

В общем случае за счёт применения новых алгоритмов детектирования дефектов достигаются следующие преимущества:

- высокая производительность автоматического контроля;
- более глубокое субпиксельное разрешение;
- возможность специализации алгоритмов по типам обрабатываемой топологии и группам дефектов, за счёт чего, в свою очередь, достигается высокая обнаружительная способность и низкая вероятность возникновения ложных или некритичных дефектов;
- существенное упрощение аппаратной реализации алгоритмов (такой подход позволяет до предела упростить аппаратную реализацию алгоритмов и в пределах свести их все до одной сильно распараллеленной операции, выполняемой за один такт);
- возможность глубокого распараллеливания каждого из алгоритмов;
- возможность определения фотолитографической значимости дефектов в режиме реального времени;
- простота введения элементов обучения и самообучения в систему.

Список использованных источников:

1. Аваков, С.М. Автоматический контроль топологии планарных структур / С.М. Аваков. – Минск : ФУАинформ, 2007. – 168 с.
2. Alfred, K.W. Resolution Engancement Techniques in Optical Lithography. SPIE PRESS, USA, 2001. – pp. 1–213.
3. Титко, Е.А. Автоматическое оборудование контроля топологии фотошаблонов / Е.А. Титко, Д.С. Титко, С.Е. Карпович // 50-я науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов по направлению: Компьютерные системы и сети : материалы конф., Минск, Респ. Беларусь, 24–28 марта 2014 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2014. – С. 62.
4. Титко, Е.А. Универсальная система получения субпиксельного разрешения / Е.А. Титко, С.А. Манин, Г.А. Зубов // Информационные технологии и системы 2016 : материалы Междунар. науч. конф., Минск, Респ. Беларусь, 26 окт. 2016 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2016. – С. 88–89.
5. Дайняк, И.В. Адаптивные системы перемещений для юстировки оптических элементов фотолитографического объектива / И.В. Дайняк, Е.А. Титко, Д.С. Титко // 5-ый Всероссийский Конгресс молодых учёных, ИТМО, Санкт-Петербург, 2016 – С. 125–126.

## ПОСТРОЕНИЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ДВИЖЕНИЙ С ЗАДАННОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ОБЪЕКТОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Форутан М. М.*

*Конюх Л. А. – канд. техн. наук, доцент*

Представлен метод построения программируемых движений с заданной ориентацией объектов основанный на описании топологии механизма параллельной кинематики методами аналитической геометрии и матричных преобразований, в результате которых получены аналитические решения.

Для построения программируемых движений с заданной ориентацией объектов методами аналитической геометрии, не нарушая общности постановки задачи, рассмотрим расчетную геометрическую модель (рис. 1), представленную геометрическим местом точек, характеризующих текущую конфигурацию механизма [1]. При этом подвижная платформа обозначается вершинами  $A, B, C$  треугольника  $\triangle ABC$ , которые получены пересечением осей соответствующих кинематических подвижностей. В свою очередь, кинематические подвижности соответствующих треугольных ног системы перемещений с шестью степенями свободы задаются точками  $D, E, F$  с соответствующими векторами подвижностей  $\vec{AB}, \vec{BC}, \vec{CA}$ . Подвижные звенья с соответствующими двухкоординатными ЛШД в принятой геометрической модели представлены линейными подвижными звеньями  $DR_1, ER_2$  и  $FR_3$ .

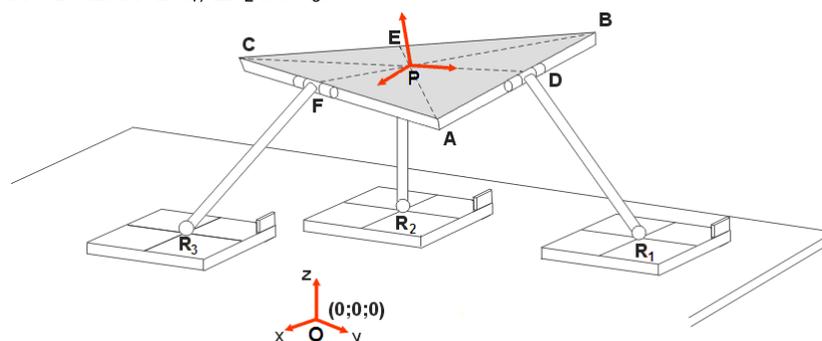


Рис. 1. – Обобщенная геометрическая модель

В ранее выполненной работе [2, 3] были представлены алгоритмы решения прямой и обратной задач кинематики, которые позволяют получить координаты точек  $A$ ,  $B$ ,  $C$  подвижной платформы (рис. 1) по задаваемым законам перемещения позиционеров  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .

Для построения программируемых движений с заданной ориентации платформы нами разработан алгоритм пересчёта девяти координат точек  $A$ ,  $B$ ,  $C$  в шесть независимых параметров движения платформы  $x_p, y_p, z_p, \varphi_p, \theta_p, \psi_p$ . Для этого была получена матрица четвертого порядка  $M_{0P}$ , элементы которой представляют в однородных координатах положение и ориентацию системы координат, связанной с подвижной платформой в точке  $P$  (рис. 1). В общем случае матрица  $M_{0P}$  имеет следующий вид:

$$M_{0P} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & x_p \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & y_p \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где элементы  $a_{ij} (i, j=1,2,3)$  являются направляющими косинусами углов, образованных всеми осями подвижной системы координат, связанной с платформой, с осями неподвижной системы координат статора  $OXYZ$ ;  $x_p, y_p, z_p$  – координаты точки  $P$  в неподвижной системе координат  $OXYZ$ .

По известным координатам точек  $A$ ,  $B$ ,  $C$  однозначно определяются все элементы матрицы  $M_{0P}$  по следующим выражениям:

$$a_{11} = \frac{x_B - x_A}{l_{AB}}; \quad a_{12} = \frac{y_B - y_A}{l_{AB}}; \quad a_{13} = \frac{z_B - z_A}{l_{AB}}; \quad (2)$$

$$a_{21} = \frac{x_P - x_C}{l_{CP}}; \quad a_{22} = \frac{y_P - y_C}{l_{CP}}; \quad a_{23} = \frac{z_P - z_C}{l_{CP}}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} a_{31} &= a_{12}a_{23} - a_{22}a_{13}; \\ a_{32} &= a_{21}a_{13} - a_{11}a_{23}; \\ a_{33} &= a_{11}a_{12} - a_{13}a_{21}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$x_p = \frac{x_A + x_B + x_C}{3}; \quad y_p = \frac{y_A + y_B + y_C}{3}; \quad z_p = \frac{z_A + z_B + z_C}{3}; \quad (5)$$

$$l_{AB} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}; \quad (6)$$

$$l_{CP} = \sqrt{(x_P - x_C)^2 + (y_P - y_C)^2 + (z_P - z_C)^2}. \quad (7)$$

Элементы  $a_{ij} (i, j=1,2,3)$  матрицы  $M_{0P}$  позволяют рассчитать углы Эйлера  $\varphi_p, \theta_p, \psi_p$ , однозначно задающие ориентацию подвижной платформы в неподвижной системе координат  $OXYZ$ , по выражениям

$$\cos \varphi_p = \frac{a_{13}a_{22} - a_{23}a_{12}}{\sqrt{a_{13}^2 + a_{23}^2}}; \quad \sin \varphi_p = \frac{a_{32}}{\sqrt{a_{13}^2 + a_{23}^2}}; \quad (8)$$

$$\cos \theta_p = a_{33}; \quad \sin \theta_p = \sqrt{a_{13}^2 + a_{23}^2}; \quad (9)$$

$$\cos \psi_p = \frac{a_{23}}{\sqrt{a_{13}^2 + a_{23}^2}}; \quad \sin \psi_p = \frac{a_{13}}{\sqrt{a_{13}^2 + a_{23}^2}}. \quad (10)$$

Полученные углы Эйлера и координаты точки  $P$  определяют искомую матрицу положения и ориентации подвижной платформы, необходимую при построении программируемых движений с заданной ориентацией объектов.

Список использованных источников:

1. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования / В.В. Жарский [и др.] ; под ред. д-ра техн. наук, проф. С.Е. Карповича. – Минск : Бестпринт, 2013. – 208 с.
2. Карпович, С.Е. Имитационное моделирование кинематики системы перемещений с интерактивной визуализацией результатов / С.Е. Карпович, В.В. Кузнецов, М.М. Форутан // Докл. БГУИР – Минск, 2016. – № 3. – С 22–28.
3. Прецизионная система совмещения с шестью степенями свободы на кольцевом приводе прямого действия / С.Е. Карпович, Г.А. Зубов, М.М. Форутан, Г.И. Салманзаде // Теоретическая и прикладная механика. – 2017. – №32. – С. 85–91.