

ОПРЕДЕЛЕНИЕ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ КИНЕМАТИКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ КАК ОСНОВЫ ИХ ВИЗУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Дёшнер Х. докт. тех. наук, проф., Красных А.Н., аспирант,
 Otto-von-Guericke университет Магдебург

В этой статье исследована возможность определения в реальном времени кинематики роботов как основы их визуального управления. При этом обратная кинематика робота определяется посредством оптимизации Левенберга-Марквардта. Эффективность данного подхода доказана при моделировании, а также экспериментально для 6 суставного индустриального робота.

In this paper, the determination of the robots kinematics as basis of their visual control is presented. The inverse kinematics of the robot is determined by means of Levenberg-Marquardt optimization. The efficiency of this approach is proven in simulations as well as experimentally for a industrial robot with 6 axis.

В процессе исследований была разработана концепция визуального управления индустриальным роботом в реальном времени, представленная на рис.1. Данная структура осуществляет управление роботом на основании сигналов оптических датчиков о положении и ориентации объекта в рабочем пространстве и состоит из системы камер, обратной кинематики, генератора траекторий и прямой кинематики.

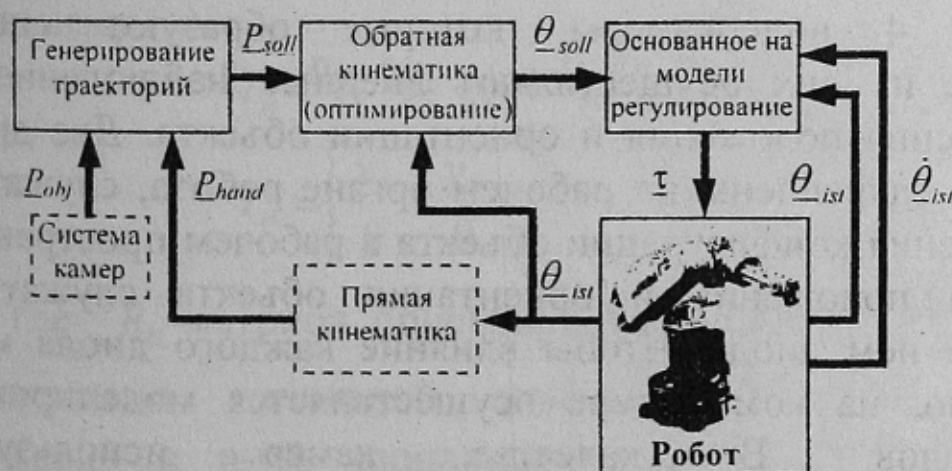


Рисунок 1 – Схема визуального управления роботом

Регулирование робота, основанное на модели, использует специальную нейрональную архитектуру, основанную на экспериментальных данных для моделирования нелинейной динамической структуры робота. Данная система регулирования уже разработана и используется [3]. Управление роботом с помощью визуальной информации требует построения системы между визуальной информацией, полученной от оптических датчиков, и углами сочленения суставов робота. Система визуального управления, основанная на кинематике робота, осуществляет необходимое изменение углов сочленения суставов, которые являются входными сигналами для системы регулирования (θ_{soll}). Система камер служит для определения положения и ориентации объекта (P_{obj}) в рабочем пространстве робота, используя сигналы от оптических датчиков. С другой стороны, положение и ориентация рабочего органа робота (P_{hand}) вычисляется с помощью прямой кинематики из измеренных углов сочленения суставов (θ_{ist}). При этом положение и ориентация руки робота и объекта являются соответственно начальной и конечной точками, между которыми с помощью задатчика траекторий генерируется траектория в пространстве. Данная траектория упорядочивает изменения положения и ориентации рабочего органа робота во времени (P_{soll}), которые являются входными сигналами для инверсной кинематики. Инверсная кинематика осуществляет трансформацию из конфигурации рабочего органа в пространстве в желаемые значения углов сочленения суставов (θ_{soll}).

Для практической реализации визуального управления робота были выбраны 4 видеокамеры, которые образуют систему видеокамер. Две из них осуществляют внешнее наблюдение для грубого определения положения и ориентации объекта. Две других камеры, которые закреплены на рабочем органе робота, служат для точного определения конфигурации объекта в рабочем пространстве. Для определения положения и ориентации объекта служат три закрепленные на нем диода. Чтобы влияние каждого диода могло быть обнаружено, на компьютере осуществляется моделирование сигналов диодов. В качестве камер используются позиционновосприимчивые детекторы (PSD) из-за их высокой точности, скорости и малой нелинейности. Кроме того, в отличии от

обычных камер, разрешение позиционновосприимчивых детекторов не ограничено размерами точек и прежде всего не требует распознавание изображений камер. Таким образом, наша измерительная система камер состоит из четырех PSD-датчиков, четырех усилителей для обработки и усиления сигналов и DSpace-системы для А/D-преобразования. В качестве робота используется 6 суставной индустриальный робот "manutec r2" фирмы "Siemens".

Как видно из рис.1, кинематика играет существенную роль в визуальном управлении роботом. Различают прямую и обратную кинематику. Согласно [2] и [5] прямая кинематика робота находит для определенной конфигурации сустава точку в декартовом рабочем пространстве. Так как положение робота соответствует точке в рабочем пространстве, прямая кинематика находит однозначное решение. Для каждого сустава существует соответствующая координатная система. Параметры Денавита-Хартенберга описывают преобразование от одной координатной системы сустава к следующей [1].

$${}^{i-1}T_i = \begin{pmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где R-матрица вращения и P-вектор положения. При этом преобразование между любыми суставами осуществляется посредством перемножения матриц преобразования. Для робота с i суставами можно найти преобразование от первого сустава (0) к последнему (n).

$${}^0T_n = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot \dots \cdot {}^{n-1}T_n = f(\underline{\theta});$$

$${}^0T_n = \begin{bmatrix} x_n & y_n & z_n & p_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0R_n & {}^0p_n \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

где 0R_n -матрица ориентирования n-ой координатной системы относительно начальной координатной системы, 0p_n -вектор положения к n-ой координатной системе. Под n-ым суставом подразумевается рабочий орган робота. Матрица ориентирования записывается так же в следующем виде:

$${}^0R_n = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} = [\underline{n} \quad \underline{s} \quad \underline{a}] \quad (3)$$

Для описания ориентации намного удобнее использовать так называемые углы Эйлера [2] (α , β , γ), вместо матрицы ориентирования, т.к. они содержат только три переменных в отличии от 0R_n с девятью.

$$\gamma = a \tan 2(n_y, n_x)$$

$$\beta = a \tan 2(-n_z, n_x \cos \gamma + n_y \sin \gamma) \quad (4)$$

$$\alpha = a \tan 2(a_x \sin \gamma - a_y \cos \gamma, -s_x \sin \gamma + s_y \cos \gamma)$$

Если геометрические параметры робота точно определены, то положение и ориентацию рабочего органа можно определить с помощью прямой кинематики.

Задача обратной кинематики состоит в определении из заданного положения P и ориентации (α , β , γ) соответствующих углов сочленения θ_i . При этом обратная кинематика математически намного сложнее, чем прямая.

$$\theta_i = f^{-1}({}^0T_i) \quad (5)$$

Так как обратная кинематика нам необходима в online-режиме работы, то ставятся требования по скорости. Для данной кинематики не существует общих методов решения из-за её сильной нелинейности. Сложность проблемы заключается также в нахождении общего численного решения для любого робота. Кроме того, обратное преобразование находит не однозначные решения для углов сочленения. Одно и то же положение рабочего органа может быть зачастую достигнуто посредством множества различных конфигураций робота. Выбор правильной конфигурации является также важной задачей обратной кинематики. Из-за ряда таких проблем было предложено определение обратной кинематики с помощью метода оптимизации Левенберга-Марквардта для нелинейной системы (см.ур.5). При этом последние определенные углы сочленения служат как начальные значения для расчета новых углов. Другими словами, оптимизация Левенберга-Марквардта осуществляет минимизацию функции квадратичной ошибки по

положению и ориентации рабочего органа в каждой точке i заданной траектории движения.

$$E_i(\theta) = \min \left(\frac{1}{2} \sum_i \left({}^0T_{ni} - f(\theta_{i-1}) \right)^2 \right) = y^T(\theta) \cdot y(\theta) \quad (6)$$

В качестве начальных значений выбираются углы сочленения θ_{i-1} , которые соответствуют начальной точке P_0 в декартовой системе координат. Вычисление новых углов сочленения производится согласно уравнению Левенберга-Марквардта [4], который является разновидностью методов градиентного спуска

$$\left(2J^T(\theta) \cdot J(\theta) + \lambda \cdot I \right) \cdot h(\lambda) = -2J^T(\theta) \cdot y(\theta), \quad (5)$$

где $J(x)$ - Якоби-матрица, λ - коэффициент демпфирования, который определяет скорость нахождения минимума функции и зависит от скорости изменения θ и $h(\lambda)$ - определяет направление спуска и в нашем случае является $\Delta\theta$ на каждом шаге минимизации.

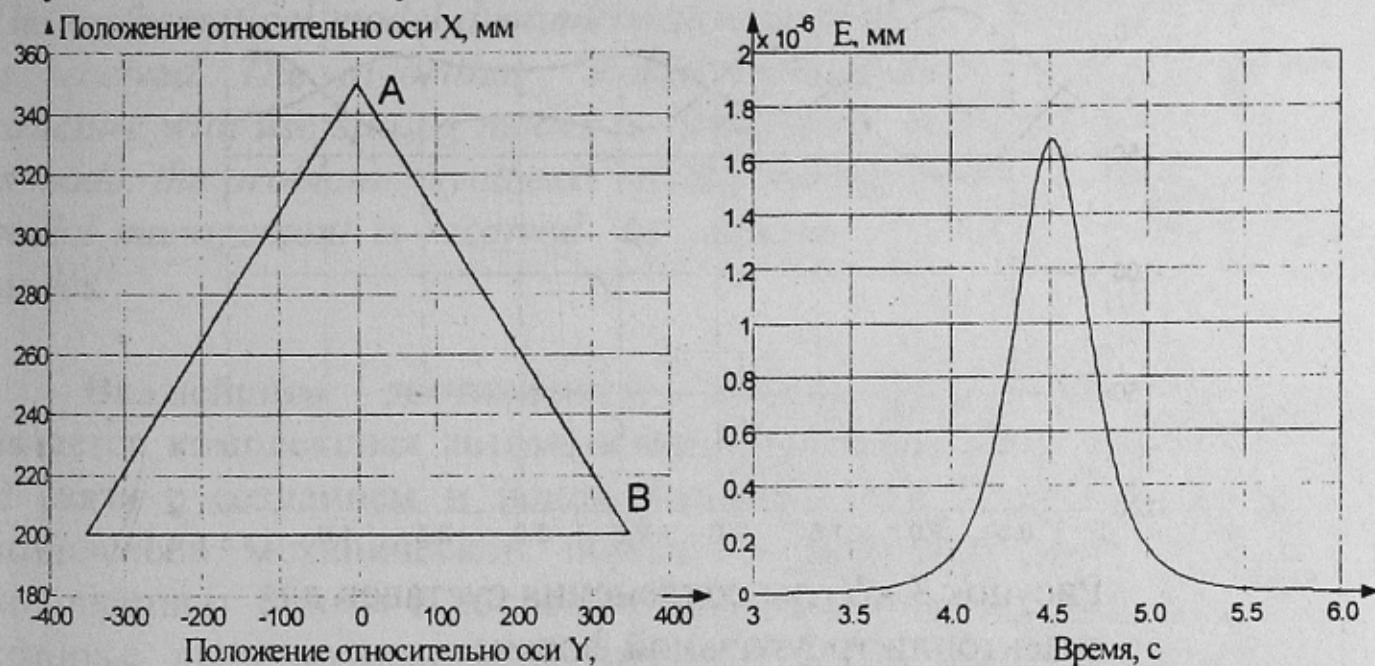


Рисунок 2 - Траектория треугольной формы при постоянной ориентации рабочего органа и функция ошибки на участке АВ

Эффективность данного метода определения обратной кинематики доказана при моделировании, а также экспериментально для 6-ти суставного промышленного робота "manutec r2". На рис.2 изображена траектория треугольной формы в пространстве в плоскости XY при постоянной ориентации рабочего органа и соответствующая квадратичная ошибка по положению и ориентации на участке АВ. Для каждой точки данной траектории были найдены с

помощью оптимизации Левенберга-Марквардта соответствующие углы сочленения, которые определяются с достаточной степенью точности после 8 циклов минимизации (см. рис.3)

Другой проблемой визуального управления роботом является генерирование траекторий в декартовой координатной системе. На данный момент она не полностью рассмотрена, т.к. осуществляется только генерирование линейных траекторий в пространстве согласно полиному пятого порядка. Данные траектории образуются между начальной и конечной точками положения рабочего органа в рабочем пространстве робота.

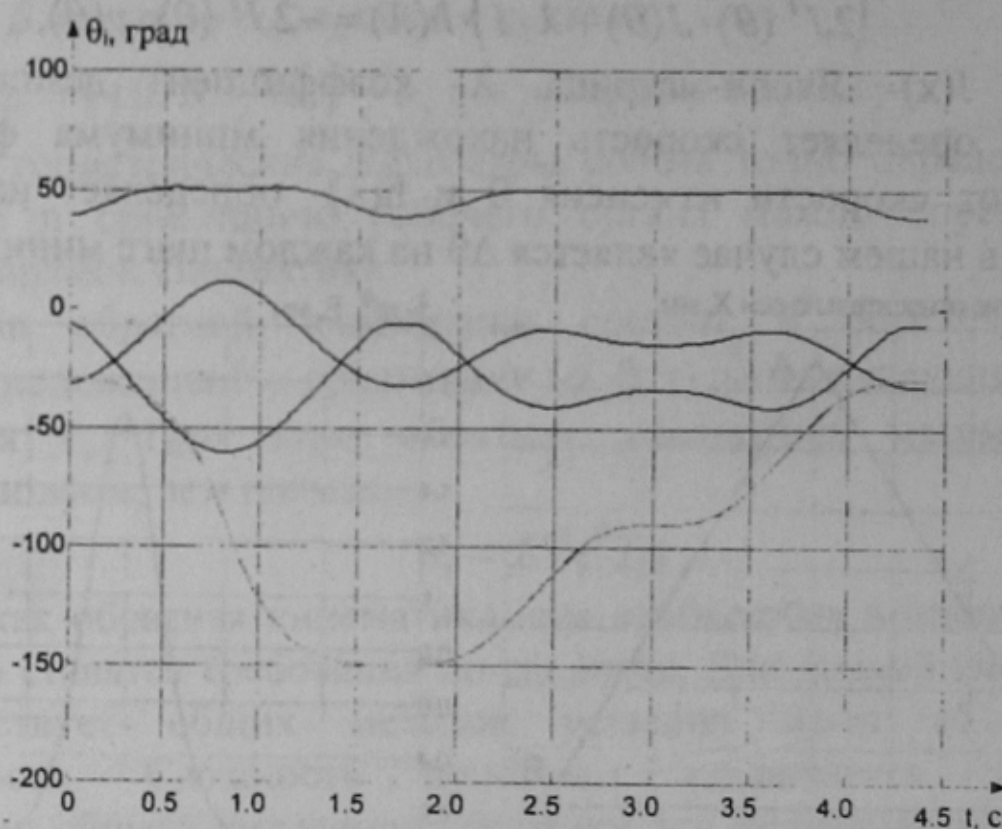


Рисунок 3 - Углы сочленения суставов для траектории треугольной формы

Список источников.

1. J.J. Craig: Introduction to Robotics. Electrical and Computer Engineering. Addison-Wesley Publishing C., MA: 1989, - p.450
2. K.S. Fu, R.C. Gonzales and C.S.G. Lee: Robotics: Control. Sending, Vision and Intelligence, New York: McGraw-Hill, 1987, - p.580
3. M.S. Liping Sun: Beitrag der Entwicklung lernfähiger Strukturen für die visuomotorische Koordination von Robotern. Universität Magdeburg, IFAT, Dissertation, 2000, - p.105
4. W. Krabs: Einführung in die lineare und nichtlineare Optimierung für Ingenieure. Leipzig: 1983, - p.232
5. R.P. Paul: The Computer Control of Robot Manipulators. MIT-Press, Massachusetts: 1986, - p.279