным условием $\varphi_j(t_0) = -\sigma_j(t_0)$. Тогда закон прерываемого управления определяется как $u_{\text{ISM } j}(t) = -K_j \text{sgn}(\Sigma_j(t))$.

Целью описанного процесса является поиск принятия решения о том, какая стратегия управления и какая структура управления подходят для удовлетворения требований с точки зрения производительности или точности, с учетом того, что частые изменения структуры управления могут вызвать чрезмерную нагрузку на механическую систему. Стоит учитывать, что децентрализованные структуры дороже, чем одна централизованная.

Разработанное пространство состояний состоит из значений эффектов связи, реализованных ISM-регуляторами, улавливающими крутящий момент каждого звена, скорости и ускорения ошибки для каждого звена.

Заключение

На практике выявлено появление погрешности, обусловленной несовершенством кинематики робота при перфорации отверстий. В статье представлена усовершенствованная схема управления движением для роботов-манипуляторов, основанных на использовании децентрализованной структуры управления и централизованного управления на основе динамики. Схема имеет саморегулирующую возможность благодаря наличию механизмов принятия решений, которые используют переключения в качестве альтернативы активировать одну из двух управляющих структур. Предложенный подход опирается на модель промышленного антропоморфного робота-манипулятора Кука KR 60 НА.

Проблема решается размещением датчиков на подвижных звеньях, надстройкой системы динамического управления, благодаря чему расширяются технологические возможности робота и повышается точность перфорации отверстий.

Библиографический список

1. Григолюк Э.И., Фильштинский Л.А. Перфорированные пластины и оболочки. – М.: Наука, 1970. – 556 с.
2. Безпальчук С.Н., Буцанец А.А., Петров В.М. Обобщенная модель состояния качества поверхности ответственных деталей судовых энергетических установок, выполненных из композиционных углепластиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2015. – № 1(29). – С. 97–102.

3. Белецкий Е.Н., Петров В.М., Сойту Н.Ю. Особенности процесса резания композиционных углепластиков лезвийным инструментом без охлаждения и с модифицированными смазочно-охлаждающими технологическими средами // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 3, № 1(40). – С. 42–46.
4. Дударев А.С. Геометрические характеристики качества поверхностей изделий из полимерных композиционных материалов // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 1. – С. 178–182.
5. Влияние качества формообразования отверстий звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей на акустические характеристики / А.С. Дударев, О.Ю. Кустов, И.В. Храмцов, А.В. Подвинцев // Авиационная промышленность. – 2017. – № 2. – С. 50–53.
6. Дударев А.С. Исследование усадки просверленных отверстий в полимерных композиционных материалах // Изв. вузов. Машиностроение. – 2016. – № 8(677). – С. 77–87.
7. Влияние лазерной обработки на структуру и упругие свойства углерод-углеродных композитов / С.И. Кузнецов, А.В. Камашев, А.Л. Петров, Е.Ю. Тарасова // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2004. – Т. 6, № 1. – С. 65.
8. High-power picosecond laser drilling/machining of carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites / A. Salama, L. Li, Paul Mativenga, A. Sabli // Appl. Phys. – February 2016. – A 122 (2). DOI: 10.1007/s00339-016-9607-8
9. Кузнецов С.И., Петров А.Л. Применение лазерного излучения для модификации поверхности и раскрой углеродных композиционных материалов и углеродных тканей // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2003. – Т. 5, № 1. – С. 46–54.
10. Гуреев Д.М., Кузнецов С.И., Петров А.Л. Лазерный раскрой углеродных композиционных материалов // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 1999. – Т. 1, № 2. – С. 255–264.
11. Кованов А.Е. Исследование методов перфорации многослойных звукопоглощающих конструкций из полимерных композиционных материалов // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: тез. докл. XXI Междунар. науч.-техн. конф., г. Обнинск, 15–7 октября 2016 г. – Обнинск, 2016. – С. 164–165.
12. Дударев А.С. Проблемы автоматизации при выполнении операций перфорации отверстий в звукопоглощающих панелях авиационных двигателей из полимерных композиционных материалов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2012. – № 3. – С. 63–68.
13. Дударев А.С., Свирщев В.И., Баяндин М.А. Роботизированный комплекс для перфорации отверстий и фрезерования звукопоглощающих панелей авиационных двигателей из полимерных композиционных материалов // Автоматизация и современные технологии. – 2013. – № 1. – С. 9–14.
14. Dudarev A. Machining automated system for drilling and milling of polymer composite materials // Int. J. of Innov. and Inform. Manuf. Techn. – 2015. – No. 2. – P. 5–9.
15. Dudarev A. The problem sensitization robotic complex drilling and milling of sandwich shells of polymer composites // Proceed. of the 4th Int. Conf. on Appl. Innov. in IT, Koethen, March 10th 2016 / Anhalt Univ. of Applied Sciences: Edition Hochschule Anhalt. – 2016. – Vol. 4. – P. 15–19.
16. Дударев А.С. Инновационное применение роботов для производства изделий из полимерных композиционных материалов // СТИН. – 2018. – № 10. – С. 2–6.
17. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники. – М.: Наука, 2006. – Кн. 1. – 383 с.
18. Шахинпур М. Курс робототехники / пер. с англ. С.С. Дмитриева. – М.: Мир, 1990. – 527 с.
19. Borenstein J., Koren Y. The vector field histogram – fast obstacle avoidance for mobile robots // IEEE Trans. on Robot. and Autom. – 1991. – Vol. 7, no. 3. – P. 278–288. DOI: 10.1109/70.88137
20. Khatib Oussama. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // The Int. J. of Robot. Res. – 1986. – Vol. 5, no. 1. – P. 90–98.
21. Rubagotti M., Vedova M., Ferrara A. Time-optimal sliding-mode control of a mobile robot in a dynamic environment // IET Control Theory and Appl. – December 2011. – P. 2–19.
22. Minguez J., Montano L. Nearness diagram (ND) navigation: collision avoidance in troublesome scenarios // IEEE Trans. on Robot. and Autom. – March 2004. – P. 45–59.
23. An approach to avoid obstacles in mobile robot navigation: the tangential escape / A. Ferreira, F. Pereira, R. Vassallo, T. Filho, M. Filho // Revista Controle & Automac. – 2008. – Vol. 19, no. 4. – P. 395–405.
24. Воробьев Е.И. Матричный метод определения точностных характеристик механизмов роботов и манипуляторов // Сб. науч.-метод. ст. по теории машин и механизмов. – М.: Высшая школа, 1979. – Вып. 9. – С. 45–48.

25. Динамика управления роботами / В.В. Козлов, В.П. Макарычев [и др.]. – М.: Наука, 1984. – 336 с.
26. Буляткин В.П. Методы компенсации упругих деформаций механизмов промышленных роботов: дис. ... канд. техн. наук / Иркут. политехн. ин-т. – Иркутск, 1984. – 201 с.
27. Елисеев С.В., Ченских В.Р., Хвощевский Г.И. Промышленные роботы. Некоторые проблемы внедрения. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 1982. – 361 с.
28. Колискор А.Ш., Коченов М.И. Методы проверки точности функционирования промышленных роботов // Станки и инструмент. – 1978. – № 8. – С. 7–21.
29. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Модель Б.И. К решению прямой задачи о положениях однокоординатных механизмов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1991. – № 2. – С. 100–105.
30. Matveev A.S., Hoy M.C., Savkin A.V. A globally converging algorithm for reactive robot navigation among moving and deforming obstacles // Automatica. – 2015. – No. 54. – P. 292–304.
31. Бобцов А.А., Добриборщ Д., Капитонов А.А. Система навигации и управления движением мобильного робота // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 365–367.
32. Deep reinforcement learning based self-configuring integral sliding mode control scheme for robot manipulators / B. Sangiovanni, G.P. Incremona, A. Ferrara, M. Piastra // 2018 IEEE Conf. on Decision and Control (CDC), Miami Beach, FL, USA, December 17–19, 2018. – 2018. – P. 5969–5974.

References

1. Grigolyuk E.I., Filshinskiy L.A. Perforirovannyye plastyiny i obolochki [Perforated plates and shells]. Moscow: Nauka, 1970, 556 p.
2. Bezpalchuk S.N., Butsanets A.A., Petrov V.M. Obobshchennaya model sostoyaniya kachestva poverkhnosti otvetstvennykh detaley sudovykh energeticheskikh ustanovok, vypolnennykh iz kompozitsionnykh ugleplastikov [A generalized model of the state of surface quality of critical parts of ship power plants made of composite carbon plastics]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota iM. admirala S.O. Makarova*, 2015, no. 1(29), pp. 97–102.
3. Beletskiy E.N., Petrov V.M., Soytu N.Yu. Osobennosti protsessa rezaniya kompozitsionnykh ugleplastikov lezviynym instrumentom bez okhlazhdeniya i s modifitsirovannymi smazочно-okhlazhdayushchimi tekhnologicheskimi sredami [Features of the process of cutting composite carbon fiber with a blade tool without cooling and with modified coolant-cutting technological media]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, Vol. 3, no. 1(40), pp. 42–46.
4. Dudarev A.S. Geometricheskiye kharakteristiki kachestva poverkhnostey izdeliy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Geometric characteristics of the quality of surfaces of products from polymer composite materials]. "Izvestiya Tula State University" (Izvestiya TulGU), 2013, Vol. 1, pp. 178–182.
5. Dudarev A.S., Kustov O.Yu., KHramtsov I.V., Podvintsev A.V. Vliyanie kachestva formoobrazovaniya otverstiy zvukopogloshchayushchikh konstruktivnykh aviatsionnykh dvigateley na akusticheskiye kharakteristiki [The influence of the quality of the formation of the holes of the sound-absorbing structures of aircraft engines on the acoustic characteristics]. *Aviation Industry*, 2017, no. 2, pp. 50–53.
6. Dudarev A.S. Issledovaniye usadki prosvetlennykh otverstiy v polimernykh kompozitsionnykh materialakh [The study of the shrinkage of drilled holes in polymer composite materials] // *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 8(677), pp. 77–87.
7. Kuznetsov S.I., Kamashev A.V., Petrov A.L., Tarasova E.Yu. Vliyanie lazernoy obrabotki na strukturu i uprugkiye svoystva uglerod-uglerodnykh kompozitov [The effect of laser treatment on the structure and elastic properties of carbon-carbon composites]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2004, Vol. 6, no. 1, P. 65.
8. Salama A., Li L., Mativenga Paul, Sabli, A. High-power picosecond laser drilling/machining of carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites // *Applied Physics*, A 122 (2), February 2016 (DOI: 10.1007/s00339-016-9607-8).
9. Kuznetsov S.I., Petrov A.L. Primeneniye lazernogo izlucheniya dlya modifikatsii poverkhnosti i raskroya uglerodnykh kompozitsionnykh materialov i uglerodnykh tkaney [The use of laser radiation for surface modification and cutting of carbon composite materials and carbon fabrics]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2003, Vol. 5, no. 1, pp. 46–54.
10. Gureyev D.M., Kuznetsov S.I., Petrov A.L. Lazernyy raskroy uglerodnykh kompozitsionnykh materialov [Laser cutting of carbon composite materials]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 1999, Vol. 1, no. 2, pp. 255–264.

11. Kovanov A.E. Issledovaniye metodov perforatsii mnogosloynnykh zvukopogloshchayushchikh konstruksiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Investigation of methods for perforation of multi-layer sound-absorbing structures made of polymer composite materials]. *Abstracts of reports XXI Intern. scientific and technical conf. "Constructions and technologies for producing products from non-metallic materials"*, Obninsk, 15-17 Oct. 2016, pp. 164-165.
12. Dudarev A.S. Problemy avtomatizatsii pri vypolnenii operatsiy perforatsii otverstiy v zvukopogloshchayushchikh panelyakh aviatsionnykh dvigateley iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Problems of automation in performing hole perforation operations in sound-absorbing panels of aircraft engines made from polymeric composite materials]. *Engineering and Automation Problems*, 2012, no. 3, pp. 63-68.
13. Dudarev A.S., Svirshchev V.I., Bayandin M.A. Robotizirovanny kompleks dlya perforatsii otverstiy i frezerovaniya zvukopogloshchayushchikh paneley aviatsionnykh dvigateley iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Robotic complex for perforation of holes and milling of sound-absorbing panels of aircraft engines from polymer composite materials]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii*, 2013, no. 1, pp. 9-14.
14. Dudarev Aleksandr. Machining automated system for drilling and milling of polymer composite materials. *International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies*, 2015, no. 2. Pp. 5-9.
15. The Problem Sensitization Robotic Complex Drilling and Milling of Sandwich Shells of Polymer Composites / A. Dudarev // *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Innovations in IT [Electronic resource]: Koethen, March 10th, 2016 / Anhalt Univ. of Applied Sciences: Edition Hochschule Anhalt, 2016. Vol. 4. P. 15-19.*
16. Dudarev A.S. Innovatsionnoye primeneniye robotov dlya proizvodstva izdeliy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Innovative use of robots for the production of products from polymer composite materials]. *Journal STIN*, 2018, no. 10, pp. 2-6.
17. Korendyasev A.I. Teoreticheskiye osnovy robototekhniki [Theoretical foundations of robotics]. Moscow: Nauka, 2006, Book № 1, 383 p.
18. Shakhinpur M. Kurs robototekhniki [Robotics lectures], trans. from English S.S. Dmitrieva. Moscow: MIR, 1990, 527 p.
19. Borenstein J., Koren Y. The vector field histogram – fast obstacle avoidance for mobile robots // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1991. V. 7. N 3. P. 278–288. (DOI: 10.1109/70.88137).
20. Khatib Oussama. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots//*The International Journal of Robotics Research*, 1986, Vol. 5, No. 1. Pp. 90-98.
21. Rubagotti M., Vedova M., Ferrara A. Time-optimal sliding-mode control of a mobile robot in a dynamic environment // *IET Control Theory and Applications*, December, 2011. Pp. 2-19.
22. Minguez J., Montano L. Nearness Diagram (ND) Navigation: Collision Avoidance in Troublesome Scenarios // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, March, 2004. Pp. 45-59.
23. Ferreira A., Pereira F., Vassallo R., Filho T., Filho M. An approach to avoid obstacles in mobile robot navigation: the tangential escape // *Revista Controle & Automac*, 2008, Vol. 19, No. 4. Pp. 395-405.
24. Vorobyev E.I. Matrichnyy metod opredeleniya tochnostnykh kharakteristik mekhanizmov robotov i manipulyatorov [Matrix method for determining the accuracy characteristics of the mechanisms of robots and manipulators. scientific and methodological articles on the theory of machines and mechanisms]. *Sbornik nauchno-metodicheskii statei po teorii mashin i mekhanizmov*, Moscow: Vysshaya shkola, 1979, Vol. 9, pp. 45-48.
25. Kozlov V.V., Makarychev V.P. [et al]. Dinamika upravleniya robotami [Dynamics of control robots]. Moscow: Nauka, 1984, 336 p.
26. Bulyatkin V.P. Metody kompensatsii uprugikh deformatsiy mekhanizmov promyshlennykh robotov [Methods of compensation for the elastic deformations of the mechanisms of industrial robots]. Dissert. for the degree of candidate of techn. Sciences, Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 1984, 201 p.
27. Eliseyev S.V., Chenskikh V.R., Khvoshchevskiy G.I. Promyshlennyye roboty. Nekotoryye problemy vnedreniya [Industrial robots. Some problems of implementation]. Irkutsk: Irkutsk State University, 1982, 361 p.
28. Koliskor A.Sh., Kochenov M.I. Metody proverki tochnosti funktsionirovaniya promyshlennykh robotov [Methods for testing the accuracy of industrial robots]. *Journal STIN*, 1978, no. 8, pp. 7-21.
29. Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Model B.I. K resheniyu pryamoy zadachi o polozheniyakh l-koordinatnykh mekhanizmov [To solving the direct problem of the positions of the l-coordinate mechanisms]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 1991, no. 2, pp. 100-105.
30. Matveev A.S., Hoy M.C., Savkin A.V. A globally converging algorithm for reactive robot navigation among moving and deforming obstacles // *Automatica*, 2015, no. 54, pp. 292-304.

31. Bobtsov A.A., Dobriborshch D., Kapitonov A.A. Sistema navigatsii i upravleniya dvizheniyem mobilnogo robota [Navigation and motion control system of a mobile robot]. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2017, Vol. 17, no. 2, pp 365-367.

32. Sangiovanni B., Incremona G.P., Ferrara A., Piastra M. Deep Reinforcement Learning Based Self-Configuring Integral Sliding Mode Control Scheme for Robot Manipulators // 2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC) Miami Beach, FL, USA, Dec. 17-19, 2018, pp. 5969-5974.

Сведения об авторах

Дударев Александр Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: fanta88@mail.ru).

Подвинцев Александр Викторович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29), инженер-программист АО «Пермский завод “Машиностроитель”» (614014, г. Пермь, ул. Новозвягинская, 57, e-mail: podvintsev_ktn@mail.ru).

About the authors

Aleksandr S. Dudarev (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor of Innovative Engineering Technologies Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: fanta88@mail.ru).

Aleksandr V. Podvintsev (Perm, Russian Federation) – PhD Student of Innovative Engineering Technologies Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation), Engineer JSC “Perm Plant “Mashinostroitel” (57, Novozvyaginskaya st., Perm, 614014, Russian Federation, e-mail: podvintsev_ktn@mail.ru).

Получено 17.06.2019