

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ВРАЩЕНИЯ ДЕТАЛИ НА БЕЗОТКАЗНОСТЬ ПРОЦЕССА РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ

Analysis of the effect of the rotation of the part on the reliability the robotics' assembly process

Badania wpływu efektu obrotów części na niezawodność zrobotyzowanego montażu

Михаил В. ВАРТАНОВ, Инна Н. ЗИНИНА, Чан Чунг ТА

Abstract: The main stage of automatic assembly is the process of parts mating. At this stage, there are problems associated with the probability of jamming the parts. To solve this problem, adaptive assembly heads are usually used. However, known dynamic models and control algorithms based on them relate to plane-parallel motion. In this case, considerable frictional forces arise that preventing coupling. The article deals with the assembly method using the rotational motion effect of the installed part. The presence of rotation makes it possible to significantly reduce the part of the friction force, which prevents the movement of the part. In this case, the task becomes spatial.

A dynamic model of the coupling process with the use of the industrial robot ABB IRB140, equipped with an adaptive head, which has the ability to rotate about its own axis, is constructed. The rotation is realized by the kinematics of the output link of the robot.

The mathematical model of the coupling process is considered in the form of Lagrange equations of the second kind. Two cases are considered: with the installation without contact with the chamfer and with the slip on the chamfer. The resulting systems of differential equations allow us to investigate the process of a robotic assembly using the effect of rotation of the gripper. On the basis of mathematical models, both direct and inverse tasks of dynamics can be solved.

The created mathematical model will be used to determine the conditions of the robotic assembly using the adaptation and the rotation effect of the part.

Keywords: robotic assembly, adaptive gripper, effect of rotation, mathematical model

Сборочные операции ставят перед промышленными роботами требования безотказности выполнения сборочных операций. Одним из способов повышения технологической надежности роботизированной сборки является применение адаптивных головок. В ряде работ адаптивность схватов рассматривается с позиции расширения диапазона размеров [1] и конфигураций собираемых деталей [2]. В данной работе нами рассматривается адаптивность схвата, как возможность компенсации погрешности расположения деталей перед сопряжением.

Известные динамические модели роботизированной сборки цилиндрических соединений с пассивной адаптацией [3, 4, 5], а также построенные на их основе алгоритмы управления, относятся к случаю плоскопараллельного движения детали. При малых зазорах в случае плоскопараллельного движения детали могут возникнуть значительные по величине силы трения скольжения в местах её контакта с базовой деталью, приводящие к заклиниванию.

Использование сканирования по различным траекториям с целью обеспечения условий собираемости

является одним из широко применяемых в теории и промышленной практике подходов [6]. Однако в рассматриваемых моделях решается задача совмещения контуров деталей и не рассматривается сам процесс сопряжения.

Одним из путей повышения эффективности сборки, особенно при наличии малых зазоров в соединении, являются различные способы уменьшения величины сил трения. Вращательное движение устанавливаемой детали может обеспечить достижение данного эффекта. Эффективность вращательного движения в процессе обеспечения условий собираемости при роботизированной сборке рассматривалась в [7]. Экспериментально была доказана эффективность вращения детали при пневматической сборке [8].

Построена динамическая модель процесса сборки цилиндрического соединения с применением промышленного робота типа ABB IRB-140, снабженного пассивной адаптивной сборочной головкой. Схват робота может совершать в процессе сопряжения деталей вращательное движение вокруг своей вертикальной оси, совпадающей с осью вращения выходного

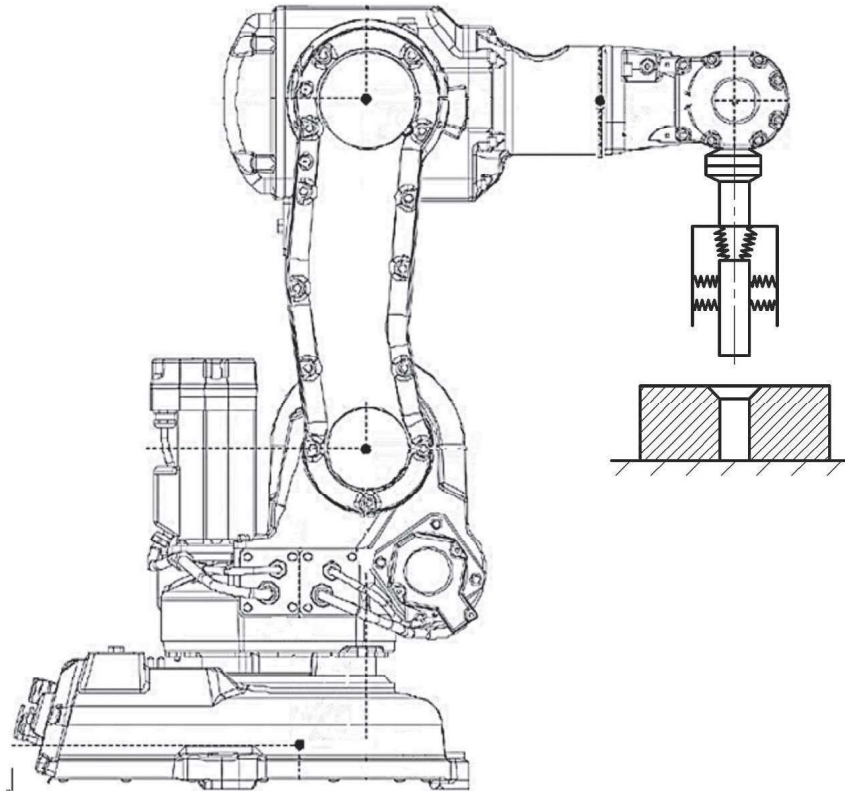


Рис. 1. Упрощенная схема адаптивной головки сборочного робота
Fig. 1. Simplified diagram of the adaptive head of the assembly robot

звена робота. Расчетная кинематическая схема робота представлена на рис. 1.

Манипулятор робота, учитывая движение схвата, имеет шесть степеней свободы. Однако, в модели учитываются только четыре звена робота, как значимо влияющие на динамику процесса. За обобщенные координаты манипулятора примем параметры, характеризующие перемещение последующего звена по отношению к предыдущему (ψ – угол поворота схвата относительно выходного звена).

Для определенности на рис. 1 приведены системы координат c_i, x_i, y_i, z_i ($i=1, 2, 3, 4$) жестко связанные с соответствующими звеньями и со схватом. Система координат $(0, x_0, y_0, z_0)$ связана с базовой деталью и является неподвижной.

Основной целью этого динамического моделирования является выявление эффектов, обусловленных наличием вращательного движения вала вместе со схватом. В расчетную схему механической системы введен ряд допущений, упрощающих динамическое моделирование.

Прежде всего пренебрежем упругой податливостью звеньев манипулятора робота. В системе также будет иметь место погрешность позиционирования закрепленной в схвате детали (вала) из-за наличия между схватом и деталью упругих связей. Упругие связи могут быть причиной возникновения колебаний детали на этапе ее транспортировки к месту монтажа,

что в конечном итоге приведет к погрешности ее позиционирования.

При динамическом моделировании как этапа транспортировки детали к месту монтажа, так и этапа собственно сопряжения деталей необходимо учитывать функциональные возможности выбранной пассивной адаптивной сборочной головки

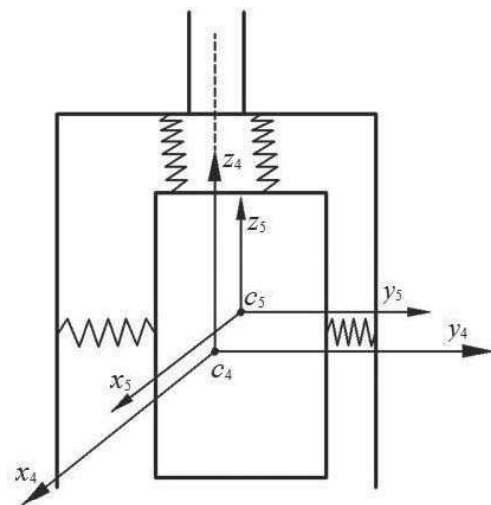


Рис. 2. Кинематическая схема пассивной адаптивной сборочной головки
Fig. 2. Kinematic diagram of the passive adaptive assembling head

и обусловленное ею дополнительное число степеней свободы механической системы.

Предполагаем, что упругие связи в схвате допускают перемещение детали в вертикальной плоскости по двум взаимно перпендикулярным направлениям, а именно в направлении координатных осей y_4 и z_4 (рис. 2).

Для определенности свяжем жестко с деталью систему координат $c_5 x_5 y_5 z_5$ с началом в центре масс (точке c_5) детали. При этом считаем, что в положении равновесия детали системы координат $c_4 x_4 y_4 z_4$ и $c_5 x_5 y_5 z_5$ (жестко связанные соответственно со схватом и с деталью) совпадают. В этом случае упругие связи в схвате будут допускать перемещение центра масс детали (точки C_5) по отношению к схвату в координатной плоскости $c_4 y_4 z_4$, а растяжение или сжатие упругих элементов, отсчитываемые от положения равновесия в направлении координатных осей y_4 и z_4 будут равны соответствующим координатам точки c_5 (η и ζ) и в системе координат $c_4 x_4 y_4 z_4$ (рис. 2).

Таким образом, рабочими движениями исполнительного механизма робота на этапе сопряжения деталей являются: поступательное перемещение выходного звена вертикально вниз и вращение схвата вокруг собственной вертикальной оси. При этом механическая система, состоящая из трех тел, (выходного звена манипулятора, схвата и упруго закрепленной в схвате детали), в случае отсутствия контакта детали с цилиндрическим отверстием имеет четыре степени свободы. За обобщенные координаты данной механической системы выберем параметры ψ . Как было указано ранее, и определяют соответственно поступательное перемещение выходного звена робота по отношению к пятому звену и угол поворота схвата вокруг вертикальной оси по отношению к выходному звену, а параметры η и ζ определяют поступательное перемещение детали по отношению к схвату.

Дифференциальные уравнения движения рассматриваемой механической системы представим в форме уравнений Лагранжа II рода [9]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_3} - \frac{\partial T}{\partial q_3} = Q_3, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} - \frac{\partial T}{\partial \psi} = Q_4, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\xi}} - \frac{\partial T}{\partial \xi} = Q_5, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\eta}} - \frac{\partial T}{\partial \eta} = Q_6, \end{cases} \quad (1)$$

где

T – кинетическая энергия механической системы;
 Q_j ($j = 3, 4, \dots, 6$) – обобщенные силы, соответствующие выбранным обобщенным координатам.

Кинетическую энергию рассматриваемой механической системы представим в виде суммы кинетических энергий тел, входящих в эту систему:

$$T = T_3 + T_4 + T_5, \quad (2)$$

где T_i ($i = 3, 4, 5$) – кинетические энергии соответственно выходного звена манипулятора робота, схвата и детали.

При этом на основании теоремы Кёнига [9] были получены выражения кинетической энергии звеньев.

С использованием метода преобразования однородных координат были определены координаты детали в неподвижной системе $0 x_0 y_0 z_0$.

Обобщенные силы Q_3 и Q_4 , входящие в правые части первых двух уравнений (1), можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$Q_3 = Q_{3g} + Q_{3b}, \quad (3)$$

$$Q_4 = Q_{4g} + Q_{4b},$$

где

Q_{3g} , Q_{4g} – обобщенные силы, обусловленные усилиями и моментами, развиваемыми соответственно приводами выходного звена и схвата;

Q_{3b} , Q_{4b} – а также Q_5 и Q_6 – обобщенные силы, обусловленные остальными активными силами, действующими на рассматриваемую механическую систему, к которым относятся силы тяжести тел, силы упругости и диссипативные силы внутреннего вязкого трения в упругих элементах схвата.

Таким образом, обобщенные силы Q_{3g} и Q_{4g} , соответствующие выбранным обобщенным координатам q_3 и $q_4 = \psi$, будут равны:

$$Q_{3g} = -P_3, \quad Q_{4g} = M_C, \quad (4)$$

где

P_3 – усилие, развиваемое приводом выходного звена робота;

M_C – момент, развиваемый двигателем выходного звена.

Обобщенные силы Q_{jb} ($j = 3, 4, 5, 6$) могут быть определены по формулам:

$$Q_{jb} = \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j}, \quad (j = 3, 4, 5, 6), \quad (5)$$

где

Π – потенциальная энергия системы,

Φ – диссипативная функция, связанная с демпфированием в упругих элементах.

Далее были получены аналитические выражения для потенциальной энергии системы и диссипативной функции. При получении аналитических выражений было принято допущение, что коэффициенты жесткости упругих связей в схвате, а также коэффициенты демпфирования по обоим направлениям одинаковы и равны соответственно c и b .

Для получения аналитических зависимостей для обобщенных сил стало возможным определить

дифференциальные уравнения движения рассматриваемой механической системы (в случае отсутствия контакта штифта с базовой деталью) в форме уравнений Лагранжа II рода (1) с учетом (3) и (4) примут вид:

$$\begin{cases} (m_3 + m_4 + m_5)\bar{q}_3 + m_5\bar{\xi} = -P_3 - (m_3 + m_4 + m_5)g, \\ (J_{z4}^{(cx)} + J_{z5}^{(g)})\bar{\psi} + m_5\eta^2\bar{\psi} + 2m_5\eta\dot{\eta}\dot{\psi} = M_c, \\ m_5(\ddot{q}_3 + \ddot{\xi}) = -c\dot{\xi} - b\dot{\xi}, \\ m_5\ddot{\eta} - m_5\eta\psi^2 = -c\dot{\eta} - b\dot{\eta}. \end{cases} \quad (6)$$

Далее рассмотрим случай динамического моделирования этапа сопряжения деталей при наличии контакта вала с базовой деталью, имеющей фаску

Следует отметить, что при наличии контакта сопрягаемых деталей уменьшается число степеней свободы рассматриваемой механической системы и соответственно число независимых обобщенных координат также должно стать на единицу меньше.

При наличии контакта сопрягаемых деталей, за обобщенные координаты механической системы выбираем параметры $\bar{q}_3, \bar{\xi}, \bar{\psi}$.

Для получения дифференциальных уравнений движения рассматриваемой механической системы при наличии контакта сопрягаемых деталей необходимо прежде всего найти выражение кинетической энергии системы в виде зависимости от трех, вновь выбранных обобщенных координат q_j ($j = 3, 4, 5$).

Дифференциальные уравнения движения рассматриваемой механической системы (при наличии контакта устанавливаемой детали с базовой) в форме уравнений Лагранжа II рода примут вид:

$$\begin{aligned} (m_3 + m_4)\bar{q}_3 + \frac{m_5(q_3 + \bar{\xi})}{\sin^2 \beta} - m_5 \left[\frac{1}{2}(D_0 - d) + (q_3 + \bar{\xi})\text{ctg}\beta \right] \text{ctg}\beta\psi^2 = \\ = -P_3 - (m_3 + m_4 + m_5)g - c \left[\frac{1}{2}(D_0 - d) + (q_3 + \bar{\xi})\text{ctg}\beta \right] \text{ctg}\beta - b(\dot{q}_3 + \dot{\bar{\xi}})\text{ctg}^2\beta + Q_3(\bar{F}_p), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \left\{ J_{z4}^{(c)} + J_{z5}^{(g)} + m_5 \left[\frac{1}{2}(D_0 - d) + (q_3 + \bar{\xi})\text{ctg}\beta \right]^2 \right\} \ddot{\psi} + \\ + 2m_5\dot{\psi} \left[\frac{1}{2}(D_0 - d) + (q_3 + \bar{\xi})\text{ctg}\beta \right] (\dot{q}_3 + \dot{\bar{\xi}})\text{ctg}\beta = M_c + Q_4(\bar{F}_p), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{m_5(\bar{q}_3 + \bar{\xi})}{\sin^2 \beta} - m_5 \left[\frac{1}{2}(D_0 - d) + (q_3 + \bar{\xi})\text{ctg}\beta \right] \text{ctg}\beta\psi^2 = \\ = -c\dot{\xi} - b\dot{\xi} - c \left[\frac{1}{2}(D_0 - d) + (q_3 + \bar{\xi})\text{ctg}\beta \right] \text{ctg}\beta - b(\dot{q}_3 + \dot{\bar{\xi}})\text{ctg}^2\beta + Q_5(\bar{F}_p). \end{aligned} \quad (9)$$

В этих уравнениях остались не найденными обобщенные силы $Q_j(\bar{F}_{Tp})$ ($j = 3, 4, 5$), обусловленные наличием силы трения в точке контакта деталей. Обобщенные силы определены по формулам [9]:

$$Q_j(\bar{F}_{Tp}) = F_{Tpx} \frac{\partial x_k}{\partial q_j} + F_{Tpy} \frac{\partial y_k}{\partial q_j} - F_{Tpz} \frac{\partial z_k}{\partial q_j}, \quad j = 3, 4, 5, \quad (10)$$

где $F_{Tpx}, F_{Tpy}, F_{Tpz}$ – проекции силы трения скольжения на оси неподвижной системы координат.

Далее были найдены частные производные функций по соответствующим обобщенным координатам X_k, Y_k, Z_k .

С целью определения неизвестной величины реакции было составлено дополнительное уравнение на основании теоремы о движении центра масс.

$$m_5\bar{z}_{C5} = N \cos \beta + F_{Tpz} + F_{y\pi z} + R_{gz} - m_5 \quad (11)$$

где $F_{Tpz}, F_{y\pi z}, R_{gz}$ – проекции силы трения скольжения на оси неподвижной системы координат.

Полученные дифференциальные уравнения (6) – (9) позволяют исследовать процесс роботизированной сборки цилиндрических соединений на этапе сопряжения деталей. При этом система (6) относится к идеальному (желаемому), но маловероятному случаю процесса сопряжения деталей, когда контакт между ними отсутствует, так как это предполагает исключительно высокую точность позиционирования. В то же время уравнения (7) – (9) описывают сопряжение деталей в более реальном случае, когда к началу этапа сопряжения деталей вал будет контактировать с базовой деталью по её фаске.

На основе полученных систем дифференциальных уравнений движения можно решать, как прямую, так и обратную задачу динамики. Наличие аналитической модели процесса роботизированной сборки с использованием эффекта вращательного движения схвата позволит провести математическое моделирование процесса и определить условия выполнения сборки без заклинивания деталей, то есть повысить технологическую надежность процесса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Oscari F., Minto S., Rosati G. (2017) Functional Design of a Robotic Gripper for Adaptive Robotic Assembly. In: Boschetti G., Gasparetto A. (eds) Advances in Italian Mechanism Science. Mechanisms and Machine Science, vol 47. Springer, Cham. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-48375-7_28
- [2] C. Canali, F. Cannella, F. Chen, T. Hauptman, G. Sofia, D. G. Caldwell and A. A. Eytan (2014) High Reconfigurable Robotic Gripper for Flexible Assembly // ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Volume 5B: 38th Mechanisms and Robotics Conference, Buffalo, New York, USA, August 17–20, 2014. DOI:10.1115/DETC2014-35245
- [3] Кузнецова С.В. Условия потери управляемости при относительной и угловой адаптации положения детали при сборке // Материалы V международного научно-технического семинара

- «Современные технологии сборки» 19-20 октября 2017 г. – Москва: Московский Политех, 2017 – с. 155–165
- [4] Божкова Л.В., Вартанов М.В., Кольчугин Е.И. Метод роботизированной сборки с использованием вибрационных колебаний // Сборка в машиностроении, приборостроении, №9, 2006. С. 62-67.
- [5] Симаков А.Л. Обоснование методов и средств адаптации соединяемых деталей на базе принципов автоматического управления и выявленных взаимосвязей при автоматизированной сборке. Дисс. на соискание уч. ст. д.т.н. – Ковров, 1993. – 373 с.
- [6] Ghalyan I.F.J. Industrial Applications. In: Force-Controlled Robotic Assembly Processes of Rigid and Flexible Objects. Springer, Cham. 2016. – 195 p.
- [7] Кристаль М.Г. Производительность и надежность сборочных автоматов: монография. – Волгоград, ВОЛГТУ, 2011. – 160 с.
- [8] Левчук Д. М. Исследование и разработка методов относительного ориентирования сборочных единиц соединения во вращающемся потоке газов по автоматической сборке : диссертация кандидата технических наук : 05.02.08 Москва, 1974 – 143 с.
- [9] Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 736 с.
-
- Вартанов Михаил В., профессор, д-р техн. наук, m.v.vartanov@mospolytech.ru
- Зинина Инна Н., доцент, канд. техн. наук, i.n.zinina@mospolytech.ru
- Чан Чунг Та, аспирант
- Кафедра «Технологий и оборудования машиностроения», Московский политехнический университет, 107023, Москва, ул. Б. Семеновская, д. 38