

Математическая модель процесса сопряжения соединения «вал-втулка» с помощью активного средства адаптации при трехточечном контакте*

Вартанов М.В., Нгуен Ван Зунг, Нгуен Ван Линь

Московский политехнический университет

г. Москва, Российская Федерация

natalia.vartanova@bk.ru, trandinhvan1221@gmail.com, nguyendungpt45@gmail.com

Аннотация. К настоящему времени известен ряд методов роботизированной сборки цилиндрических соединений. Однако многие из них основаны на предположении, что вал и втулка точно сцентрированы до начала сопряжения. На практике, если имеется большое несовпадение положения вала и втулки может возникнуть заклинивание или деформация в процессе сборки. В данной статье предлагается способ определения положения вала и втулки с помощью силомоментного датчика. Создана модель трехточечного контакта, и с помощью силового и геометрического анализа оценивается несоосность положения вала и отверстия. Модели построены в квазистатической постановке. Экспериментальная установка на основе промышленного робота ABB IRB-140 с контролером IRC5, сопряженные детали с зазором 0,04 мм для подтверждения эффективности предлагаемого способа. При проведении эксперимента использованы экспериментальные значения коэффициента трения, полученные авторами ранее. В результате эксперимента получены закономерности изменений значений сил, моментов и углов перекоса вала, характеризующие этап сопряжения. Обсуждается согласованность аналитического решения и результатов физического эксперимента.

Ключевые слова: промышленный робот, силомоментный датчик, трехточечный контакт, автоматическая сборка.

ВВЕДЕНИЕ

Сопряжение вала со втулкой является классической задачей в процессах сборки. За последние годы разработан ряд методов роботизированной сборки. Известны пассивные методы, на основе податливого удаленного центра [1] и активные методы, такие как контроль импеданса [2], контроль допуска [3] и гибридное управление силой и скоростью [4]. Общая идея методов в том, чтобы изменить номинальную траекторию в режиме онлайн для минимизации контактного усилия при сопряжении. В работах [5, 6] позиция втулки оценена техническим зрением с обратной связью и автономным выравниванием с помощью визуального сервоуправления.

Однако подобные методы требуют дополнительных видеодатчиков, что увеличивает стоимость и сложность системы. Для решения этих проблем в настоящей работе предлагается метод на основе применения активной адаптации, в котором используется силомоментный датчик для оценки относительного положения вала при трехточечном контакте.

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

ЭТАПЫ ПРОЦЕССА СОПРЯЖЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ

Этапы сопряжения при автоматической сборке вала с фасками показаны на рис. 1. Робот перемещает вал на программный шаг, чтобы вал приблизился ко втулке в направлении оси z базовой системы координат. Контакт по фаскам возникает на начальном этапе сопряжения из-за погрешностей технологической системы (рис. 1а). На данном этапе необходимо скорректировать положение выходного звена робота (рис. 1б, в). При выполнении ряда корректировок положения выходного звена робота вал может быть успешно собран, как показано на рис. 1г).

Для достижения высокой точности в процессе сборки необходимо решение следующих задач:

- определение сил и моментов, возникающих в процессе сопряжения в режиме онлайн;
- идентификация контактного состояния на основе создания и применения модели анализа для определения текущего состояния контакта в соответствии с текущими значениями сил и моментов;
- корректировка положения выходного звена робота: на основе математических моделей этапов сопряжения и применения алгоритма управления положением робота.

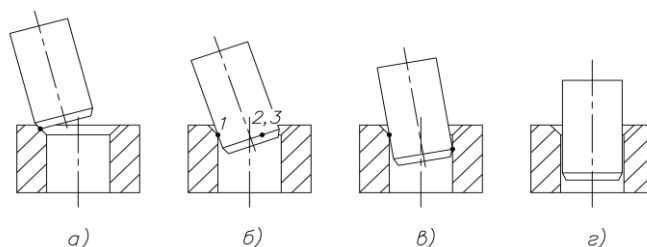


Рис. 1. Этапы сопряжения вала со втулкой:

а – контакт по фаскам, б – трехточечный контакт,

в – двухточечный контакт, г – конечное положение вала

АНАЛИЗ СИЛ ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ КОНТАКТЕ

Как показано на рис. 2, система координат датчика $O_{дат}xZ$ связана с его центральной точкой $O_{дат}$, ось $O_{дат}z$, совпадает с осью схвата, а $O_{дат}x$ выбирается так, чтобы вал и втулка были симметричны относительно плоскости $O_{дат}xZ$. Обозначим точку на цилиндрической поверхности вала А, а две другие симметричные точки на торце втулки

B_1 и B_2 [7-12]. В точке контакта A возникает нормальная сила \vec{N}_A и сила трения \vec{F}_A . В точках контакта B_1 и B_2 соответственно возникают нормальные силы \vec{N}_1 и \vec{N}_2 , а также силы трения \vec{F}_1 и \vec{F}_2 . В работе [7] была определена схема сил, действующих на вал в случае трехточечного контакта, описываемая соотношениями (1-3).

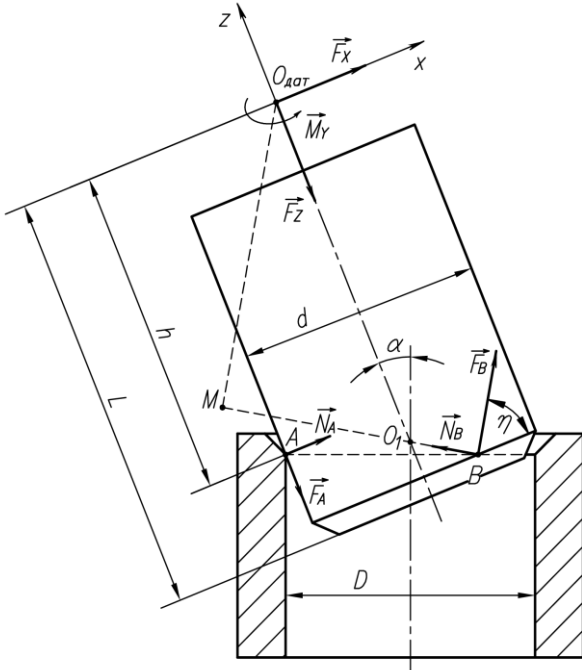


Рис. 2. Схема действия сил на вал при трехточечном контакте

При плоскопараллельном движении вала нормальные реакции в симметричных точках контакта будут равны по модулю. Их равнодействующая N_B проходит через точку O_1 . Тогда модуль равнодействующей N_B равен:

$$N_B = 2N_{B_1} \sin \theta, \quad (1)$$

где θ - угол между B_1O_1 и B_1B_2 (рис. 3).

Равнодействующая сил трения расположена в плоскости симметрии деталей и приложена в точке B (середина отрезка B_1B_2) соединяющего симметричные точки контакта, параллельна силам F_1, F_2 и равна их сумме:

$$F_B = F_{B_1} + F_{B_2} = 2fN_{B_1}, \quad (2)$$

где f - коэффициент трения.

Сила трения в точке A равна:

$$F_A = fN_A \quad (3)$$

Силы в трех точках контакта формируют сборочную силу F_X, F_Z и крутящий момент M_Y в центральной точке $O_{дат}$. Уравнения равновесия имеют вид:

$$\begin{aligned} \sum F_{kx} &= F_X + N_A - N_B \sin \eta + F_B \cos \eta = 0 \\ \sum F_{kz} &= -F_Z - F_A + N_B \cos \eta + F_B \sin \eta = 0 \end{aligned}, \quad (4)$$

$$\sum M_{O_{дат}}(F_k) = hN_A + \frac{d}{2}F_A - N_B O_{дат}M + F_B MB + M_Y = 0$$

где h - расстояние между A и $O_{дат}$ по $O_{дат}Z$;

β - угол между \vec{F}_B и $O_{дат}x$.

Подставляя значения (1-3) в (4) уравнения равновесия примут вид:

$$\begin{aligned} F_X &= -N_A + 2N_{B_1} \sin \theta \sin \eta - 2fN_{B_1} \cos \eta \\ F_Z &= -fN_A + 2N_{B_1} \sin \theta \cos \eta + 2fN_{B_1} \sin \eta \end{aligned} \quad (5)$$

$$M_Y = -hN_A - \frac{d}{2}fN_A + 2N_{B_1} O_{дат}M \sin \theta - 2fN_{B_1} MB$$

Значения реакций N_A и N_{B_1} определяются из первых двух уравнений системы (5):

$$N_A = - \frac{f(F_X \sin \eta + F_Z \cos \eta)}{(f^2 + \sin \theta) \cos \eta + f \sin \eta (1 - \sin \theta)} - \frac{\sin \theta (F_X \cos \eta - F_Z \sin \eta)}{(f^2 + \sin \theta) \cos \eta + f \sin \eta (1 - \sin \theta)} \quad (6)$$

$$N_{B_1} = \frac{F_Z - fF_X}{2(f^2 + \sin \theta) \cos \eta + f \sin \eta (1 - \sin \theta)}$$

Подставляя значения (6) в (5), можно получить:

$$\begin{aligned} M_Y &= \frac{f(h + \frac{d}{2}f)(F_X \sin \eta + F_Z \cos \eta)}{(f^2 + \sin \theta) \cos \eta + f \sin \eta (1 - \sin \theta)} + \\ &+ \frac{(h + \frac{d}{2}f) \sin \theta (F_X \cos \eta - F_Z \sin \eta)}{(f^2 + \sin \theta) \cos \eta + f \sin \eta (1 - \sin \theta)} + \\ &+ \frac{(F_Z - fF_X)(O_{дат}M \sin \theta - fMB)}{(f^2 + \sin \theta) \cos \eta + f \sin \eta (1 - \sin \theta)} \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнение (7) показывает, что $h, O_{дат}M, MB, \theta$ и η формируют ограничения равенства по отношению к измерениям силомоментного датчика. Из геометрического анализа следует, что $h, O_{дат}M, MB, \theta$ и η являются функциями угла наклона α .

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРЕХТОЧЕЧНОГО КОНТАКТА

Для определения геометрических параметров относительного расположения деталей рассмотрим рис. 3.

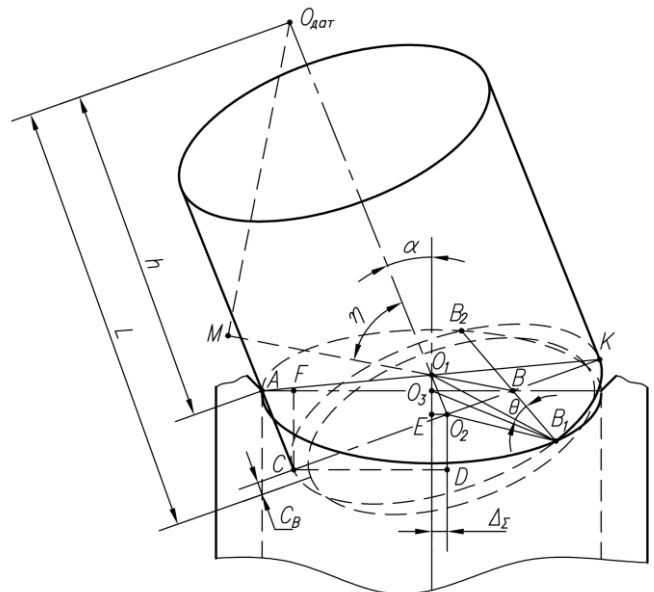


Рис. 3. Геометрический анализ трехточечного контакта

На практике зазор между валом и отверстием является малой величиной, поэтому предположим, что $D \approx d$. После преобразований значение $h, O_{дат}M, MB, \theta$ и η можно определить следующими выражениями.

$$h = L - C_B - \frac{d(1 - \cos \alpha)}{\sin \alpha} = L - C_B - dtg \frac{\alpha}{2} \quad (8)$$

$$O_{дат} M = \left(L - C_B - \frac{dtg \frac{\alpha}{2}}{2} \right) \sin \frac{\alpha}{2} \quad (9)$$

$$MB = \left(L - C_B - \frac{dtg \frac{\alpha}{2}}{2} \right) \cos \frac{\alpha}{2} + \frac{dtg \frac{\alpha}{2}}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} \quad (10)$$

$$\sin \theta = tg \frac{\alpha}{2} \quad (11)$$

$$\sin \eta = \sin \frac{\alpha}{2} \quad (12)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ВАЛА ОТНОСИТЕЛЬНО ОТВЕРСТИЯ

Подставляя (8-12) в (7) приходим к уравнению с единственной неизвестной переменной:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{2} [-f(f+1)F_x + (f-1)F_z] tg^3 \frac{\alpha}{2} \\ & + \left[f \left(-M_y + \frac{d}{2} F_z \right) + \left[f(L - C_B + d) + d \right] F_x \right] tg^2 \frac{\alpha}{2} \\ & + \left[(f+1)M_y + fdF_z - (f+1) \left(L - C_B + \frac{d}{2} f \right) F_x \right] tg \frac{\alpha}{2} \\ & + f^2 \left[M_y - \frac{d}{2} F_z - (L - C_B) F_x \right] = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Однако, при использовании силомоментного датчика показания снимаются в виде сил и моментов, направленных вдоль трех осей координат: ось $O_{дат}z_{дат}$ направлена вдоль оси вала, а оси $O_{дат}x_{дат}$ и $O_{дат}y_{дат}$ ей перпендикулярны и лежат в плоскости поперечного сечения оси вала. С силомоментного датчика фактически снимаются проекции вектора силы на оси координат F_{x1} , F_{y1} , F_{z1} и проекции вектора момента M_{x1} , M_{y1} , M_{z1} . Для решения поставленной задачи необходимо представить силу в виде двух составляющих: осевой \vec{F}_z и радиальной \vec{F}_x , лежащих в плоскости контакта [13, 14]:

$$\vec{F}_z = \vec{k}_1 F_{z1}, \quad (14)$$

где \vec{k}_1 – орт оси $O_{дат}z_{дат}$.

Модуль силы \vec{F}_x можно определить как:

$$F_x = \sqrt{F_{x1}^2 + F_{y1}^2} \quad (15)$$

Направление вектора \vec{F}_x определяется направляющими косинусами углов между вектором силы и положительными направлениями осей координат, которые определяют положение точек контакта A и B относительно осей $O_{дат}x_{дат}$ и $O_{дат}y_{дат}$.

Аналогичным образом определяем вектор момента. Получив с датчика проекции M_{x1} , M_{y1} вектора \vec{M}_y , можно вычислить его модуль [13, 14]:

$$M_y = \sqrt{M_{x1}^2 + M_{y1}^2} \quad (16)$$

Решив уравнение (13) в среде MATLAB, получаем предельное значение угла перекоса α , который описывает смещение относительной ориентации вала и отверстия в состоянии трехточечного контакта.

Кроме того, в целях программирования (поскольку это позволяет роботу перемещаться в системе координат рабочего объекта) необходимо задать предельное относительное смещение осей. Из треугольников $O_3O_2O_1$ и FAC получаем (рис. 3):

$$EO_2 = \frac{AF}{2} \quad (17)$$

Рассмотрим геометрические соотношения из рис. 3:

$$\begin{aligned} \Delta_\Sigma &= AO_3 - CD, \\ CD &= \frac{d \cos \alpha}{2} \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда предельное значение Δ_Σ относительного смещения осей можно определить как:

$$\Delta_\Sigma = AO_3 - CD = \frac{D - d \cos \alpha}{2} \quad (18)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проверки математической модели была создана экспериментальная установка, показанная на рисунке 4 и состоящая из робота (ABB IRC-140), выполняющего задачи сборки типа «вал-втулка» жестких деталей [14].

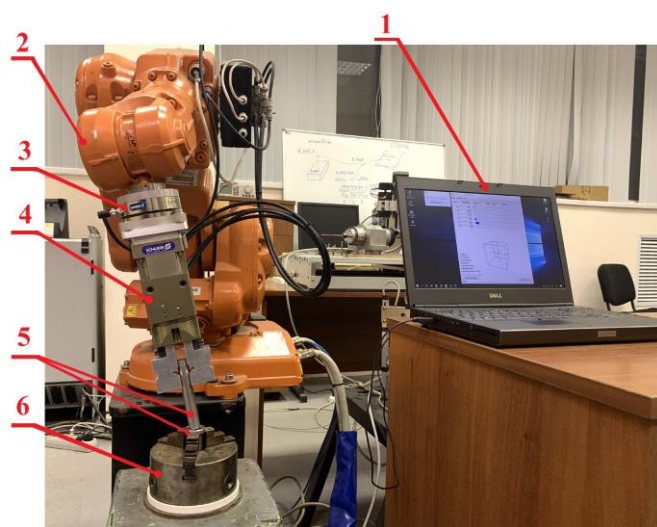


Рис. 4. Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки:

- 1 – персональный компьютер; 2 – робот ABB IRB 140;
- 3 – силомоментный датчик; 4 – схват; 5 – вал и втулка;
- 6 – базовое приспособление

Силомоментный датчик 3 установлен в торце выходного звена манипулятора робота для измерения силы и крутящего момента в процессе сборки. Информация о силах и крутящих моментах в процессе сборки поступала в контроллер IRC5, а также в персональный компьютер 1. Сопрягаемые вал и втулка удерживаются схватом 4 и базовым приспособлением 6.

Используя инструмент моделирования MATLAB находим требуемые решения (рис. 5).

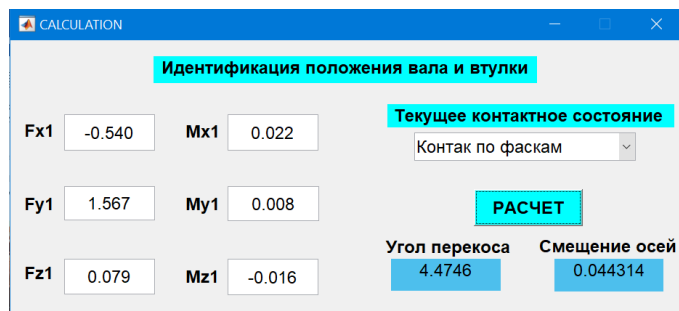


Рис. 5. Определение значения угла перекоса α и $\Delta\Sigma$ смещения осей

Была разработана модель, позволяющая численным методом определить углы α и $\Delta\Sigma$, а также составляющие силы F_{X1}, F_{Y1}, F_{Z1} и момента M_{X1}, M_{Y1}, M_{Z1} с датчика.

В табл. 1 приведены значения составляющих сил и моментов $F_{X1}, F_{Y1}, F_{Z1}, M_{X1}, M_{Y1}, M_{Z1}$, полученные с силомоментного датчика и рассчитанные в среде MATLAB по уравнениям (13-16, 19).

На рис. 6 изображены изменения углов отклонений и смещений деталей. Кроме того, величина расстояния от центра датчика до центра отверстия уменьшается при уменьшении угла наклона.

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные параметров

	Экспериментальные значения							Расчетные значения	
	$F_{X1}, [H]$	$F_{Y1}, [H]$	$F_{Z1}, [H]$	$M_{X1}, [Hm]$	$M_{Y1}, [Hm]$	$M_{Z1}, [Hm]$	$q, [мм]$	$\alpha, [z]$	$\Delta\Sigma, [мм]$
1	-0,540	1,567	0,079	0,022	0,008	-0,016	2,15	4°28'30"	0,044
2	-0,382	0,747	0,122	0,011	0,008	-0,002	2,30	4°27'36"	0,044
3	-0,419	1,151	0,335	0,016	0,016	-0,011	2,45	4°26'28"	0,044
4	-0,571	1,665	0,493	0,023	0,022	-0,018	2,60	4°26'24"	0,044
5	-0,388	1,108	0,560	0,015	0,023	-0,011	2,75	4°24'32"	0,044
6	-0,552	1,518	0,761	0,021	0,032	-0,015	2,90	4°24'36"	0,044
7	-0,407	1,267	0,737	0,017	0,029	-0,015	3,05	4°23'49"	0,043
8	-0,649	1,928	1,047	0,026	0,042	-0,021	3,20	4°24'11"	0,044
9	-0,504	1,481	1,102	0,020	0,043	-0,016	3,35	4°22'19"	0,043
10	-0,601	1,518	1,157	0,021	0,045	-0,013	3,50	4°22'16"	0,043
11	-0,510	1,499	1,675	0,020	0,062	-0,017	3,65	4°18'40"	0,043
12	-0,340	1,212	1,687	0,016	0,061	-0,017	3,80	4°15'32"	0,042
13	-0,498	1,554	1,790	0,021	0,066	-0,019	3,95	4°18'14"	0,042
14	-0,510	1,548	1,864	0,020	0,069	-0,018	4,10	4°17'46"	0,042
15	-0,437	1,530	2,442	0,019	0,088	-0,022	4,25	4°13'19"	0,042
16	-0,492	1,732	2,521	0,022	0,091	-0,025	4,40	4°14'53"	0,042
17	-0,734	1,291	2,527	0,017	0,093	-0,002	4,55	4°11'10"	0,041
18	-0,552	1,965	4,086	0,024	0,145	-0,029	4,70	4°07'30"	0,041
19	-0,364	1,267	2,960	0,015	0,104	-0,019	4,85	4°04'12"	0,040
20	-0,437	0,504	2,493	0,014	0,021	-0,006	5,00	3°54'21"	0,039

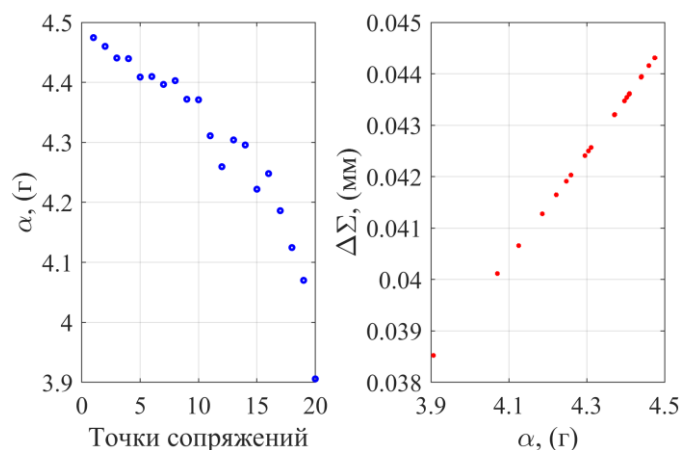


Рис. 6. Изменение угла отклонения и смещения осей между деталями в разных точках сопряжения

Экспериментальные результаты показывают, что рас-согласование положения вала и втулки может быть опре-делено и эффективно устранено, робот может продолжать сборку вала из условия трехточечного контакта. Даль-нейшая работа будет связана с тестированием модели, построением алгоритма моделирования различных кон-тактных состояний на большем количестве опытов с раз-личными размерами и допусками деталей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена задача трехточечного контакта при роботизированной сборке. Оценивается влияние углового положения деталей на условия контактного взаимодействия. Предлагается математическая модель на основе силового и геометрического анализа для определения положения вала и втулки. На ее основе можно выполнить процесс выравнивания вала и переходить к следующему этапу сопряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Todd D.J. Fundamentals of Robot Technology: An Introduction to Industrial Robots, Teleoperators and Robot Vehicle / D.J. Todd. – Springer Science & Business Media, 2012. – 244 p.
2. Hägele M. Industrial robotics, Springer handbook of robotics / M. Hägele, K. Nilsson, J.N. Pires, R. Bischoff. – Springer, Cham, 2016. – P. 1385-1422.
3. Johansson R. Sensor integration in task-level programming and industrial robotic task execution control // Industrial Robot. – 2014. – Vol. 31, No. 3. – P. 284-296. DOI: 10.1108/01439910410532369.
4. Hsu S.H. Adaptive decentralized control of robot manipulators driven by current-fed induction motors / S.H. Hsu, L.C. Fu // IEEE/ASME Transactions on Mechatronic. – 2005. – Vol. 10, No. 4. – P. 465-468. DOI: 10.1109/TMECH.2005.852453.
5. Huang S. Fast peg-and-hole alignment using visual compliance / S. Huang, K. Murakami, Y. Yamakawa, T. Senoo, M. Ishikawa // 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2013. – P. 286-292.
6. Huang S. Realizing peg-and-hole alignment with one eye-in-hand high-speed camera / S. Huang, Y. Yamakawa, T. Senoo, M. Ishikawa // 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. – 2013. – P. 1127-1132.
7. Черняховская Л.Б. Кинематический и динамический анализы автоматической сборки цилиндрических деталей. – Монография. Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2010. – 76 с.
8. Миронова Д.Ф. Справочник по промышленной робототехнике: в 2 т., под редакцией Нофа, Ш. – М.: Машиностроение, 1998. – 480 с.
9. Замятин В.К. Технология и автоматизация сборки: Учебник для машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1993. – 464 с.
10. Гусев А.А. Машиностроение. Энциклопедия. Технология сборки в машиностроении / А.А. Гусев, В.В. Павлов, А.Г. Андреев и др. – М.: Машиностроение, 2001. – 640 с.
11. Wang Y. Contact Force/Torque Prediction and Analysis Model for Large Length-diameter Ratio Peg-in-hole Assembly / Y. Wang, et al. // 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – 2018. – P. 2285-2290.
12. Tang T. Autonomous alignment of peg and hole by force/torque measurement for robotic assembly / T. Tang, H. Lin, Yu Zhao, Wenjie Chen, M. Tomizuka // 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). – 2016. – P. 162-167.
13. Vartanov M.V. Determination of Changing Friction Coefficient Using Force Torque Sensor During Robotic Assembly of Cylindrical Connection with Clearance / M.V. Vartanov, Van Dung Nguyen, Dinh Van Tran // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2020. – p. 977-981. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208047.
14. Vartanov M.V. Analyzing the Methods Identification Shaft Position in Active Robotic Assembly of “Shaft-Sleeve” Joints with Chamfer Contact / M.V. Vartanov, V.K. Petrov, Van Dung Nguyen, Dinh Van Tran // Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. – 2021. – P. 147-156. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_16.

DOI: 10.24892/RIJIE/20220305

Mathematical Model of the Coupling Process of the “Shaft-Sleeve” Connection Using an Active Adaptation Tool for Three-Point Contact

Mikhail V. Vartanov, Nguyen Van Dung, Nguyen Van Linh

Moscow Polytechnic University

Moscow, Russian Federation

natalia.vartanova@bk.ru, trandinhvan1221@gmail.com, nguyendungpt45@gmail.com

Abstract. Nowadays, the methods of robotic assembly of cylindrical joints are popular. However, before assembling, pegs and sleeves need to be adjusted. In practice, if there is a significant misalignment of the position of the shaft and sleeve, seizure or deformation may occur during the assembly process. This article proposes a method for determining the shaft position and sleeve using a force-torque sensor. Creating a three-point contact position is estimated using the force-torque sensor. The models are constructed in a quasi-static formulation. Experimental setup based on an ABB IRB-140 industrial robot with an IRC5 controller, coupling parts with a gap 0.04 mm the effectiveness of the

proposed method is confirmed. During the experiment, the experimental values of the friction coefficient obtained by the authors earlier were used. As a result of the experiment, regularities of changes in the values of forces, moments and angles of shaft skew are obtained, characterizing the coupling stage. The consistency of the analytical solution and the results of the physical experiment are discussed.

Keywords: industrial robot, force-torque sensor, three-point contact, automatic assembly.

Библиографическое описание статьи

Вартанов М.В. Математическая модель процесса сопряжения соединения «вал-втулка» с помощью активного средства адаптации при трехточечном контакте / М.В. Вартанов, Нгуен Ван Зунг, Нгуен Ван Линь // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2022. – Т.9, №3. – С. 28-32. DOI: 10.24892/RIJIE/20220305

Reference to article

Mikhail V. Vartanov, Nguyen Van Dung, Nguyen Van Linh. Mathematical model of the coupling process of the “shaft-sleeve” connection using an active adaptation tool for three-point contact, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2022, vol.9, no.3, pp. 28-32. DOI: 10.24892/RIJIE/20220305