

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА В ПРОЦЕССЕ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

© 2024

- Н. А. Сазонникова** доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [nasazonnikova@yandex.ru](mailto:nasazonnikova@yandex.ru)
- В. Н. Илюхин** кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [iwnik@yandex.ru](mailto:iwnik@yandex.ru)
- С. В. Сурудин** кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [innosam63@gmail.com](mailto:innosam63@gmail.com)
- Д. А. Мезенцев** аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [cugucum@mail.ru](mailto:cugucum@mail.ru)

Показана актуальность использования лазерного трекера в составе автоматизированного технологического комплекса для повышения точности перемещений промышленного робота-манипулятора в процессе инкрементального формообразования. Сформулированы требования к измерительной системе технологического комплекса. Построена математическая модель величины сигнала, регистрируемого с помощью лазерного трекера по результатам измерения перемещений робота-манипулятора. Описан алгоритм корректировки перемещений робота в процессе инкрементального формообразования в реальном времени.

*Инкрементальное формообразование; робот-манипулятор; точность перемещений; лазерный трекер; математическая модель*

---

**Цитирование:** Сазонникова Н.А., Илюхин В.Н., Сурудин С.В., Мезенцев Д.А. Повышение точности перемещений промышленного робота в процессе инкрементального формообразования // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 2. С. 143-156. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-143-156

### Введение

В современных условиях в области обработки металлов давлением возрастают требования к гибкости производства и возможности быстро реагировать на требования заказчика. Большие возможности открывают современные информационные технологии, реализуемые с помощью автоматизированных технологических комплексов. Одним из наиболее перспективных направлений является инкрементальное формообразование с использованием промышленных роботов-манипуляторов. Такой подход позволяет отказаться от традиционной штамповой оснастки и оперативно переналаживать производство при освоении новых изделий. Номенклатура изделий может быть достаточно широкой, благодаря обработке с помощью роботов-манипуляторов, которые обеспечивают перемещение инструмента в широком диапазоне размеров по траекториям различной сложности [1; 2]. Вместе с тем для успешного внедрения технологии инкрементального формообразования необходимо обеспечить требуемую точность вы-

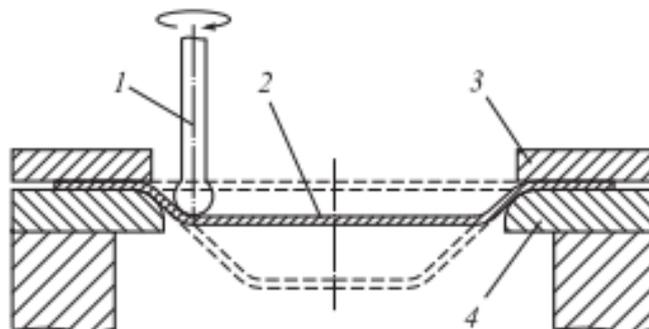
полнения размеров изделий. Современные роботы-манипуляторы характеризуются высокой повторяемостью перемещений, однако точность перемещений не всегда является достаточной. Решить эту проблему позволяет включение в состав автоматизированного комплекса лазерного трекера. Для повышения точности перемещений робота-манипулятора может проводиться его калибровка перед началом выполнения работы, а также применяется компенсация перемещений робота в процессе выполнения технологической операции [3 – 5].

Требования к точности изготовления и условия контроля становятся специфическими в условиях цифровой экономики [6]. Проведение контроля точности перемещений промышленного робота-манипулятора с использованием современных измерительных средств позволяет снизить затраты на конечный продукт, повысить целостность и эффективность процесса, оптимизировать метрологические процессы, уменьшить избыточность инструментов и повысить качество продукции и соответствие спецификации, проводить контроль с учётом специфики технологического процесса и влияния окружающей среды [7 – 9].

Лазерный трекер представляет собой следящую триангуляционную измерительную систему, работающую в реальном масштабе времени [1; 10]. Для обеспечения требуемой точности измерения необходимо выбрать схему измерений, отвечающую условиям данного технологического процесса и определить влияние параметров измерительной системы на результаты оценки перемещений робота.

### **Технологический процесс инкрементального формообразования**

Инкрементальное формообразование – процесс обработки листового материала, в котором заготовка локально деформируется пуансоном со сферическим торцом путём перемещения одного или нескольких инструментов вдоль заданного направления (рис. 1, 2). Концевые части заготовки при этом жёстко фиксируются между нижней плитой и прижимом. Кроме перемещения вдоль заданного пути для снижения влияния сил контактного трения пуансон вращается вокруг своей оси. Технология позволяет обрабатывать конструкционные, коррозионностойкие, высокопрочные и оцинкованные стали, цветные металлы, титан и другие материалы. Основное отличие от традиционных технологий состоит в том, что не требуется изготовление дорогостоящего формоизменяющего инструмента и использование мощного прессового оборудования, т.е. формоизменение выполняется не за счёт заполнения полости путём совмещения нижней и верхней гравюр штампа, а за счёт реализации перемещений инструмента по заданному контуру по заранее рассчитанным траекториям [11].



*Рис. 1. Принципиальная схема инкрементального формообразования  
1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – прижим; 4 – нижняя плита*

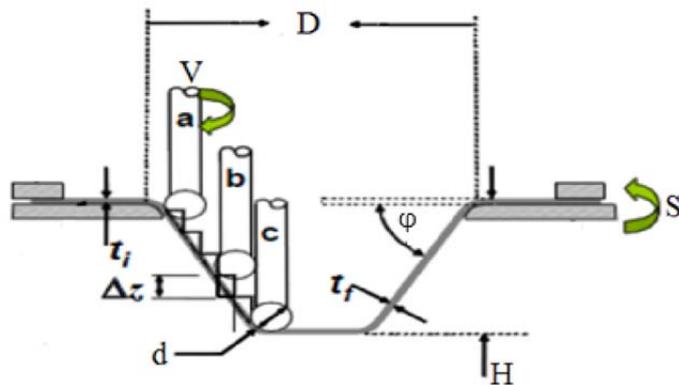


Рис. 2. Процесс инкрементального формообразования:

$D$  – диаметр заготовки;  $V$  – скорость вращения пуансона;  $t_i$  – начальная толщина заготовки;  $\Delta z$  – величина приращения;  $d$  – диаметр пуансона;  $t_f$  – конечная толщина заготовки;  $\varphi$  – угол формовки;  $H$  – глубина;  $S$  – скорость перемещения пуансона

Для повышения точности получаемых изделий и расширения технологических возможностей используют различные схемы формоизменения [5]. Типовые схемы процесса инкрементального формообразования представлены на рис. 3.

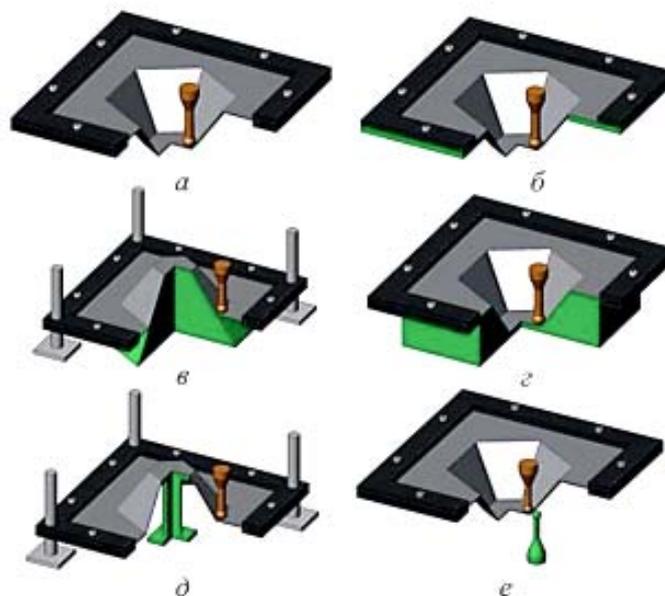


Рис. 3. Типовые схемы инкрементального формообразования:

$a$  – с одним пуансоном;  $b$  – с пуансоном и опорной плитой под заготовкой;  $в, г$  – с опорной матрицей;  $д$  – с нижним подпором;  $е$  – с контр-пуансоном

На данный момент технологии инкрементального формообразования находят все большее применение во всех областях промышленности благодаря своей универсальности, гибкости и скорости получения изделий. Поэтому необходимо дальше исследовать эту тему и усовершенствовать точность соответствия САМ (Computer-Aided Manufacturing) модели её готовому изделию при помощи лазерного трекера путём повышения точности позиционирования промышленного робота-манипулятора.

Перемещение пуансона может происходить за счёт станка с числовым программным управлением, но в таком случае размер детали будет ограничиваться размером координатного стола станка. Более целесообразным будет использование робота-манипулятора.

Современные роботы-манипуляторы характеризуются высокой повторяемостью перемещений, однако их точность недостаточна для многих технологических операций [12]. Для повышения точности их перемещений применяются калибровка с помощью лазерного трекера, а также корректировка в процессе выполнения технологической операции, что также осуществляется с применением лазерного трекера.

В данной работе рассматривались следующие условия технологического процесса инкрементального формообразования:

- материал заготовки: алюминий Д16Т толщиной 0,5 мм;
- размер заготовки: 200×200 мм по периметру, 200 мм глубина формообразования;
- скорость перемещения пуансона: от 0,5 м/мин до 10 м/мин;
- способ инкрементального формообразования: по контуру (рис. 4) без вращения пуансона;
- факторы, действующие в технологическом процессе: процесс выполняется при комнатных условиях;
- точность позиционирования инструмента: 0,06 мм.

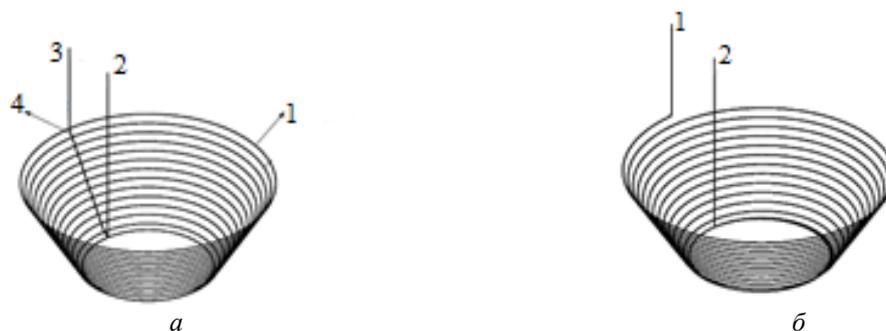


Рис. 4. Траектории движения инкрементального формообразования

*а – по контуру; б – по спирали;*

*1 – контур движения пуансона; 2 – глубина формовки;*

*3 – поверхность формовки; 4 – шаг прохода пуансоном*

Существует два способа инкрементального формообразования – по контуру и по спирали. При движении по контуру пуансон, прикрепленный через адаптер к роботу (рис. 4), описывает окружность заданного радиуса, далее происходит переход на окружность другого радиуса и так, пока не будут пройдены все контуры. При другом способе пуансон постоянно движется по спирали. При таком способе формования меньше шероховатость полученной поверхности по сравнению с формообразованием по контуру.

#### **Автоматизированная технологическая установка**

Автоматизированный промышленный комплекс для инкрементального формообразования (рис. 5) состоит из робота-манипулятора KUKAKR 160 R1570 (далее – робота) [13], лазерного трекера и оптических элементов измерительной системы – отражателей, а также компьютера с программой управления.

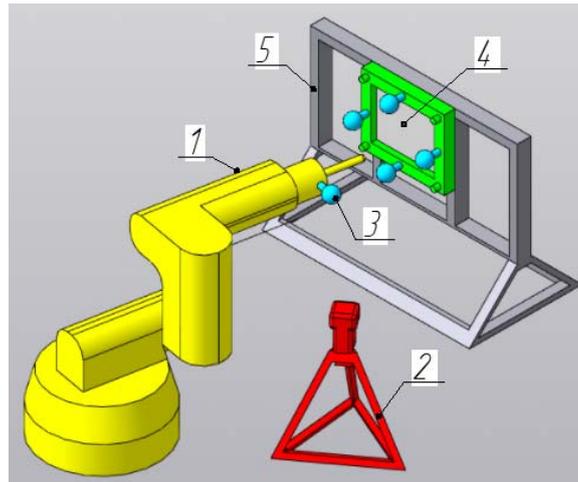


Рис. 5. Автоматизированный комплекс для инкрементального формообразования:  
 1 – робот-манипулятор; 2 – лазерный трекер; 3 – отражатель;  
 4 – заготовка; 5 – оснастка для заготовки

Компьютер соединён с лазерным трекером и контроллером робота (рис. 6). Задача компьютерной управляющей программы (рис. 7) – сравнение текущих координат ТСП (Tool Center Point) робота, полученных в результате измерения с помощью трекера, с координатами, заданными в САД (Computer-Aided Technologies) модели и отправка корректирующей информации к роботу-манипулятору в режиме реального времени [14].

Так как цикл обработки (цикл общения) Robot System Interface (RSI) робота составляет 4 мс, а у внешней системы он жёстко не определён, то было принято решение посылать данные с внешней системы в систему управления робота каждые 4 мс. Для этого на роботе создавалась отдельная подсеть, через которую он по протоколу UDP общался только с внешней системой. Формат общения при этом задавался одинаковый в системе управления робота (через \*.xml файл) и во внешней системе. Рабочая частота обмена данными составляла 250 Гц.

По результатам измерений определяется, насколько точно выполняется перемещение, т.е. не превышает ли разность действительного и требуемого значения размера допустимую величину. Если превышения нет, то управляющая программа не будет осуществлять коррекцию.

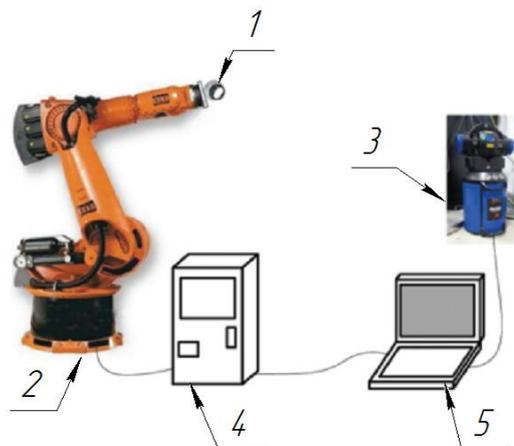


Рис. 6. Состав и связь компонентов автоматизированного комплекса:  
 1 – отражатель; 2 – робот-манипулятор; 3 – лазерный трекер;  
 4 – контроллер робота; 5 – компьютер с управляющей программой



Рис. 7. Блок-схема алгоритма компенсации перемещений робота в процессе инкрементального формообразования

Робот-манипулятор имеет шесть степеней свободы и используется для перемещения пуансона. Он развивает необходимую для деформации силу, передавая её на заготовку через пуансон. Робот позволяет перемещать пуансон и осуществлять трёхмерное деформирование, тем самым создавая из плоской заготовки объёмную деталь, заранее спроектированную в специальном пакете САД программ (SolidWorks, Компас, Solid-Edge, GibbCam).

Лазерный трекер необходим для контроля за точностью перемещения робота-манипулятора. Измерение координат инструментального центра робота трекером позволяет отслеживать реальное положение пуансона в пространстве и сравнивать его с теоретическим, которое рассчитал контроллер робота, и если эти координаты отличаются на величину, превышающую допустимую, то полученные от трекера данные используются для формирования корректирующего воздействия на робота и позволяют повысить точность технологического процесса инкрементального формообразования.

В составе автоматизированного комплекса используется робот KUKAKR 160 R1570, который относится к промышленным роботам средней грузоподъёмности, к классу манипуляторов. Такие типы роботов широко применяется в производстве, так как могут выполнять большое количество различных технологических операций.

### Математическая модель величины сигнала на выходе пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора

Чтобы определить ожидаемую общую погрешность измерений, сначала следует построить математическую модель системы измерений автоматизированного комплекса, отражающую влияние параметров измерительной системы и лазерного трекера на точность определения геометрических параметров перемещений инструментального центра робота. Так как измерения проводятся в полярной системе координат (рис. 8), то результаты измерений состоят из значения расстояния ( $S$ ), вертикального угла ( $V$ ) горизонтального угла ( $H_z$ ). Эти три значения являются сферическими координатами изме-

ренной точки. Декартовы координаты точки  $P$  затем вычисляются с использованием уравнений:

$$X = S \sin(V) \cos(Hz) \quad (1)$$

$$Y = S \sin(V) \sin(Hz) \quad (2)$$

$$Z = S \cos(V) \quad (3)$$

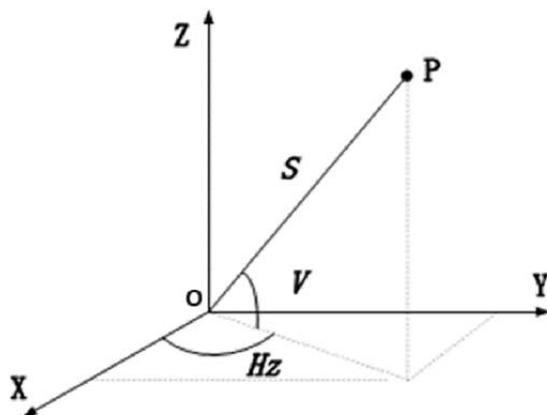


Рис. 8. Полярная система измерений лазерного трекера:  
 $S$  – расстояние до точки;  $V$  – вертикальный угол;  
 $H_z$  – горизонтальный угол;  $P$  – точка в пространстве

Ниже представлено описание модели перемещения пуансона по криволинейной траектории. Рассматриваемая траектория лежит в вертикальной плоскости, перпендикулярно оси пуансона. В процессе инкрементального формообразования заготовка обрабатывается пуансоном, который перемещается по дуге окружности заданного радиуса. Данная траектория обуславливается частотой её использования при изготовлении деталей, получаемых именно круговыми движениями пуансона во время производственного процесса формообразования [15; 16].

В модели определяются значения координат перемещения робота, затем они переводятся в систему координат робота. Перемещение пуансона происходит в плоскости  $XOZ$ , при этом перемещения по оси  $Y$  (рис. 9) нет. Зная три точки на описываемой окружности  $C_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $C_2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $C_3(x_3, y_3, z_3)$  (точка начала окружности, промежуточная и конечная, соответственно) можно вычислить координату центра этой окружности  $C_0(x_0, y_0, z_0)$ , так как эта точка лежит в той же плоскости (рис. 9). Перемещение происходит в плоскости  $XOZ$ , поэтому составляющая  $Y = \text{const}$ , (ось  $Y$  направлена вдоль оси изделия).

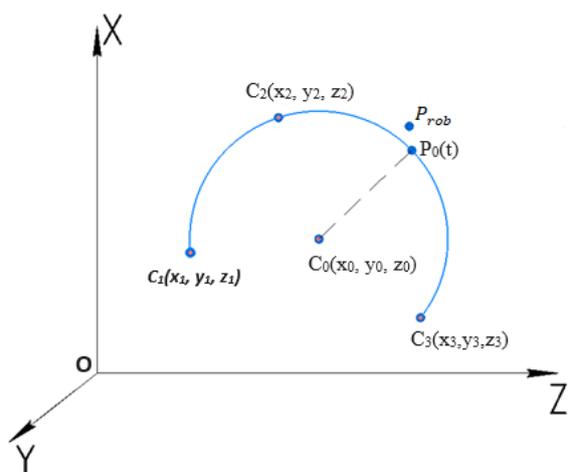


Рис. 9. Схема перемещения пуансона по окружности в процессе инкрементального формообразования

Параметры окружности, создаваемой пуансоном описываются уравнениями:

$$\begin{bmatrix} x_0 - x_1 & z_0 - z_1 \\ x_2 - x_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & z_3 - z_1 \end{bmatrix} = 0, \quad (4)$$

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 = R^2, \\ (x_2 - x_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 = R^2, \\ (x_3 - x_0)^2 + (z_3 - z_0)^2 = R^2, \end{cases} \quad (5)$$

где  $R$  – радиус окружности.

С учётом (5) значения координат центра и радиуса окружности можно представить в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $A_1, B_1, C_1$  – параметры, которые можно описать как:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = 0 \\ B_1 = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(z_3 - z_1) \\ C_1 = 0 \\ D_1 = -A_1 x_1 - B_1 y_1 - C_1 z_1 \\ A_2 = 2(x_2 - x_1) \\ B_2 = 0 \\ C_2 = 2(z_2 - z_1) \\ D_2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \\ A_3 = 2(x_3 - x_1) \\ B_3 = 0 \\ C_3 = 2(z_3 - z_1) \\ D_3 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2. \end{array} \right. \quad (7)$$

В рассматриваемом случае  $y_0 = y_1 = y_2 = y_3 = y_0$ , поэтому  $A_1, B_2, B_3, C_1$  – это нормальные векторы к плоскости.

Позиция пуансона в каждый момент времени описывается как  $P(t)$  и может быть рассчитана по формулам:

$$A_1(x(t) - x_1) + B_1(y(t) - y_1) + C_1(z(t) - z_1) = 0. \quad (8)$$

Проекцию кривой на плоскость  $XOZ$  можно описать как:

$$\begin{bmatrix} x_{rob}(t) \\ y_{rob}(t) \\ z_{rob}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ B_1 & -A_1 & 0 \\ C_1 & 0 & -A_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 x_1 + B_1 y_1 \\ B_1 x(t) - A_1 y_1 \\ C_1 x(t) - A_1 z(t) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$(x_0(t) - x_0)^2 + (z_0(t) - z_0)^2 = R^2, \quad (10)$$

$$\frac{x_0(t) - x_0}{x_p(t) - x_0} = \frac{z_0(t) - z_0}{z_p(t) - z_0}. \quad (11)$$

Следовательно, теоретическое положение во время перемещения по дуге окружности в начальный момент времени, а именно  $P_0(t)$ , может быть описана как:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0(t) = \frac{R}{\sqrt{1 + \left(\frac{z_0(t) - z_0}{x_0(t) - x_0}\right)^2}} \\ z_0(t) = \frac{(x_0(t) - x_0)(z(t) - x_0)}{x(t) - x_0} + z_0 \\ \sqrt{(x_0(t) - x(t))^2 + (z(t) - z_0(t))^2} < R \end{array} \right. \quad (12)$$

Матрица однородного преобразования между базовой системой координат робота и системой координат лазерного трекера:

$${}^i_b T = \begin{bmatrix} n_x & o_x a_x & p_x \\ n_y & o_y a_y & p_y \\ n_z & o_z a_z & p_z \\ 0 & 00 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где  $n$  – нормальный вектор;  $o$  – вектор направления;  $a$  – вектор приближения, который представляет отношение вращения между базовой системой координат робота и системой координат лазерного трекера.

Вектор  $p$  показывает соотношение между системами координат лазерного трекера и робота:

$${}^i_b T \cdot P_{rob} = P_{tracker}, \quad (14)$$

где  $P_{rob}$  – положение в системе координат робота;  $P_{tracker}$  – положение в системе координат лазерного трекера.

Положение в системе координат лазерного трекера можно преобразовать в базовую систему координат робота через следующее уравнение:

$$P_{rob} = {}^tT^{-1} \cdot P_{tracker} \cdot \quad (15)$$

Следовательно, ошибки в каждый момент пути в системе координат лазерного трекера могут быть преобразованы в ошибки в базовой системе координат робота через следующее уравнение:

$$\Delta P_{rob}(t) = \begin{bmatrix} \Delta x_{rob}(t) \\ \Delta y_{rob}(t) \\ \Delta z_{rob}(t) \\ 0 \end{bmatrix} = {}^tT^{-1} P_{tracker}(t) = {}^tT^{-1} \begin{bmatrix} x_0 - x_{rob}(t) \\ y_0 - y_{rob}(t) \\ z_0 - z_{rob}(t) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где  $\Delta x_{rob}(t), \Delta y_{rob}(t), \Delta z_{rob}(t)$  – ошибки позиционирования по осям в реальном времени.

В процессе работы алгоритма компенсации может возникнуть статическая ошибка регулирования, также ошибка может накапливаться, что приведёт в итоге к неправильной работе алгоритма. Для компенсации этих ошибок целесообразно использовать ПИД-регулятор (рис. 10).

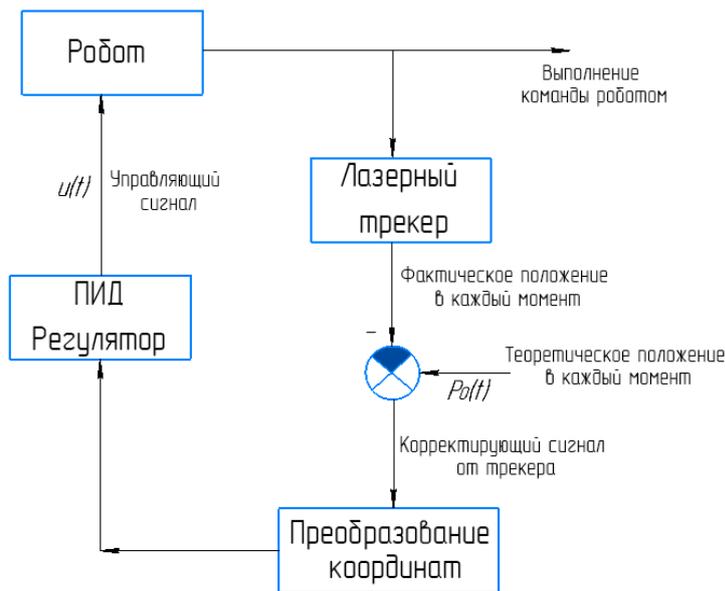


Рис. 10. Схема автоматизированного комплекса с использованием ПИД-регулятора

Выходное значение управляющего воздействия ПИД-регулятора можно описать уравнением:

$$u(t) = K_p \cdot {}^tT^{-1} \begin{bmatrix} x_0(t) - x_{rob}(t) \\ y_0(t) - y_{rob}(t) \\ z_0(t) - z_{rob}(t) \\ 0 \end{bmatrix} + K_i \cdot {}^tT^{-1} \sum \begin{bmatrix} x_0(t) - x_{rob}(t) \\ y_0(t) - y_{rob}(t) \\ z_0(t) - z_{rob}(t) \\ 0 \end{bmatrix} + K_D \cdot {}^tT^{-1} \begin{bmatrix} x_0(t) - x_0(t-1) - x_{rob}(t) + x_{rob}(t-1) \\ y_0(t) - y_0(t-1) - y_{rob}(t) + y_{rob}(t-1) \\ z_0(t) - z_0(t-1) - z_{rob}(t) + z_{rob}(t-1) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где  $u(t)$  – выходное значение управляющего воздействия ПИД-регулятора;  $K_p$  – пропорциональный коэффициент;  $K_i$  – интегральный коэффициент;  $K_D$  – дифференциальный коэффициент.

Линейная свертка не выполнялась, ПИД-регулятор работал непосредственно с данным набором параметров.

При моделировании целесообразно учитывать параметры системы, которые ограничивают точность измерений лазерного трекера:

- расстояние от трекера до отражателя;
- угол падения излучения на отражатель;
- расстояние между отражателями на оснастке;
- расстояние от отражателя на ТСП до плоскости заготовки;
- стабильность геометрических параметров оснастки.

Для оценки составляющих погрешности измерительной системы целесообразно использовать численное моделирование. В дальнейшем будет проведено экспериментальное исследование по оценке стабильности технологической оснастки.

### **Заключение**

В данной работе показана актуальность применения и совершенствования технологического процесса инкрементального формообразования. Описан состав автоматизированного технологического комплекса и показана целесообразность использования лазерного трекера в его составе для оценки точности перемещений роботоманипулятора. Предложенная математическая модель описывает формирование управляющего сигнала по результатам измерения перемещений инструментального центра робота с последующей оценкой величины рассогласования заданных и действительных координат, а также позволяет оценить точность соблюдения траектории перемещения инструмента при изготовлении осесимметричных деталей.

### **Библиографический список**

1. Arshad S., Rashid A., Melander A. Single point incremental forming. A study of forming parameters, forming limits and part accuracy of Aluminium 2024, 6061 and 7475 alloys. Stockholm: KTH Royal Institute of technology Stockholm, 2012. 102 p.
2. Medina-Sanchez G., Torres-Jimenez E., Lopez-Garcia R., Dorado-Vicente R., Cazalla-Moral R. Temperature influence on single incremental forming of PVC parts // *Procedia Manufacturing*. 2017. P. 335-342. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.085
3. Li L., Zhao Ch., Li Ch., Qin Sh. End position detection of industrial robots based on laser tracker // *Instrumentation Measure Métrologie*. 2019. V. 18, Iss. 5. P. 459-464. DOI: 10.18280/i2m.180505
4. Lu X., Jiang T. Working pose measurement and quality evaluation of rotary drilling rig based on laser tracker // *Optik*. 2019. V. 187. P. 311-317. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.04.137
5. Kamali K., Joubair A., Bonev I.A., Bigras P. Elasto-geometrical calibration of an industrial robot under multidirectional external loads using a laser tracker // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (May, 16-21, 2016, Stockholm, Sweden)*. 2016. DOI: 10.1109/icra.2016.7487630
6. Морев Д.С., Блохин Д.А., Кольцов А.Г. Исследование точности промышленного робота при работе в составе гибких производственных модулей //

Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 3. С. 79-86. DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-79-86

7. Ванцов С.В., Соколов В.А., Хомутская О.В. Анализ проблем точности прецизионных промышленных роботов // Научное приборостроение. 2021. Т. 31, № 4. С. 110-119. DOI: 10.18358/np-31-4-i110119

8. Баланев Н.В., Янов Р.А. Анализ факторов, влияющих на точность позиционирования промышленного робота и методы обеспечения заданной точности // Достижения науки и образования. 2016. № 1 (2). С. 11-14.

9. Flynn R., Christensen K., Ryan R. Automated metrology solution to reduce downtime and de-skill tooling recertification // SAE International Journal of Aerospace. 2012. V. 5, Iss. 1. P. 49-56. DOI: 10.4271/2012-01-1869

10. Praveen K., Lingam R., Reddy N.V. Tool path design system to enhance accuracy during double sided incremental forming: An analytical model to predict compensations for small/large components // Journal of Manufacturing Processes. 2020. V. 58. P. 510-523. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.014

11. Medina-Sanchez G., Torres-Jimenez E., Lopez-Garcia R., Dorado-Vicente R., Casalla-Moral R. The effect of temperature on the one-time step-by-step molding of PVC parts. University of Jaena, Spain, 2017. P. 335-342.

12. Nubiola A., Bonev I.A. Absolute calibration of an ABB IRB1600 robot using a laser tracker // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2013. V. 29, Iss. 1. P. 236-245. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.06.004

13. Moeller Ch., Schmidt H.Ch., Koch P., Boehlmann Ch., Kothe S., Wollnack J., Wollnack H. Real time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system // SAE International Journal of Aerospace. 2017. V. 10, Iss. 2. P. 100-108. DOI: 10.4271/2017-01-2165

14. Kubela T., Pochyly A., Singule V. Assessment of industrial robots accuracy in relation to accuracy improvement in machining processes // IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (September, 25-28, 2016, Varna, Bulgaria). 2016. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2016.7752083

15. Racz S.-G., Crenganiş M., Breaz R.-E., Bârsan A., Gîrjob C.-E., Biriş C.-M., Tera M. Integrating trajectory planning with kinematic analysis and joint torques estimation for an industrial robot used in incremental forming operations // Machines. 2022. V. 10, Iss. 7. DOI: /10.3390/machines10070531

16. Сазонникова Н.А., Илюхин В.Н., Сурудин С.В., Мезенцев Д.А. Контроль оснастки для инкрементального формообразования с помощью лазерного трекера // Динамика и виброакустика. 2021. Т. 7, № 4. С. 30-39. DOI: 10.18287/2409-4579-2021-7-4-30-39

## IMPROVING THE ACCURACY OF INDUSTRIAL ROBOT MOVEMENTS IN THE PROCESS OF INCREMENTAL SHAPING

© 2024

**N. A. Sazonnikova** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Power Plant Automatic Systems;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[nasazonnikova@yandex.ru](mailto:nasazonnikova@yandex.ru)

**V. N. Ilyukhin** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Power Plant Automatic Systems;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[iwnik@yandex.ru](mailto:iwnik@yandex.ru)

**S. V. Surudin** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Metal Forming;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[innosam63@gmail.com](mailto:innosam63@gmail.com)

**D. A. Mezentsev** Postgraduate Student, Department of Power Plant Automatic Systems;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[curucum@mail.ru](mailto:curucum@mail.ru)

The paper shows the relevance of using a laser tracker as part of an automated technological complex to improve the accuracy of movements of an industrial robot manipulator in the process of incremental shaping. The requirements for the measuring system of the technological complex are formulated. A mathematical model of the magnitude of the signal recorded using a laser tracker based on the results of measuring the movements of the robot manipulator is constructed. An algorithm for correcting robot movements in the process of incremental shaping in real time is described.

*Incremental shaping; robot manipulator; movement accuracy; laser tracker; mathematical model*

---

*Citation:* Sazonnikova N.A., Ilyukhin V.N., Surudin S.V., Mezentsev D.A. Improving the accuracy of industrial robot movements in the process of incremental shaping. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 2. P. 143-156. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-143-156

## References

1. Arshad S., Rashid A., Melander A. Single point incremental forming. A study of forming parameters, forming limits and part accuracy of Aluminium 2024, 6061 and 7475 alloys. Stockholm: KTH Royal Institute of technology Stockholm, 2012. 102 p.
2. Medina-Sanchez G., Torres-Jimenez E., Lopez-Garcia R., Dorado-Vicente R., Cazalla-Moral R. Temperature influence on single incremental forming of PVC parts. *Procedia Manufacturing*. 2017. P. 335-342. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.085
3. Li L., Zhao Ch., Li Ch., Qin Sh. End position detection of industrial robots based on laser tracker. *Instrumentation Measure Métrologie*. 2019. V. 18, Iss. 5. P. 459-464. DOI: 10.18280/i2m.180505
4. Lu X., Jiang T. Working pose measurement and quality evaluation of rotary drilling rig based on laser tracker. *Optik*. 2019. V. 187. P. 311-317. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.04.137
5. Kamali K., Joubair A., Bonev I.A., Bigras P. Elasto-geometrical calibration of an industrial robot under multidirectional external loads using a laser tracker. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (May, 16-21, 2016, Stockholm, Sweden)*. 2016. DOI: 10.1109/icra.2016.7487630
6. Morev D.S., Blokhin D.A., Koltzov A.G. Research of accuracy of industrial robot at work as part of flexible machining cells. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2019. V. 7, no. 3. P. 79-86. (In Russ.). DOI: 10.25206/2310-9793-7-3-79-86
7. Vantsov S.V., Sokolov V.A., Khomutskaya O.V. Analysis of accuracy problems of precision industrial robots. *Nauchnoe Priborostroenie*. 2021. V. 31, no. 4. P. 110-119. (In Russ.). DOI: 10.18358/np-31-4-i110119
8. Balanov N.V., Yanov R.A. Analysis of factors affecting the positioning accuracy of industrial robots and methods for ensuring specified accuracy. *Dostizheniya Nauki i Obrazovaniya*. 2016. No. 1 (2). P. 11-14. (In Russ.)
9. Flynn R., Christensen K., Ryan R. Automated metrology solution to reduce downtime and de-skill tooling recertification. *SAE International Journal of Aerospace*. 2012. V. 5, Iss. 1. P. 49-56. DOI: 10.4271/2012-01-1869
10. Praveen K., Lingam R., Reddy N.V. Tool path design system to enhance accuracy during double sided incremental forming: An analytical model to predict compensations for small/large components. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. V. 58. P. 510-523. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.014

11. Medina-Sanchez G., Torres-Jimenez E., Lopez-Garcia R., Dorado-Vicente R., Casalla-Moral R. The effect of temperature on the one-time step-by-step molding of PVC parts. University of Jaena, Spain, 2017. P. 335-342.
12. Nubiola A., Bonev I.A. Absolute calibration of an ABB IRB1600 robot using a laser tracker. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2013. V. 29, Iss. 1. P. 236-245. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.06.004
13. Moeller Ch., Schmidt H.Ch., Koch P., Boehlmann Ch., Kothe S., Wollnack J., Wollnack H. Real time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system. *SAE International Journal of Aerospace*. 2017. V. 10, Iss. 2. P. 100-108. DOI: 10.4271/2017-01-2165
14. Kubela T., Pochyly A., Singule V. Assessment of industrial robots accuracy in relation to accuracy improvement in machining processes. *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (September, 25-28, 2016, Varna, Bulgaria)*. 2016. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2016.7752083
15. Racz S.-G., Crenganiş M., Breaz R.-E., Bârsan A., Gîrjob C.-E., Biriş C.-M., Tera M. Integrating trajectory planning with kinematic analysis and joint torques estimation for an industrial robot used in incremental forming operations. *Machines*. 2022. V. 10, Iss.7. DOI: /10.3390/machines10070531
16. Sazonnikova N.A., Ilyukhin V.N., Surudin S.V., Mezentsev D.A. Control of equipment for incremental forming using a laser tracker. *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*. 2021. V. 7, no. 4. P. 30-39. (In Russ.). DOI: 10.18287/2409-4579-2021-7-4-30-39