

Теория

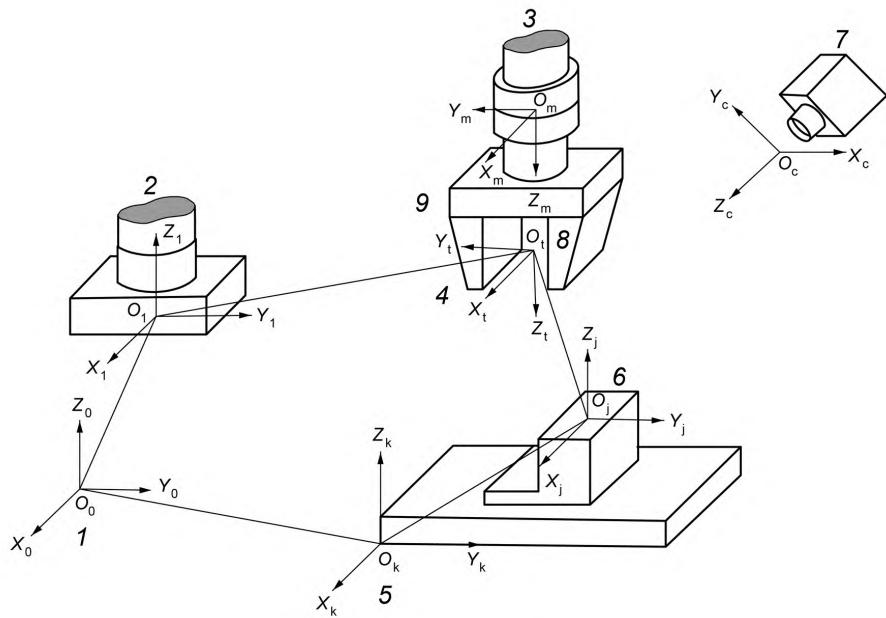
Стандартные системы координат промышленного робота согласно ISO 9787

- **Система координат основания** $\{B\}$ (base coordinate system) - система координат, связанная с установочной поверхностью основания
- **Система координат механического интерфейса** $\{F\}$ (на практике часто называют как flange coordinate system) - система координат, связанная с механическим интерфейсом руки робота - фланцем
- **Система координат инструмента** $\{T\}$ (tool coordinate system, TCS) - система координат, связанная с инструментом или рабочим органом робота, прикрепленным к механическому интерфейсу
- **Система координат камеры** $\{C\}$ (camera coordinate system) - система координат, связанная с сенсором, который контролирует место выполнения задания
- **Система координат объекта** $\{M\}$ (object coordinate system) - система координат, связанная с объектом. В нашем случае объекты - это ArUco маркеры
- **Центральная точка инструмента, ЦТИ** (tool centre point, TCP) - точка, определенная в системе координат механического интерфейса для конкретного применения робота

Формулы поворота и переноса - преобразование координат

Углы поворота

- ϕ - поворот вокруг оси X
- θ - поворот вокруг новой оси Y'
- ψ - поворот вокруг новой оси Z''



1 — глобальная система координат; 2 — система координат основания; 3 — система координат механического интерфейса; 4 — система координат инструмента; 5 — система координат задания; 6 — система координат объекта; 7 — система координат камеры; 8 — ЦТИ; 9 — захватное устройство

Рис. 1: Системы координат при взятии объекта (ISO 9787)

Поворот вокруг оси X на угол ϕ

$$R_x(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

Поворот вокруг оси Y на угол θ

$$R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

Поворот вокруг оси Z на угол ψ

$$R_z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Общий вид матрицы поворота

$$R(\psi, \theta, \phi) = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \cos \phi \sin \psi & \cos \psi \cos \phi \sin \theta + \sin \psi \sin \phi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \psi \sin \theta - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \quad (4)$$

Поворот точки

Если точка M имеет координаты (x, y, z) в исходной системе, то после поворота:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (5)$$

Поворот с переносом начала координат

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Постановка задачи и последовательность решения

Исходные данные и допущения

- В поле зрения камеры находится калибровочный маркер **1**, для которого точно известны координаты относительно базы робота - $(X_{M_1}, Y_{M_1}, Z_{M_1})$.
- Система координат камеры расположена следующим образом: начало находится в оптическом центре камеры, ось Z направлена вперед от камеры в сторону сцены, ось X направлена вправо, ось Y вниз.
- Также в поле зрения камеры находится произвольный целевой маркер **2**. Требуется найти его координаты $(X_{M_2}, Y_{M_2}, Z_{M_2})$ относительно базы робота, а также угол поворота вокруг оси Z базы робота (YAW).
- Считается, что оба маркера лежат в плоскости, параллельной плоскости XOY базы робота. Плоскость XOY камеры также параллельна плоскости XOY базы робота.

- Для камеры известна матрица внутренних параметров:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Дисторсия камеры не учитывается.

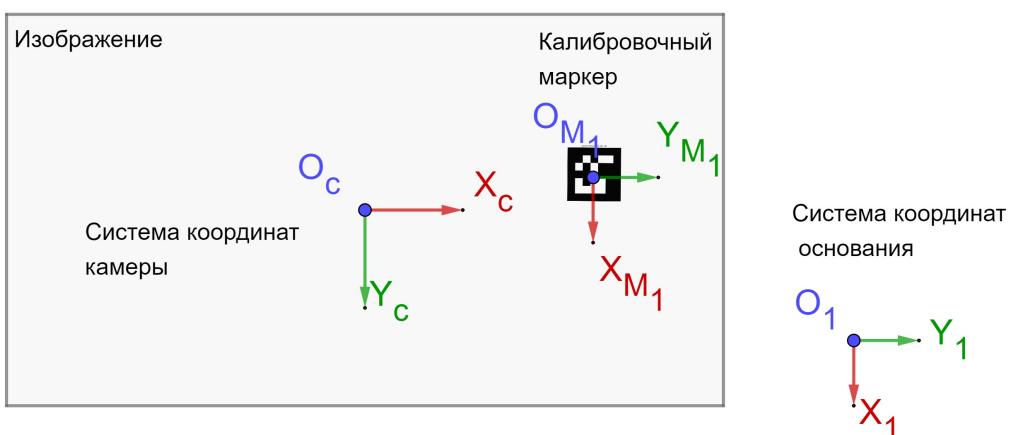


Рис. 2: Взаимное расположение систем координат. Все системы координат - правые

Вычисление координат и ориентации произвольного маркера относительно базы робота

1. Экспериментальным путем (с помощью замеров) определяем координаты калибровочного маркера относительно системы координат основания робота ($X_{M_1}, Y_{M_1}, Z_{M_1}$).
2. С помощью инструментов компьютерного зрения определяем координаты калибровочного маркера относительно камеры ($X_{M_1}^C, Y_{M_1}^C, Z_{M_1}^C$).
3. Вычисляем координаты камеры относительно системы координат основания робота (X_C, Y_C, Z_C).
4. С помощью инструментов компьютерного зрения определяем координаты целевого маркера относительно камеры ($X_{M_1}^C, Y_{M_1}^C, Z_{M_1}^C$), а также его угол поворота θ_C вокруг оси Z камеры.
5. Вычисляем координаты целевого маркера относительно системы координат основания робота ($X_{M_2}, Y_{M_2}, Z_{M_2}$), а также его угол поворота относительно оси Z робота θ_R .