

УДК 62-52

Д. Ю. САХАРОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

РОБОТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Предложена математическая модель позиционирования нормали исполнительного устройства роботизированного промышленного манипулятора на сложные криволинейные поверхности обшивки авиационных панелей, расчет которой основан на матрицах поворота относительно неподвижной точки на криволинейной поверхности выраженных через углы Эйлера вместо классической дифференциации координат положения точек по времени для линеаризации перемещений манипуляционной системы при малых изменениях координат отдельных узлов механизма, что позволит создать адаптивную управляющую программу для исполнительного устройства и даст возможность определять нормаль к криволинейной поверхности обшивки в режиме реального времени.

Ключевые слова: *робот, промышленный манипулятор, роботизация, автоматизация, нормаль, криволинейная поверхность, матрица преобразования, угол поворота, пространственное положение, кинематика.*

Введение

Одним из основных вопросов внедрения адаптивных роботизированных систем управления является расчет кинематики промышленного манипулятора, модель которой и определяет движение робота [1].

Как правило, в сложных многозвенных механизмах, кинематика которых описывается нелинейными зависимостями наряду с требованием к адаптивности и универсальности системы управления этим механизмом, применяют дифференциацию координат положения звеньев по времени, чтобы линеаризовать перемещение манипуляционной системы при малых изменениях координат отдельных узлов механизма. В результате таких превращений скорости изменения координат положения звеньев манипулятора для всевозможных конфигураций будут удовлетворять линейные уравнения. Основная проблема данного подхода заключается в большой погрешности позиционирования, в случае, если все приращения координат промышленной манипуляционной системы недостаточно малы, что негативно сказывается на качестве изготавливаемой продукции.

Авиационная отрасль, на сегодняшний день, наименее автоматизирована из всех областей машиностроения. Это связано, в первую очередь, с особенностями летательных аппаратов как объектов производства, а именно [2]:

- большая номенклатура входящих деталей;
- сложные обводообразующие поверхности и пространственные формы;
- большое количество подготовительных процессов (операции сортировки и контроля);
- многообразие сборочных операций наряду с высокими требованиями к сопряжениям;
- большой разброс по габаритам используемых деталей;
- малая жесткость элементов конструкции планера;
- быстрая сменяемость объектов производства;
- малая программа выпуска;
- необходимость адаптации программ управления к разработанным ранее технологическим процессам.

Сложные криволинейные поверхности летательных аппаратов наиболее требовательны к точности позиционирования инструмента манипулятора по нормали к поверхностям, образующим аэродинамический контур и требуют много специализированной оснастки.

Обоснование подхода разработки математической модели

Применение универсальных промышленных манипуляторов, с использованием современных информационных технологий и алгоритмов про-

странственного моделирования, основанных на теореме Эйлера об углах поворота объекта в декартовой системе координат относительно неподвижной точки, позволяет создавать различные системы управления и адаптивные алгоритмы, расчёт которых основан на матричных преобразованиях. Данная связка, наряду с высоким уровнем развития робототехники позволит осуществить физическую реализацию математических моделей позиционирования на обводообразующие криволинейные поверхности летальных аппаратов с достаточной точностью, гибкостью, универсальностью и с минимальными затратами ресурсов [3].

Матричное описание вращения твёрдого тела упрощает многие операции; однако, для того чтобы полностью описать ориентацию вращающегося твёрдого тела, необходимо использовать все девять элементов матрицы поворота [4]. Непосредственно эти элементы не составляют полной системы обобщённых координат, с помощью которых можно описать ориентацию вращающегося твёрдого тела относительно абсолютной системы координат. В качестве обобщённых координат можно использовать углы Эйлера (φ , θ , ψ) [5].

Определение математической модели позиционирования

Модель позиционирования оси инструмента относительно криволинейной поверхности обшивки панели исходит из математической модели определения вектора нормали к криволинейной поверхности.

Для дальнейшего рассмотрения математической модели назовём нулевую точку отсчёта системы координат роботизированного манипулятора как “Base”, а нулевую точку системы координат неотрегулированного инструмента как “Tool_I”, которая расположена на пересечении оси инструмента и торцевой плоскости патрона манипулятора.

Также будем считать, что координаты осей, в нуле системы отсчёта не отрегулированного инструмента (a, b, c), а требуемая позиция для проведения технологической операции – (a', b', c').

На рисунке 1, точка Т представляет точку контакта инструмента и поверхности панели, и в то же время начало системы координат точки контакта инструмента и панели (X', Y', Z'). Вектор \overline{OT} указывает направление оси шпинделя до позиционирования инструмента.

Точки P_1, P_2, P_3, P_4 являются исходными точками позиционирования измерительного щупа, и лежат в одной плоскости с началом вектора оси инструмента \overline{OT} , образуя прямоугольник, где точ-

ка O' лежит на пересечении диагоналей этого прямоугольника.

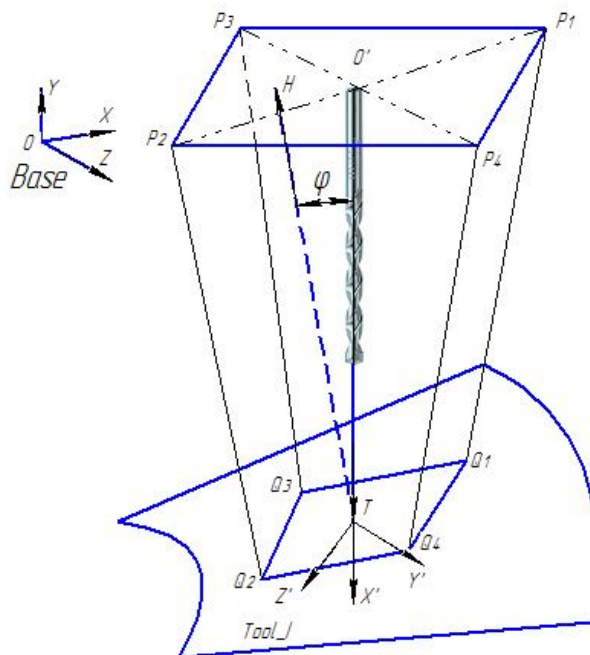


Рис. 1. Геометрическая модель позиционирования нормали на криволинейной поверхности

Точки Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 являются проекциями точек P_1, P_2, P_3, P_4 , т.е. точками контакта измерительного щупа и поверхности панели.

Согласно рисунку 1, вектора движения измерительного щупа $\overline{P_1Q_1} = h_1$, $\overline{P_2Q_2} = h_2$, $\overline{P_3Q_3} = h_3$, $\overline{P_4Q_4} = h_4$.

Диагонально-противоположные вектора $\overline{P_1Q_1}$ и $\overline{P_2Q_2}$ компланарные с вектором \overline{OT} также как и вектора $\overline{P_3Q_3}$ и $\overline{P_4Q_4}$ компланарные с вектором \overline{OT} .

Поскольку точки P_1, P_2, P_3, P_4 образуют параллелограмм, то плоскости $P_1Q_1P_2Q_2$ и $P_3Q_3P_4Q_4$ перпендикулярны. В то же время плоскость $P_1Q_1P_2Q_2$ совпадает с плоскостью $O'TZ'$, а плоскость $P_3Q_3P_4Q_4$ совпадает с плоскостью $O'TY'$.

Искомый вектор нормали к поверхности панели обозначен как \overline{TH} , а угол отклонения нормали от исходного вектора оси инструмента φ , расположен между \overline{OT} и \overline{TH} .

Поскольку угол φ является углом между вектором нормали к поверхности панели в точке контакта инструмента \overline{TH} и вектором, лежащим на исходной оси инструмента \overline{OT} , то проблему определения

нормали к поверхности можно представить как минимизацию угла φ .

На рисунке 2 изображено взаиморасположение углов φ, φ_1 и φ_2 , где φ_1 - угол между вектором $\overline{O'T}$ и проекцией вектора нормали \overline{TN} на плоскость $X'TZ'$, обозначенной как \overline{TN} , а φ_2 - угол между вектором $\overline{O'T}$ и проекцией вектора нормали \overline{TN} на плоскость $X'TY'$, обозначенной как \overline{TM} . Точки N и M лежат на прямых P_1, P_2 и P_3, P_4 соответственно. Угол между вектором нормали к поверхности панели и спроецированным вектором \overline{TM} обозначим как t_1 .

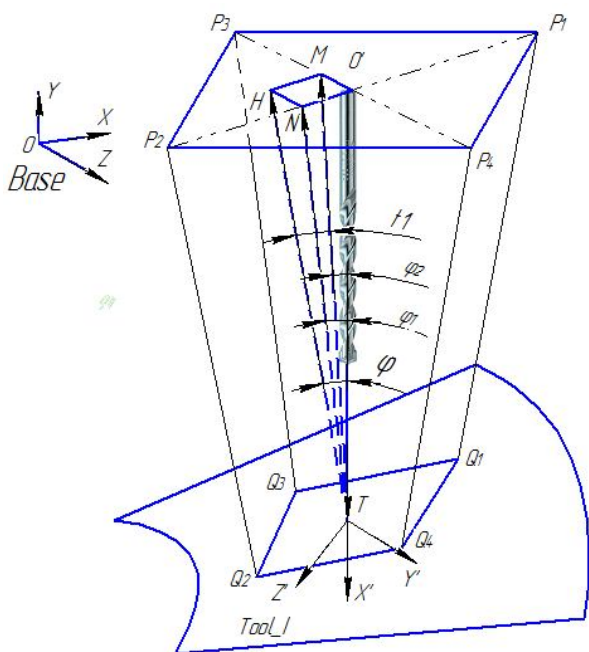


Рис. 2. Взаиморасположение углов φ, φ_1 и φ_2

Обозначим координаты точки N на плоскости P_1, P_2, P_3 в системе координат "Tool_I" как (x_0, y_0, z_0) , тогда:

$$\tan \varphi = \frac{\sqrt{z_0^2 + y_0^2}}{|O'T|}, \quad (1)$$

$$\tan \varphi_1 = \frac{z_0}{|O'T|}, \quad (2)$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{-y_0}{|O'T|}. \quad (3)$$

Исходя из трёх уравнений, описанных выше, можно выразить углы φ и t_1 :

$$\varphi = \arctan \sqrt{\tan^2 \varphi_1 + \tan^2 \varphi_2}, \quad (4)$$

$$t_1 = \arctan(\cos \varphi_1 + \tan \varphi_2). \quad (5)$$

Рассмотрим геометрическую модель, изображённую на рисунке 2, в разрезе плоскости $X'TZ'$ и опишем между углами φ_1, φ_2 и расстояниями до поверхности h_1, h_2, h_3, h_4 .

На рисунке 3 представлена развёртка плоскости $X'TZ'$. Расстояние между P_1 и P_2 обозначим как l_{12} , а расстояние между P_3 и P_4 как l_{34} .

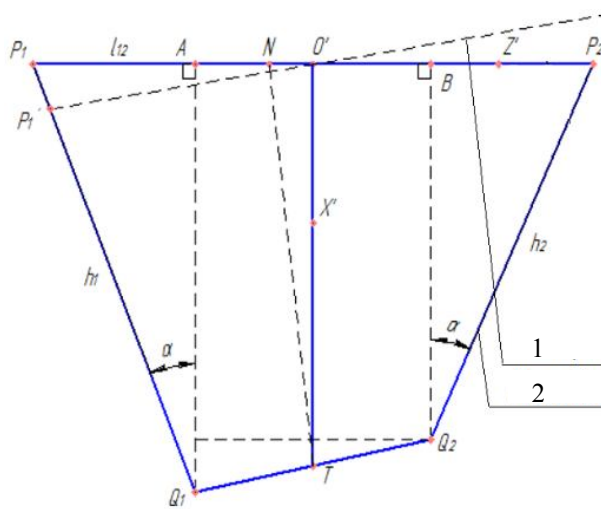


Рис. 3. Зависимость между углами φ_1, φ_2 и расстояниями до поверхности h_1, h_2, h_3, h_4 :
1 – позиционирование по нормали;
2 – исходное позиционирование

Тогда:

$$\overline{AQ_1} = h_1 \times \cos \alpha, \quad (6)$$

$$\overline{BQ_2} = h_2 \times \cos \alpha, \quad (7)$$

$$\tan \varphi_1 = \frac{\overline{BQ_2} - \overline{AQ_1}}{AB} = \frac{(h_1 - h_2) \times \cos \alpha}{l_{12} - (h_1 - h_2) \times \sin \alpha}, \quad (8)$$

$$\varphi_1 = \arctan \frac{(h_1 - h_2) \times \cos \alpha}{l_{12} - (h_1 - h_2) \times \sin \alpha}. \quad (9)$$

Аналогично определим угол φ_2 :

$$\varphi_2 = \arctan \frac{(h_3 - h_4) \times \cos \alpha}{l_{34} - (h_3 - h_4) \times \sin \alpha}. \quad (10)$$

Исходя из выражений (8), (9) и (4) определим угол φ :

$$\varphi = \arctan \left(\frac{(h_1 - h_2)^2 \times \cos^2 \alpha}{(l_{12} - (h_1 - h_2) \times \sin \alpha)^2} + \frac{(h_3 - h_4)^2 \times \cos^2 \alpha}{(l_{34} - (h_3 - h_4) \times \sin \alpha)^2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Согласно выражениям (8), (9) и (5):

$$t_1 = \arctan \left(\cos \left(\arctan \frac{(h_1 - h_2) \times \cos \alpha}{l_{12} - (h_1 - h_2) \times \sin \alpha} \right) + \frac{(h_1 - h_2) \times \cos \alpha}{l_{12} - (h_1 - h_2) \times \sin \alpha} \right). \quad (11)$$

Обозначим отрегулированную систему координат как Tool_II. Взаиморасположение системы Tool_I и Tool_II отображено на рисунке 4.

Очевидно, что вектор оси непозиционированного инструмента $\overline{O'T}$ может быть совмещён с вектором нормали \overline{TH} посредством двух вращений относительно точки контакта T инструмента с криволинейной поверхностью.

Решение задачи определения нормали на криволинейную поверхность обшивки планера

Для решения задачи трансформации координат посредством вращения вокруг точки контакта инструмента с поверхностью рационально использовать функцию Эйлера, согласно которой, любое перемещение твёрдого тела в декартовом трёхмерном пространстве вокруг фиксированной точки может быть описано как произведение трёх матриц поворота вокруг трёх ортогональных осей, выходящих из точки, вокруг которой происходит вращение.

Опишем трансформацию координат для описанной системы:

$$\begin{aligned} \text{Tool}_I \mathbf{R} &= \text{Euler}(\varphi_2, t_1, \varphi) = \\ &= \text{Rot}(z, \varphi_2) \times \text{Rot}(y, t_1) \times \text{Rot}(x, \varphi) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 & 0 \\ \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos t_1 & 0 & \sin t_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin t_1 & 0 & \cos t_1 \end{bmatrix} \times \\ &\quad \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12) \end{aligned}$$

Аналогичным образом можно описать решение трансформации координат системы (Tool_I, Tool_II) и системы координат роботизированного манипулятора "Base".

$$\text{Tool}_{II} \mathbf{R} = \text{Tool}_I \mathbf{R} \times \text{Tool}_{II} \mathbf{R}. \quad (13)$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \text{Euler}(a', b', c') &= \text{Euler}(a, b, c) \times \text{Euler}(\varphi_2, t_1, \varphi) = \\ &= \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a & 0 \\ \sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos b & 0 & \sin b \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin b & 0 & \cos b \end{bmatrix} \times \\ &\quad \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos c & -\sin c \\ 0 & \sin c & \cos c \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 & 0 \\ \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ &\quad \times \begin{bmatrix} \cos t_1 & 0 & \sin t_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin t_1 & 0 & \cos t_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}. \quad (14) \end{aligned}$$

В выражении (14) n_x, n_y, n_z – координаты единичного вектора оси X" в системе исчисления роботизированного манипулятора "Base" относительно позиционирования системы Tool_II, o_x, o_y, o_z – координаты единичного вектора оси Y", а a_x, a_y, a_z – координаты единичного вектора оси Z" соответственно.

$$\begin{aligned} n_x &= -\cos t_1 \times [\sin \varphi_2 \times (\sin a \times \cos c - \cos a \times \sin b \times \sin c) - \\ &\quad - \cos a \times \cos b \times \cos \varphi_2] - \sin t_1 \times (\sin a \times \sin c + \\ &\quad + \cos a \times \sin b \times \cos c); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_y &= \cos t_1 \times [\sin \varphi_2 \times (\cos a \times \cos c + \sin a \times \sin b \times \sin c) + \\ &\quad + \sin a \times \cos b \times \cos \varphi_2] + \sin t_1 \times (\cos a \times \sin c - \\ &\quad - \sin a \times \sin b \times \cos c); \end{aligned}$$

$$n_z = -\cos t_1 \times (\sin b \times \cos \varphi_2 - \cos b \times \sin c \times \sin \varphi_2) - \cos b \times \cos c \times \sin t_1;$$

$$o_x = -\cos \varphi_2 \times (\sin a \times \cos c - \cos a \times \sin b \times \sin c) - \cos a \times \cos b \times \sin \varphi_2;$$

$$o_y = \cos \varphi_2 \times (\cos a \times \cos c + \sin a \times \sin b \times \sin c) - \sin a \times \cos b \times \sin \varphi_2;$$

$$o_z = \sin b \times \sin \varphi_2 + \cos b \times \sin c \times \cos \varphi_2;$$

$$a_x = \cos t_1 \times (\sin a \times \sin c + \cos a \times \sin b \times \cos c) - \sin t_1 \times [\sin \varphi_2 \times (\sin a \times \cos c - \cos a \times \sin b \times \sin c) - \cos a \times \cos b \times \cos \varphi_2];$$

$$a_y = \sin t_1 \times [\sin \varphi_2 \times (\cos a \times \cos c + \sin a \times \sin b \times \sin c) + \sin a \times \cos b \times \cos \varphi_2] - \cos t_1 \times (\sin c \times \cos a - \sin a \times \sin b \times \cos c);$$

$$a_z = \cos b \times \cos c \times \cos t_1 - \sin t_1 \times (\sin b \times \cos \varphi_2 - \cos b \times \sin c \times \sin \varphi_2).$$

Решение функции (13) является ничем иным как искомые координаты единичных векторов повернутой системы координат в матричном представлении.

Данная функция может быть внедрена в систему управления роботизированного комплекса как адаптивная составляющая, что позволит сделать промышленный манипулятор универсальным для схожих технологических задач независимо от объёма сборки.

Заключение

Предложена альтернативная математическая модель позиционирования нормали исполнительного устройства роботизированного промышленного манипулятора на сложные криволинейные поверхности обшивок авиационных панелей, расчёт которой основан на матрицах поворота относительно неподвижной точки на криволинейной поверхности выраженных через углы Эйлера вместо классической дифференциации координат положения точек по времени для линеаризации перемещений манипуляционной системы при малых изменениях координат отдельных узлов механизма. Такой математический алгоритм позволит создать адаптивную управляющую программу для исполнительного устройства и даст возможность определять нормаль к криволинейной поверхности обшивки в режиме реального времени с достаточной точностью, что в свою очередь позволит ускорить технологический

процесс сборки сложных криволинейных авиационных конструкций.

Так же данная модель позиционирования может найти широкое применение в автоматизации управляющих процессов полёта беспилотных летательных аппаратов и т.п.

Литература

1. Воронько, В. В. Основные направления и тенденции развития зарубежных технологий сборки авиационных конструкций [Текст] / В. В. Воронько // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2010. – Вып. 45. – С. 87-98.
2. Технология производства самолетов и вертолетов : учеб. пособие по курсовому и диплом. проектированию: в 2 ч. Ч. 1 Сборочно-монтажные работы [Текст] / В. С. Кривцов, Ю. М. Букин, Ю. А. Боборыкин, Ю. А. Воробьев. – Х. : Нац. аэрокосмический ун-т "ХАИ", 2006. – 258 с.
3. Шахинпур, М. Курс робототехники [Текст] : пер. с англ. / М. Шахинпур. – М. : Мир, 1990. – 527 с.
4. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика [Текст] : учеб. пособие. В 10-ти т. Т. 1. Механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 216 с. – ISBN 5-02-013850-9.
5. Лурье, А. И. Аналитическая механика [Текст] / А. И. Лурье. – М. : Физматлит, 1961. – 823 с.
6. Гольдштейн, Р. В. Механика сплошных сред. Часть 1. [Текст] / Р. В. Гольдштейн, В. А. Городцов. – М. : Наука, Физматлит, 2000. – 256 с. – ISBN 5-02-015555-1.
7. Gorlach, I. Optimal level of automation in the automotive industry [Electronic resource] / I. Gorlach, O. Wessel // Engineering Letters. – 2008. – No. 16(1). – pp. 141–149. – Access mode: http://www.engineeringletters.com/issues_v16/issue_1/EL_16_1_21.pdf. – 3.02.2017.
8. Herrera, J. Evaluation of control systems for automated wing manufacturing [Electronic resource] / J. Herrera // Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 2013. – Access mode: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/82484>. – 15.02.2017.

References

1. Voronko, V. V. Osnovnye napravlenija i tendencii razvitija zarubezhnyh tehnologij sborki aviacionnyh konstrukcij [Principal directions and tendencies of development of foreign technologies aircraft

assembly structures]. *Otkrytye informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tehnologii : sb. nauch. tr. Nac. ajerokosmich. un-ta im. N. E. Zhukovskogo «HAI» – Open information and computer integrated technologies: Sat. Sci. Tr. Aerospace university "KhAI"*, iss.45, 2010, pp. 87-98.

2. Krivtsov, V. S., Bukin, Y. M., Boborykin, Y. A., Vorobiev, Y. A. *Tehnologija proizvodstva samoletov i vertoletov : ucheb. posobie po kursovomu i diplom. Proektirovaniju. Ch. 1 Sborочно-монтажные работы* [The technology of production of aircraft and helicopters. Section "Assembly and mounting work", Part 1.]. Kharkov, KhAI Publ., 2006. 258 p.

3. Shakhinpur, M. *Kurs robototekhniki* [Course robotics]. Moscow, Mir Publ., 1990. 527 p.

4. Landau, L. D., Lifshitz, E. M. *Teoreticheskaja fizika. T. 1. Mehanika* [Theoretical physics. Vol. 1. Mechanics]. Moscow, Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit. Publ., 1988. 216 p. ISBN 5-02-013850-9.

5. Lurie, A. I. *Analiticheskaja mehanika* [Analytical Mechanics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1961. 823 p.

6. Goldstein, R. V., Gorodtsov, V. A. *Mehanika sploshnyh sred. Chast' 1* [Continuum mechanics. Part 1]. Moscow, Science. Fizmatlit Publ., 2000. 256 p. ISBN 5-02-015555-1.

7. Gorchach, I., Wessel, O. Optimal level of automation in the automotive industry. *Engineering Letters*, 2008, no. 16(1), pp. 141–149. Available at: http://www.engineeringletters.com/issues_v16/issue_1/EL_16_1_21.pdf (accessed 3.02.2017)

8. Herrera, J. Evaluation of control systems for automated wing manufacturing. *Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology*, June 2013. Available at: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/82484> (accessed 15.02.2017)

Поступила в редакцию 20.06.2017, рассмотрена на редколлегии 14.09.2017

РОБОТИЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ПРОСТОРОВИМ ПОЛОЖЕННЯМ ОБ'ЄКТІВ ПРИБИРОБНИЦТВІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Д. Ю. Сахаров

Запропоновано математичну модель позиціонування нормалі виконавчого пристрою роботизованого промислового маніпулятора на складні криволінійні поверхні обшивок авіаційних панелей, розрахунок якої базується на матрицях повороту відносно нерухомої точки на криволінійній поверхні виражених через кути Ейлера замість класичної диференціації координат положення точок по часу для лінеаризації переміщень маніпуляційної системи при малих змінах координат окремих вузлів механізму, що дозволить скласти адаптивну керуючу програму для виконавчого пристрою і дасть можливість визначити нормаль до криволінійної поверхні обшивки в режимі реального часу.

Ключові слова: робот, промисловий маніпулятор, роботизація, автоматизація, нормаль, криволінійна поверхня, матриця перетворення, кут повороту, просторове положення, кінематика.

ROBOTIZATION OF SPATIAL CONTROL OF OBJECTS IN THE PRODUCTION AND OPERATION OF AIRCRAFT

D. Y. Sakharov

The variety of manufacturing processes for industrial engineering products requires high accuracy of their manufacturing and assembling methods to be satisfied. Thus, automated manipulators or special positioning devices can be used for further improvement of assembling efficiency. For instance, the positioning algorithms with high accuracy are implemented for structural elements within the method of assembly-free concept in aircraft building.

In order to find a clue solution for the problem of accurate coordinate positioning, it is necessary to determine the rotation angles and linear displacements of the object during the transition from the initial position to the final state, and to calculate the displacement values of the positioning drives based on them. From the other side, the positioning of an industrial manipulator on a physical object in real time mode requires the development of an adaptive mathematical algorithm for determining the rotation angles and linear movements of the manipulator links, thus the development of a response mechanism from which the data required for calculating the trajectory of motion can be obtained.

A mathematical model of the positioning of the normal actuator robotic industrial manipulator on the complex curved surface of aircraft panels, which calculation is based on the rotation matrix with respect to a fixed point on a curved surface expressed by Euler angles instead of the classical differentiation coordinate positions of the points in time for linearization displacements handling system for small changes in the coordinates of the individual nodes of the mechanism that allows to adaptive run-conductive program execution device and will provide an opportunity to define the normal to the curved surface in real time.

Based on the proposed calculation method, numerical algorithm for manipulator handling can be developed. This software will allow to calculate the necessary values of the movements of the manipulator drives, which eliminates the need for a large number of iterations in the coordinate positioning process. The described method can significantly improve the performance of assembly-free concept and docking operations in aircraft building.

Keywords: robot, industrial manipulator, robotization, automation, normal, curvilinear surface, transformation matrix, rotation angle, spatial position, kinematics.

Сахаров Денис Юрьевич – аспирант, ассистент кафедры технологий производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: Sakharov92@gmail.com.

Sakharov Denys Yrievich – Ph.D. student, assistant of the department of aircraft production technologies, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: Sakharov92@gmail.com.