

中国大恒(集团)有限公司
北京图像视觉技术分公司

基于HALCON的机器人 手眼标定及其应用

大恒图像 魏学光



工业机器人简介



手眼标定

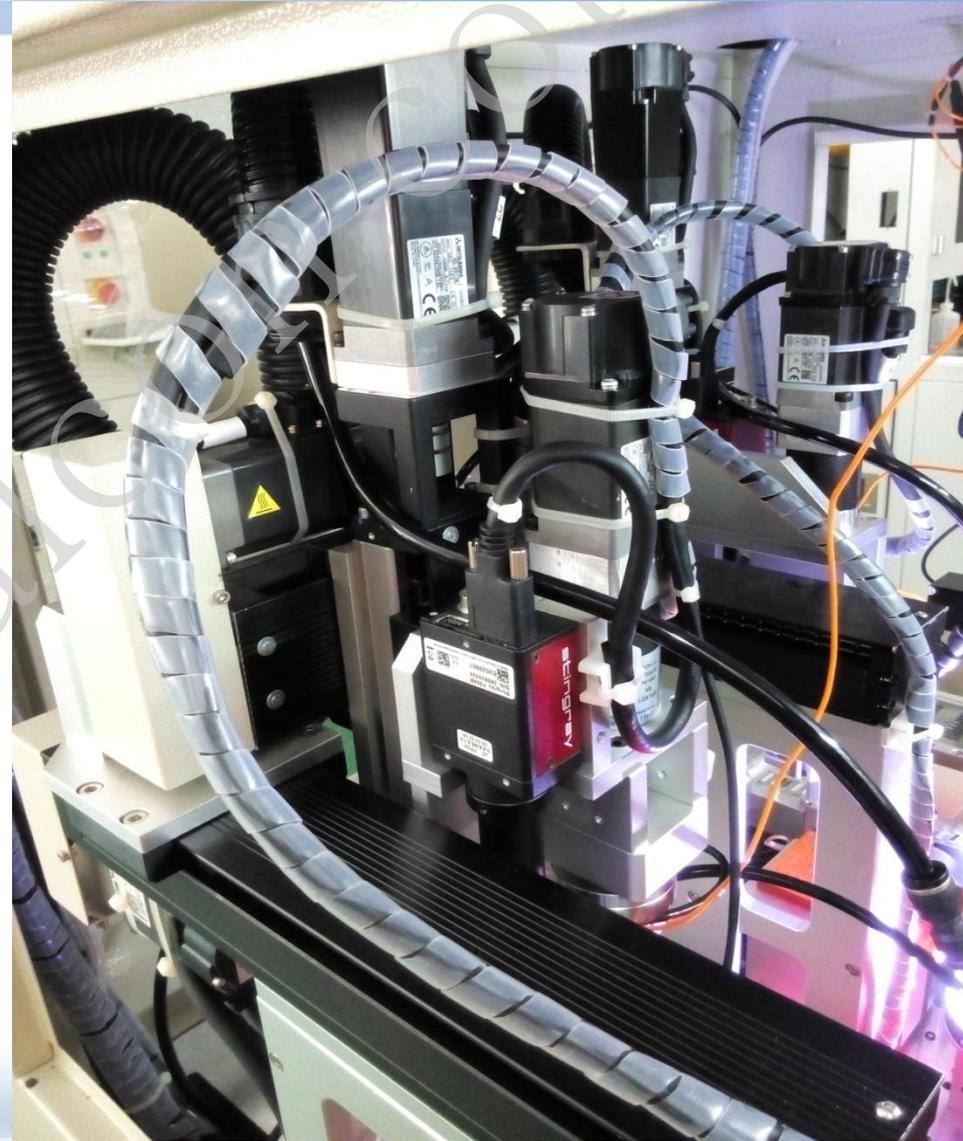


机器人应用





直角坐标机器人





关节机器人





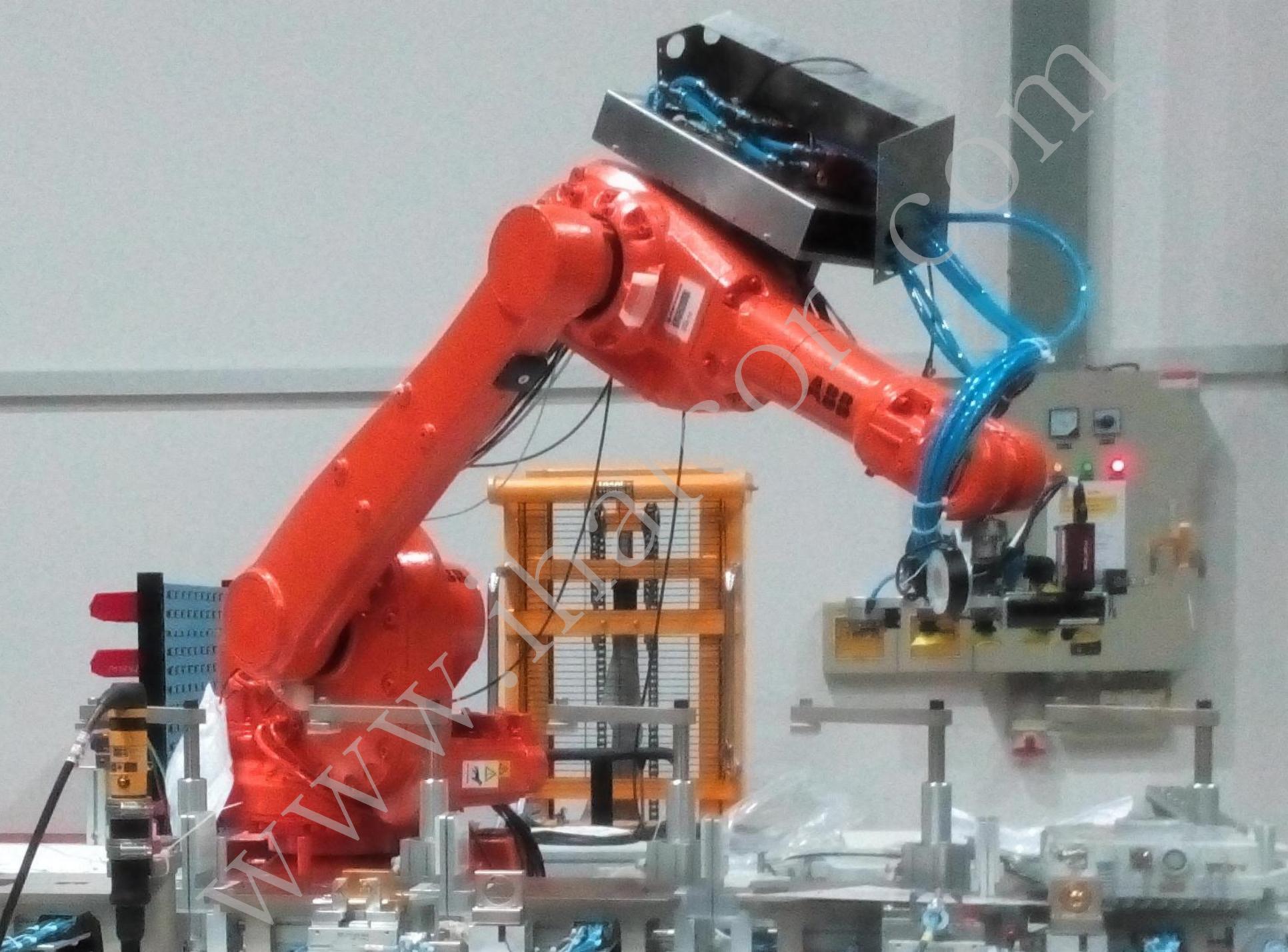
- A 7 40 Nm
- A 6 40 Nm
- A 5 110 Nm
- A 4 176 Nm
- A 3 176 Nm
- A 2 320 Nm
- A 1 320 Nm

LBR iiwa 14 R820

7 轴

得益于其采用了根据人类手臂研制而成的仿生运动系统，即便在空间狭小、难以变形的场合，LBR iiwa 14 R820 也能完成各种复杂的任务。

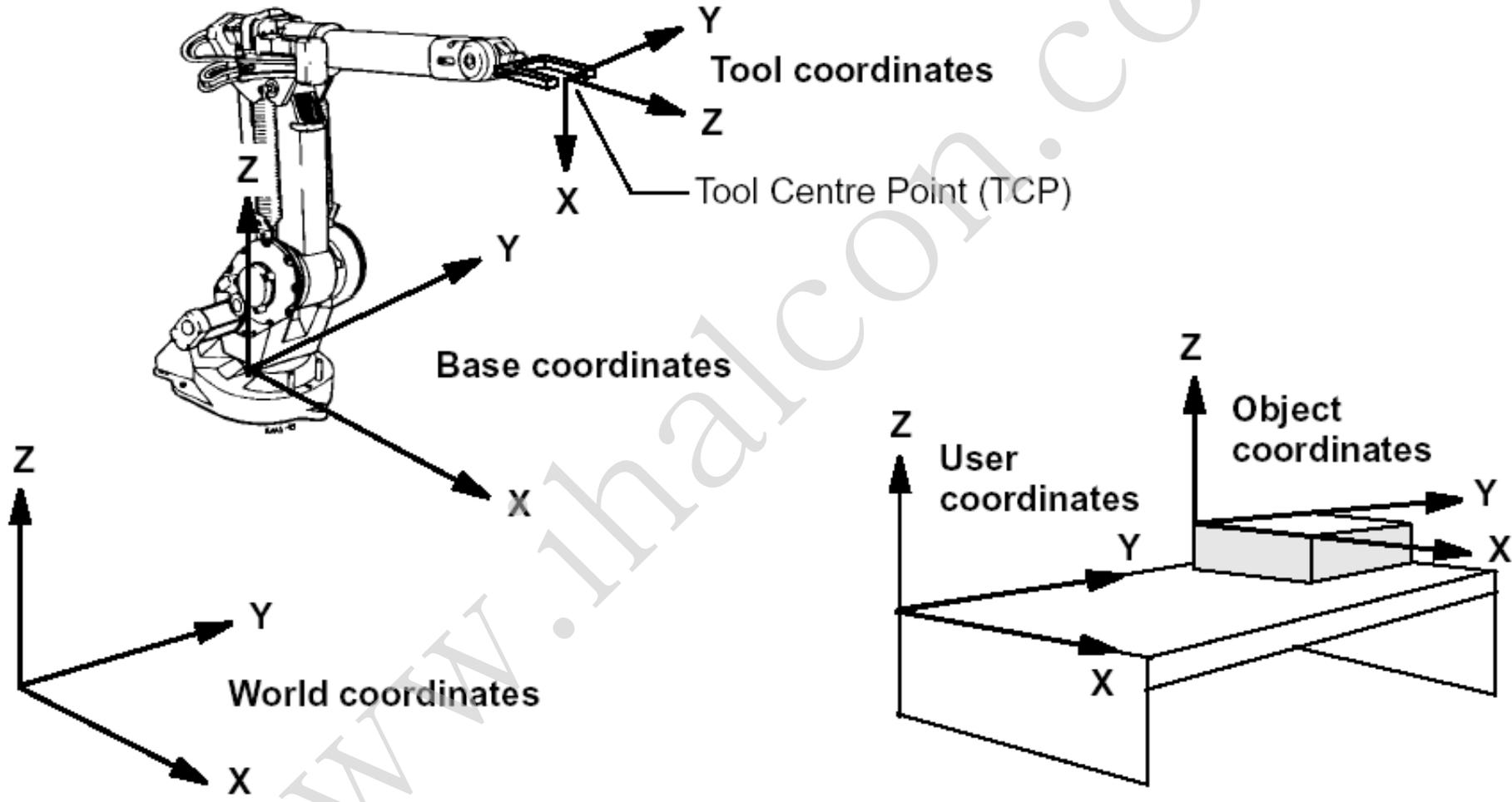




- 路径需要设定
- 不是所有位置均可达
- 重复精度： $\geq \pm 0.01\text{mm}$
- 丝杆精度： $\geq \pm 0.002\text{mm}$

注：一丝，一条，一道都是机械生产加工的通俗说法，又称为忽米，等于0.01毫米 = $10\mu\text{m}$ 。

- 基坐标系
- 工具坐标系 , TOOL0 , TCP
- 用户坐标系 , User Frame
- 工件坐标系 , Wobj

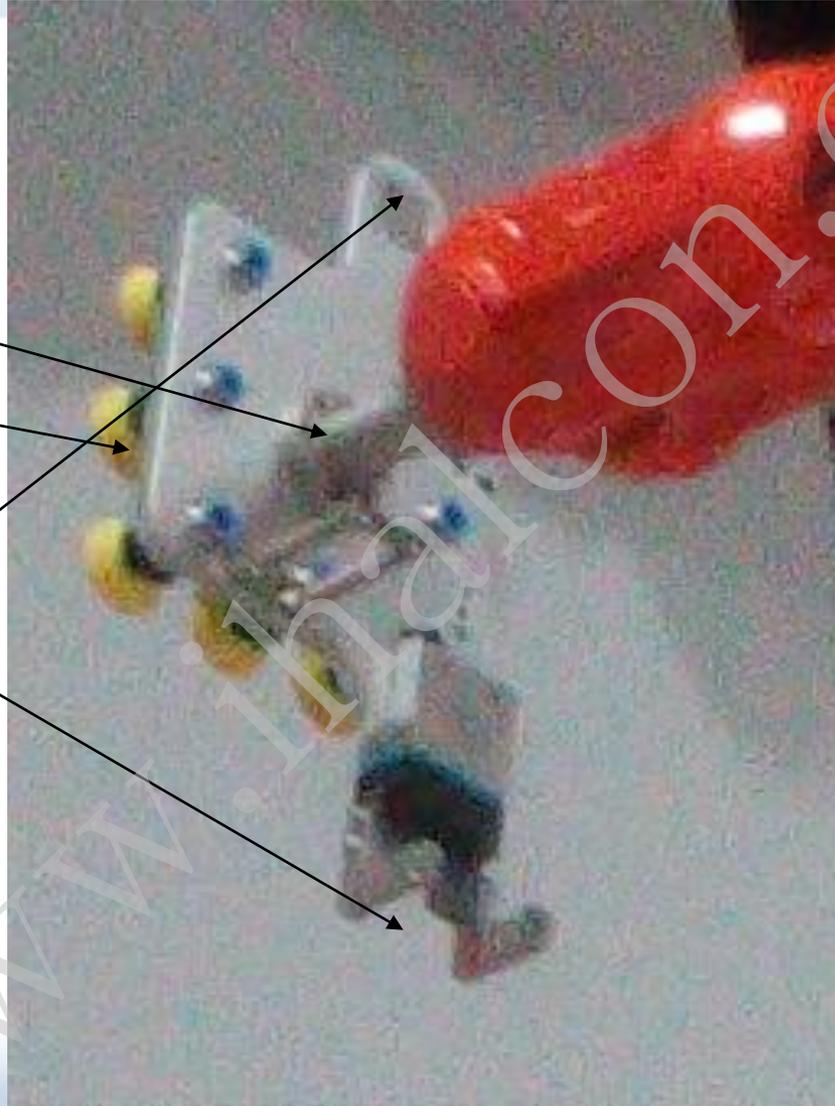


Tool0

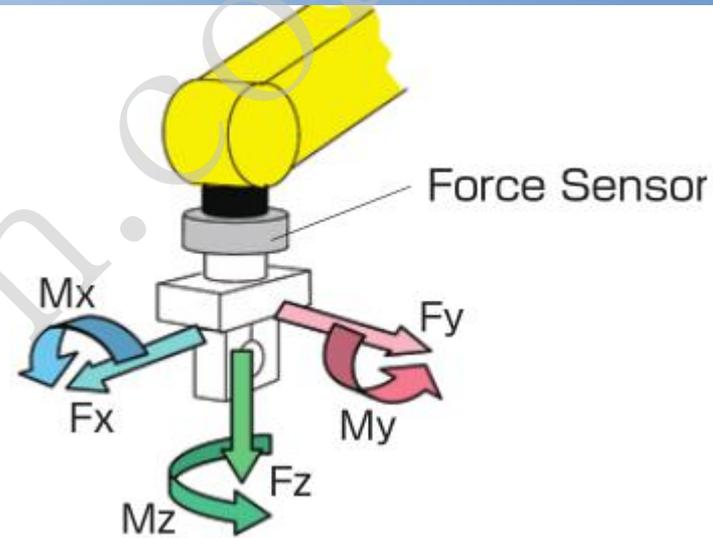
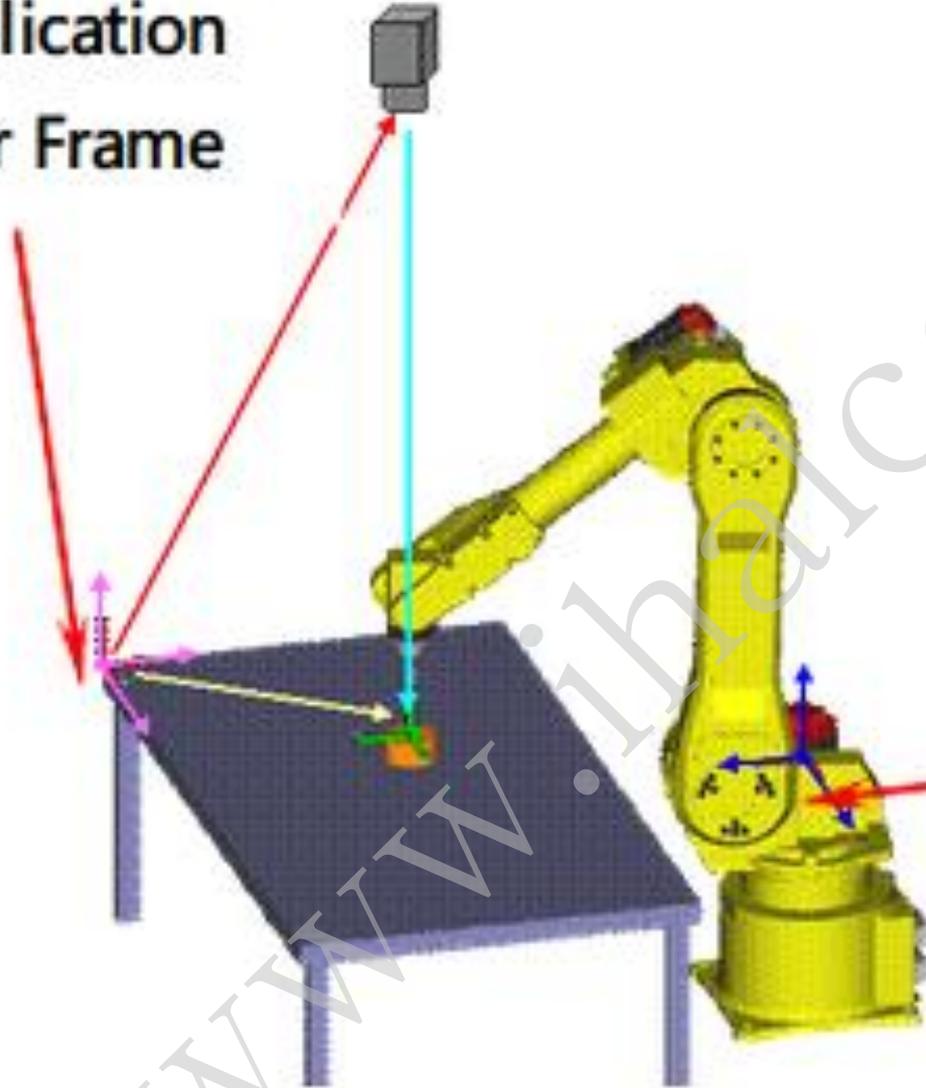
Tool1

Tool2

Tool3



Application
User Frame



World Frame

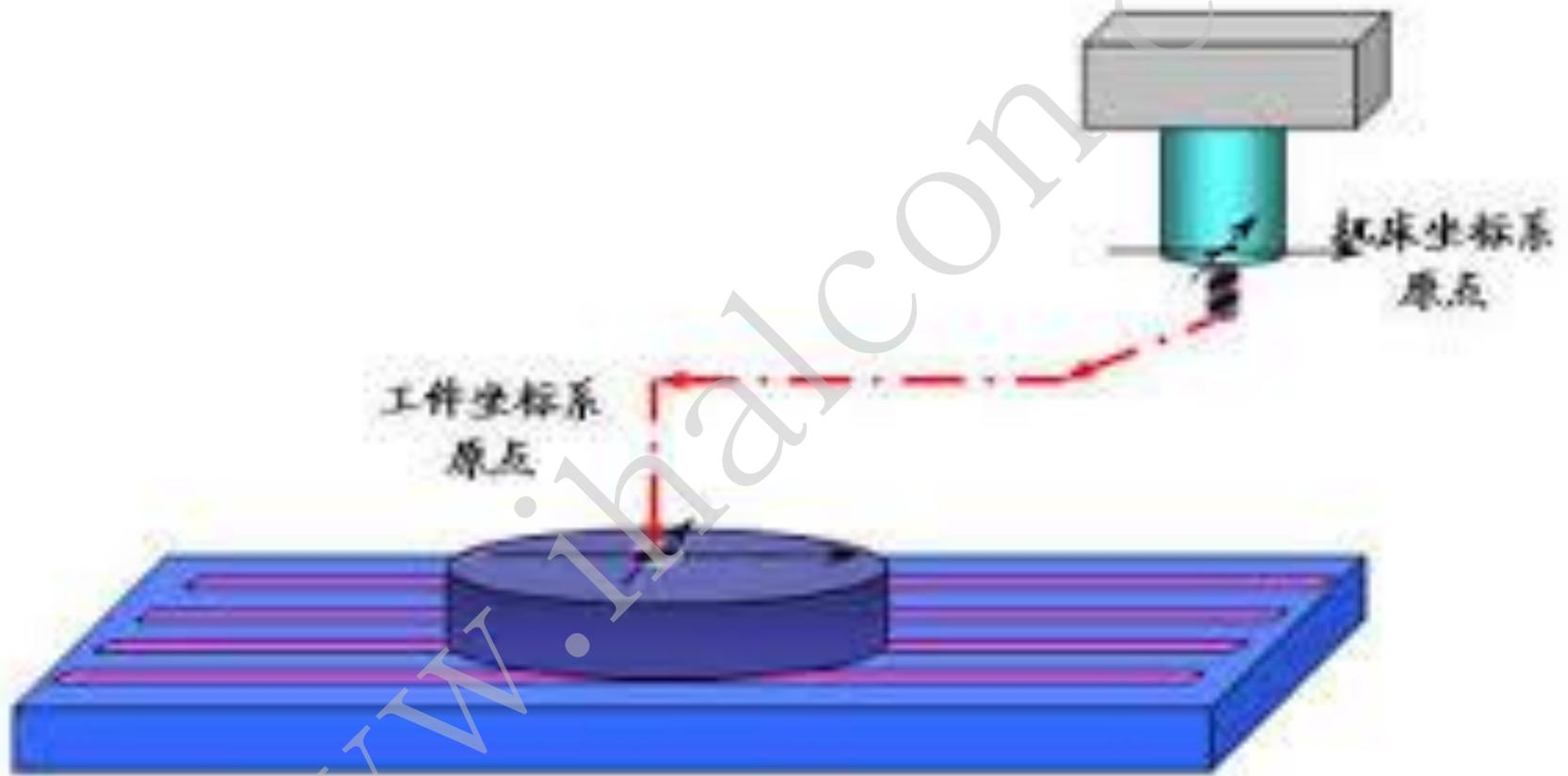
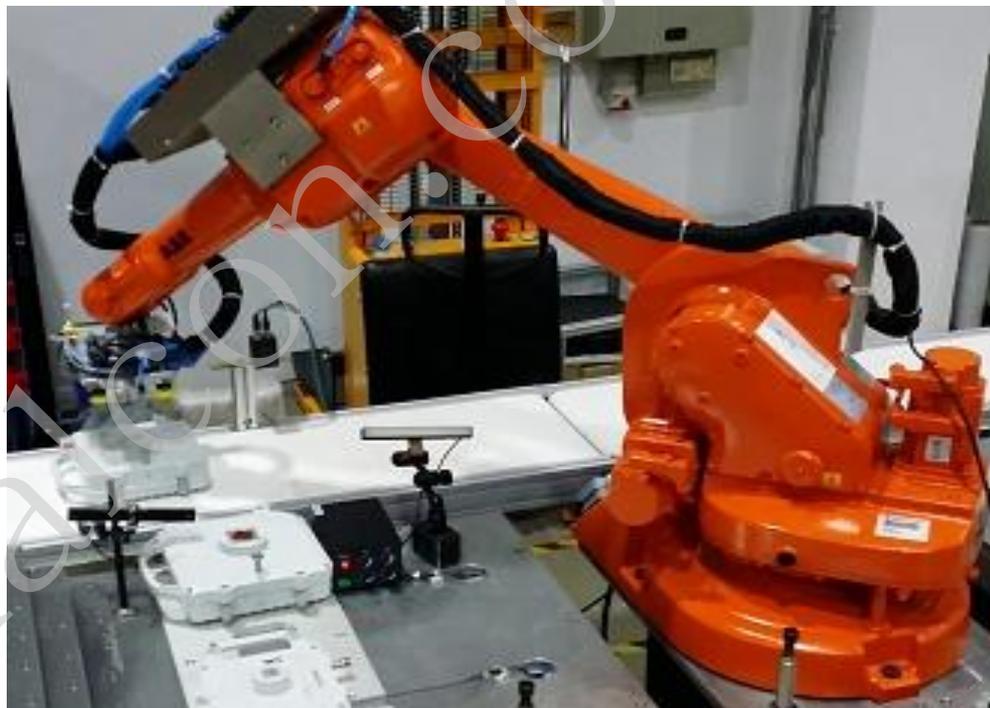
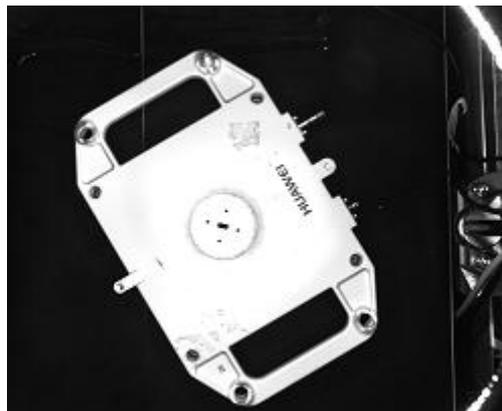


图5 工件坐标系与机床坐标系

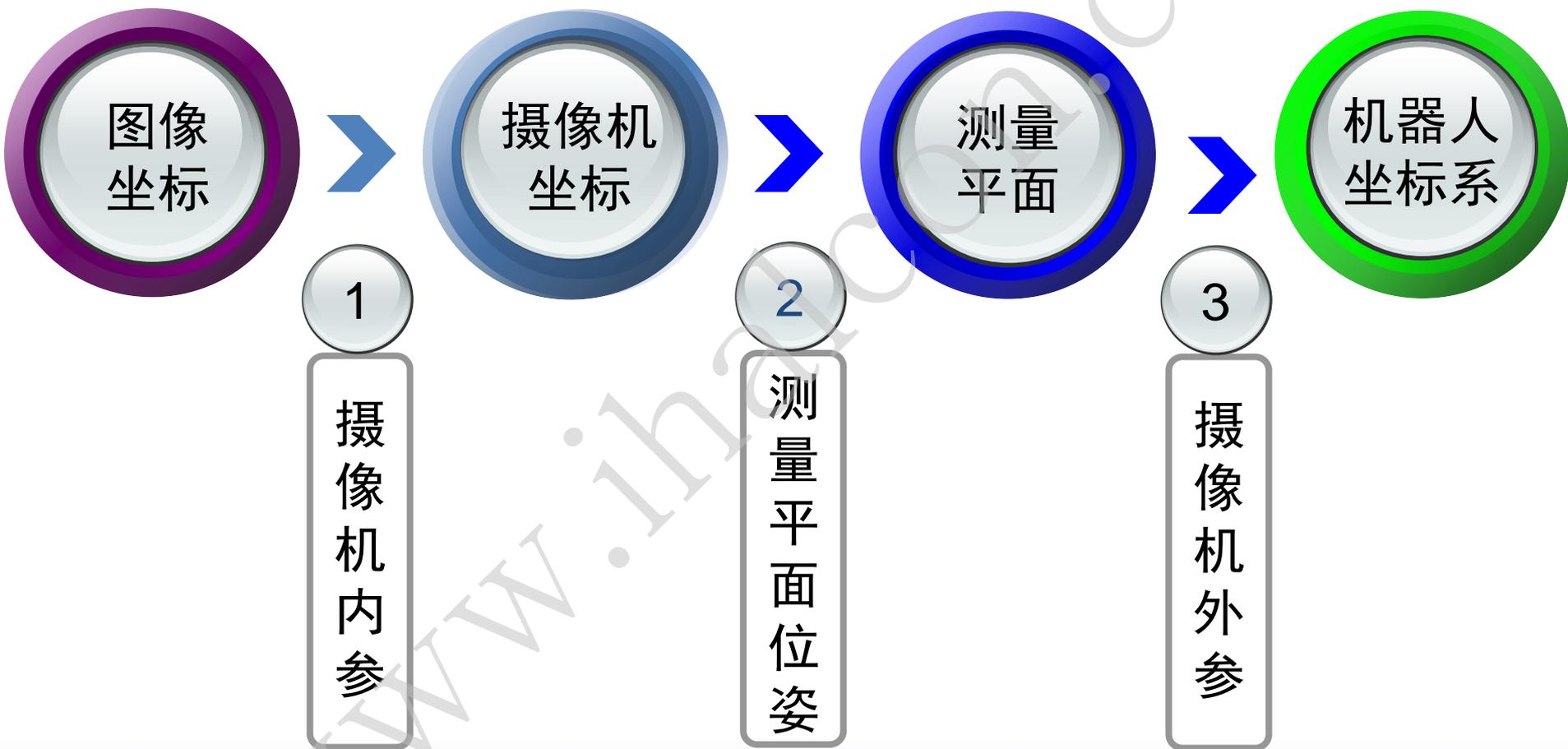
- 基坐标系
- 工具坐标系, TOOL0, TCP
- 用户坐标系, User Frame
- 工件坐标系, Wobj



图像坐标



机器人坐标



- 思想是提前确定**固定参数**(转换关系)。
- 实质是确定相机**内参和外参**的过程。



摄像机成像模型及各坐标系

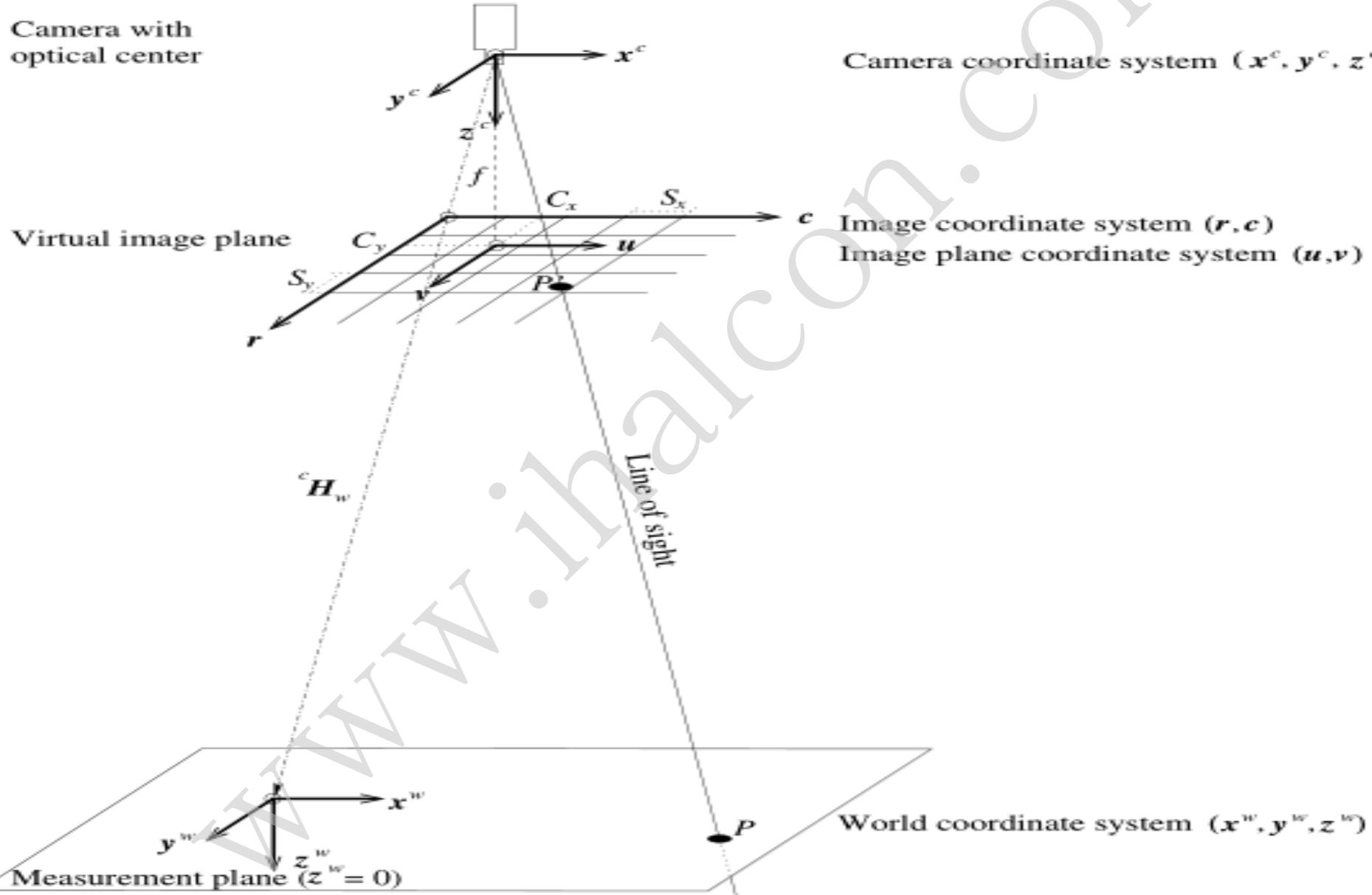
Camera with optical center

Camera coordinate system (x^c, y^c, z^c)

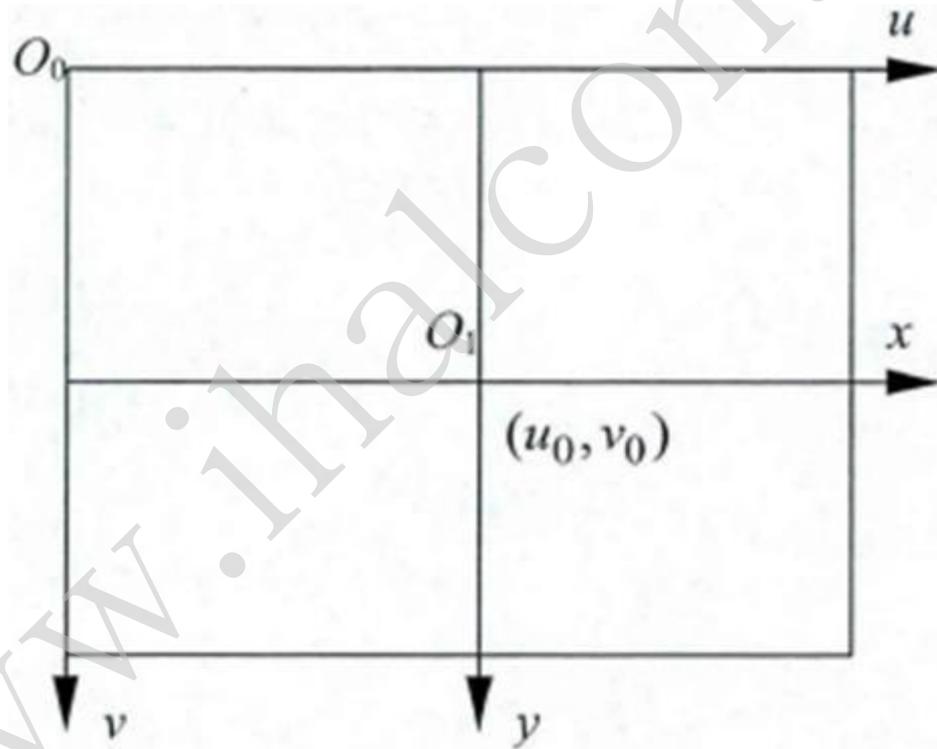
Virtual image plane

Image coordinate system (r, c)

Image plane coordinate system (u, v)



- 像素坐标系
- 图像坐标系



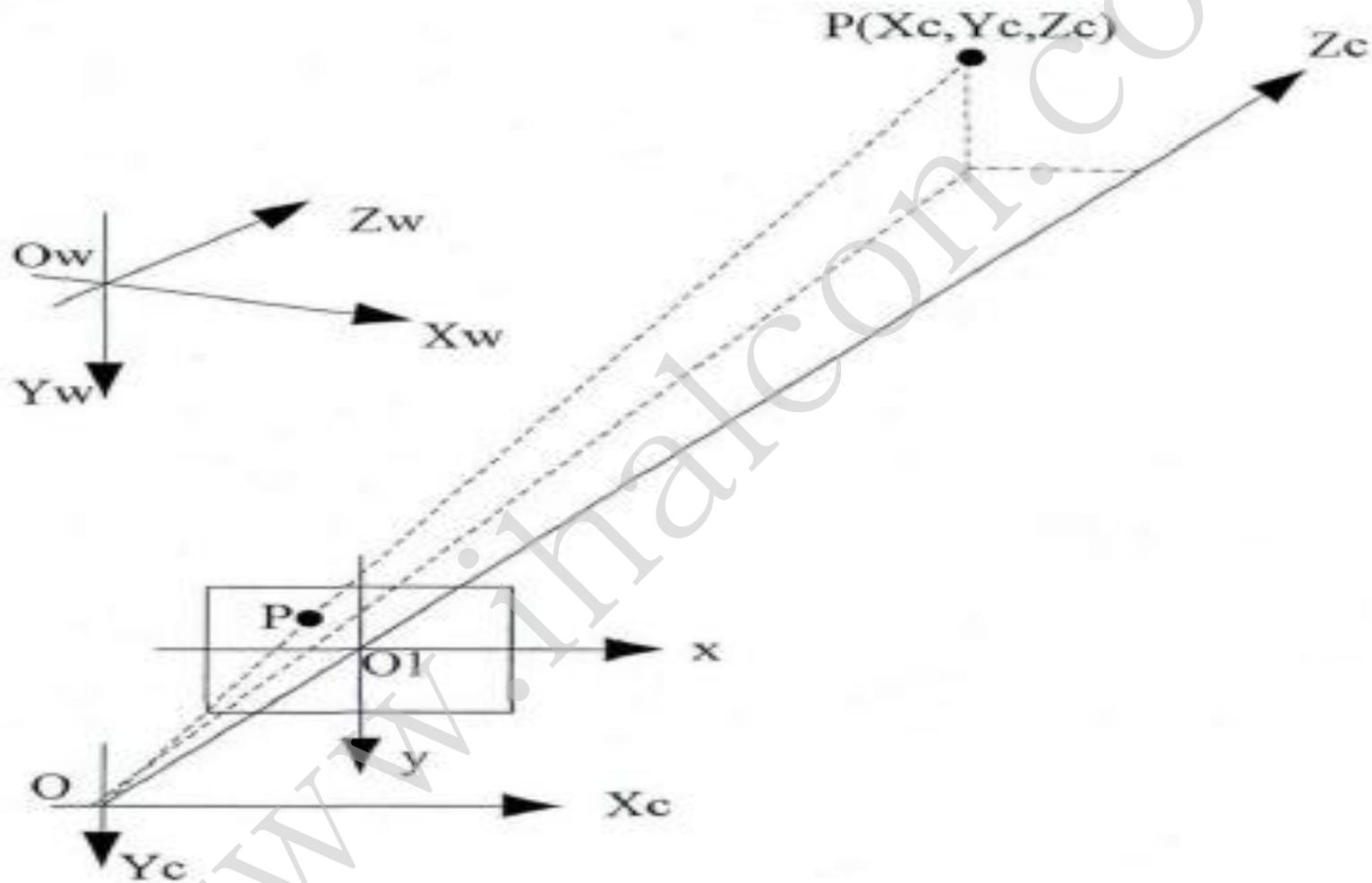


图 2.2 相机坐标系与世界坐标系

➤ 相机参数

◆ 内参K

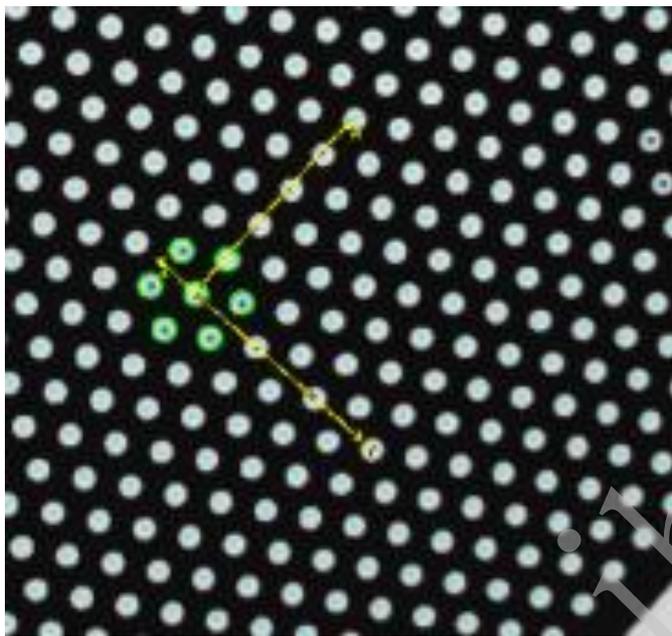
f , κ , S_x , S_y , C_x , C_y

◆ 外参P

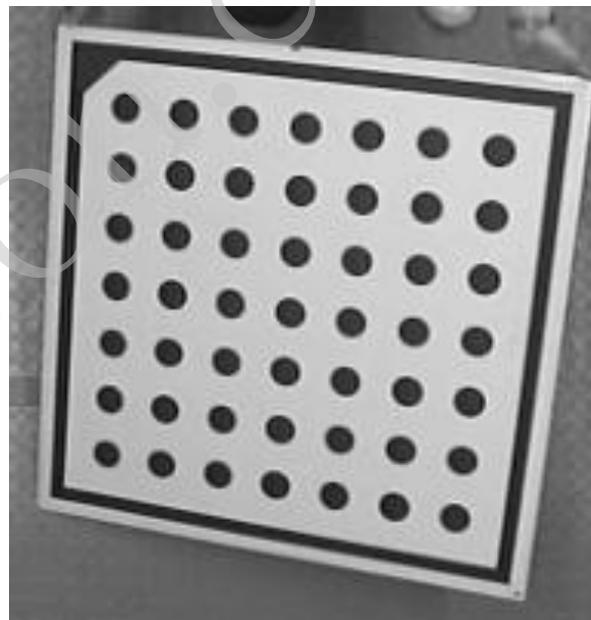
旋转, 平移

$$\mathbf{x}_k^I = \mathbf{K} \mathbf{P} \mathbf{x}_k^W$$

$$\mathbf{x}_k^I = \begin{bmatrix} f_x & s & p_x \\ 0 & f_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \mathbf{x}_k^W$$



六边形分布



四边形分布

- 标定内容：图像坐标系-->摄像机坐标系
- 标定对象：相机+镜头
- 标定参数： $f, \kappa, S_x, S_y, C_x, C_y$
- 标定工具：标定助手+标定板+序列图片
- 验证：查看结果和误差
- 影响因素：相机，镜头，焦距，改变图像大小（ROI，Binning，Subsample）

注：内参标定是不需要世界坐标系的。

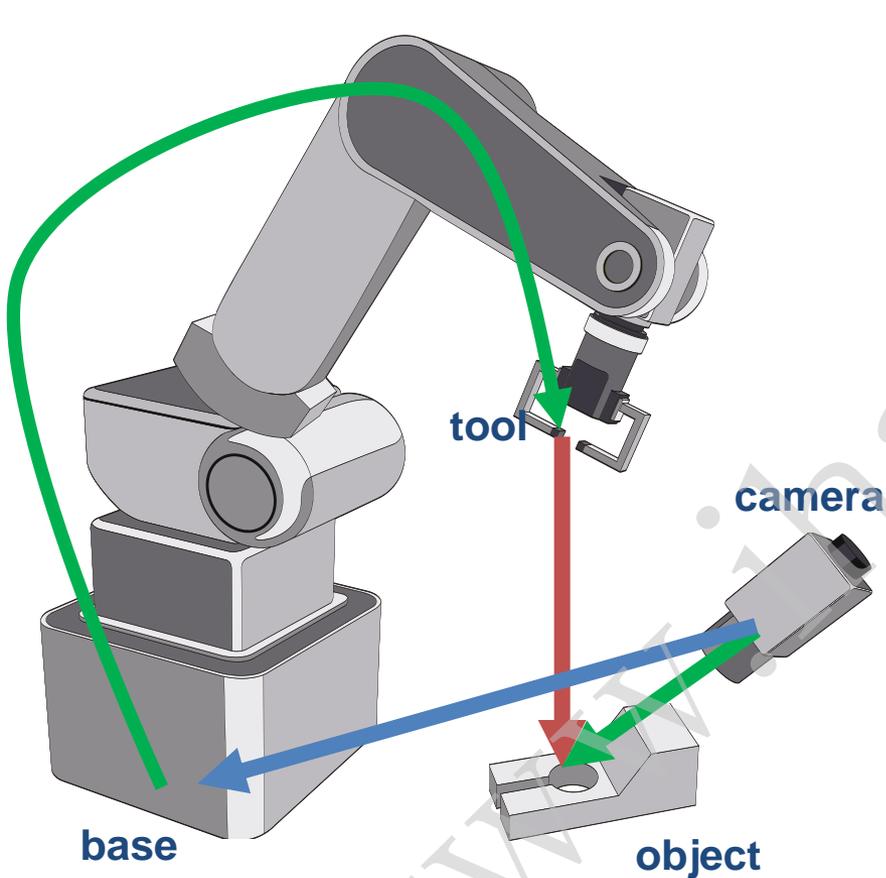
坐标系转换主要包括平移、旋转、缩放。

以矩阵表达式来计算这些变换时，平移是矩阵相加，旋转和缩放则是矩阵相乘，综合表示为：

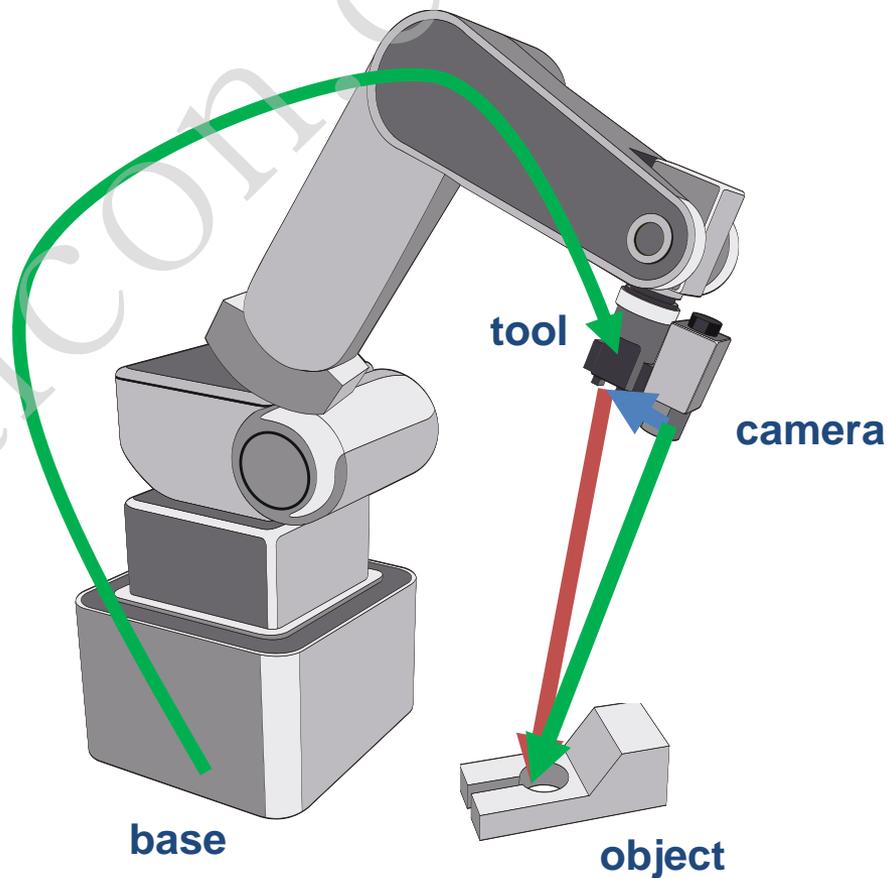
$$p' = p * m1 + m2$$

其中，m1为旋转缩放矩阵，m2为平移矩阵，p为原向量，p'为变换后的向量。

➤ → 目标 → 已知 → 手眼标定结果



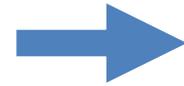
固定相机

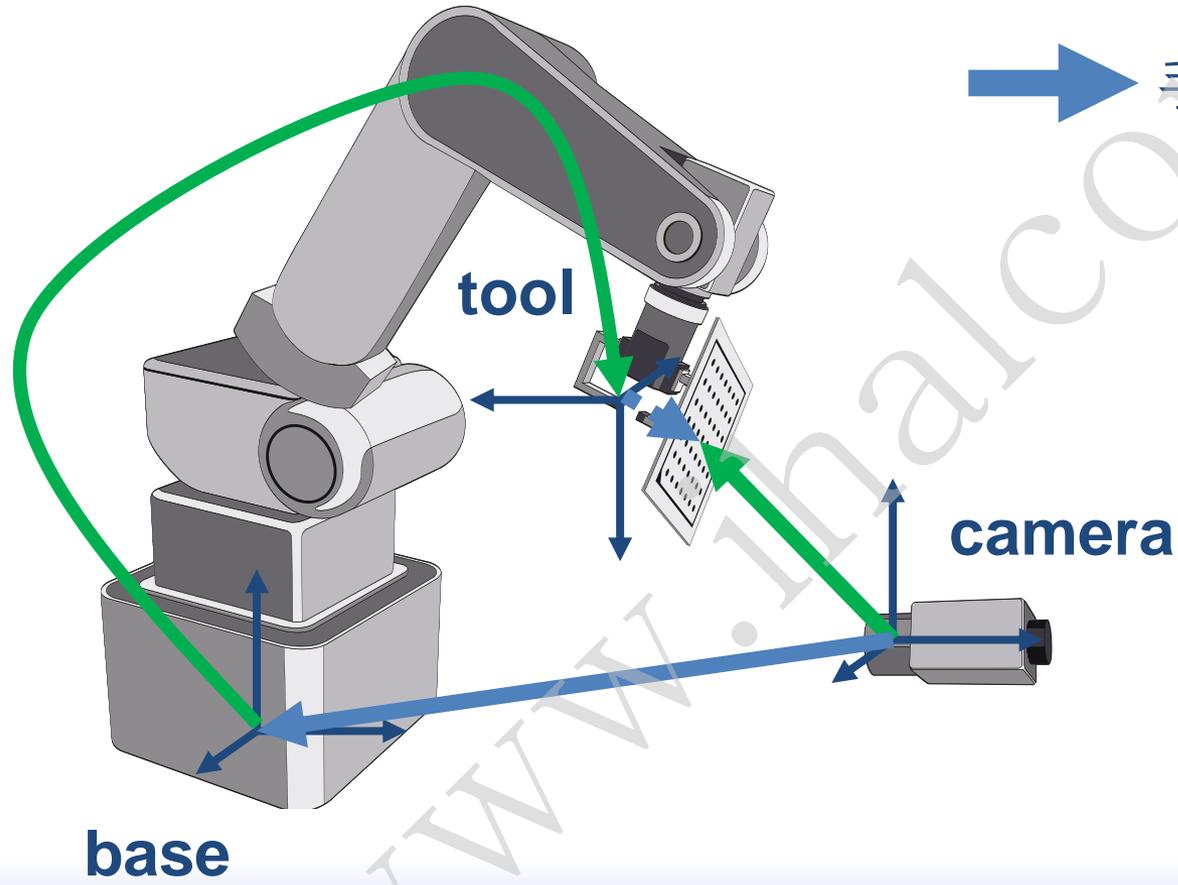


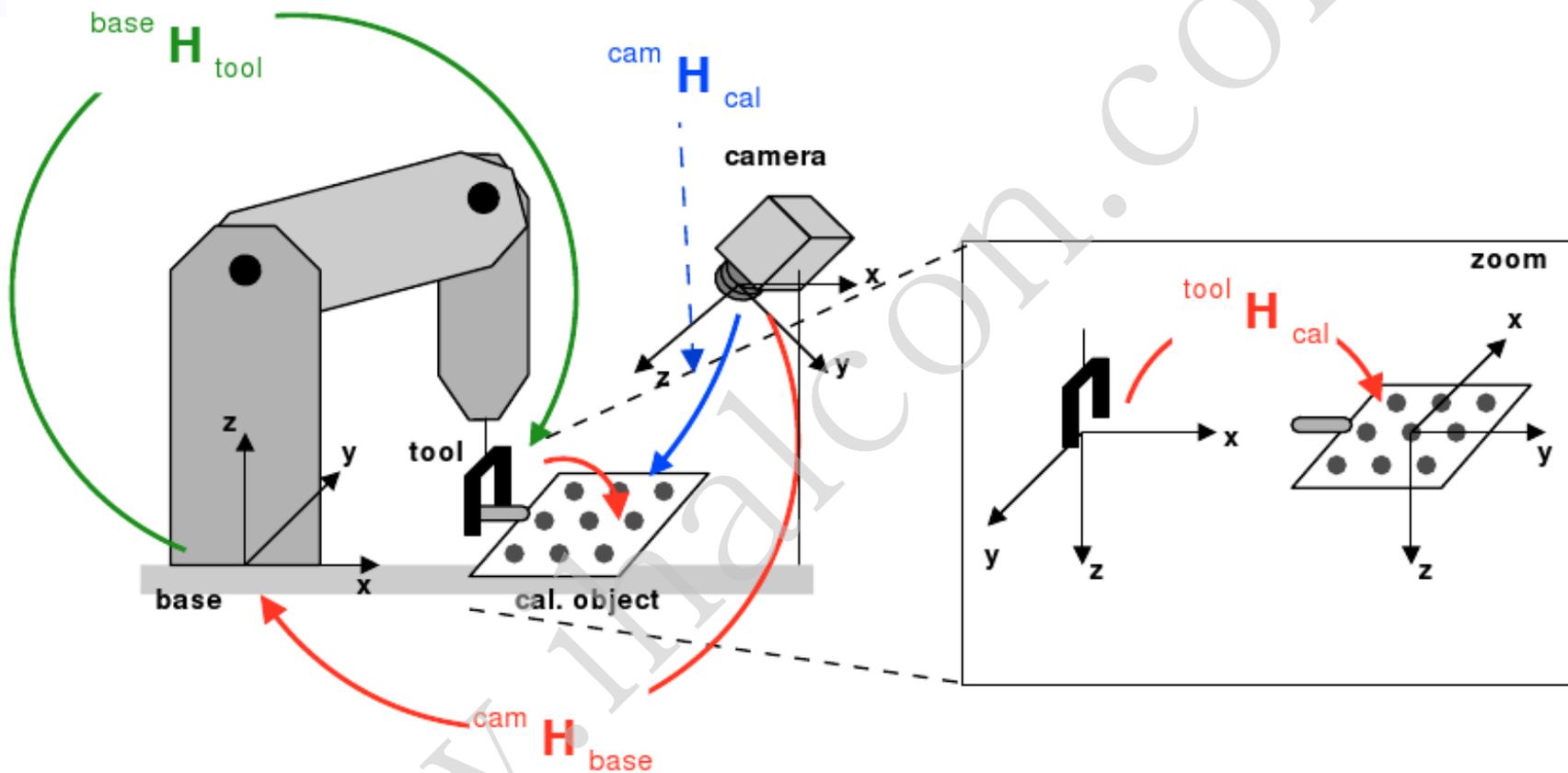
运动相机





 已知
 手眼标定结果





$${}^{cam}H_{cal} = {}^{cam}H_{base} \cdot {}^{base}H_{tool} \cdot {}^{tool}H_{cal}$$

➤ 影响因素：相机与机器人基座间发生相对位移

➤ 计算

$$\text{cam_H_cal} = \text{cam_H_base} * \text{base_H_tool} * \text{tool_H_cal}$$

|

CameraPose

|

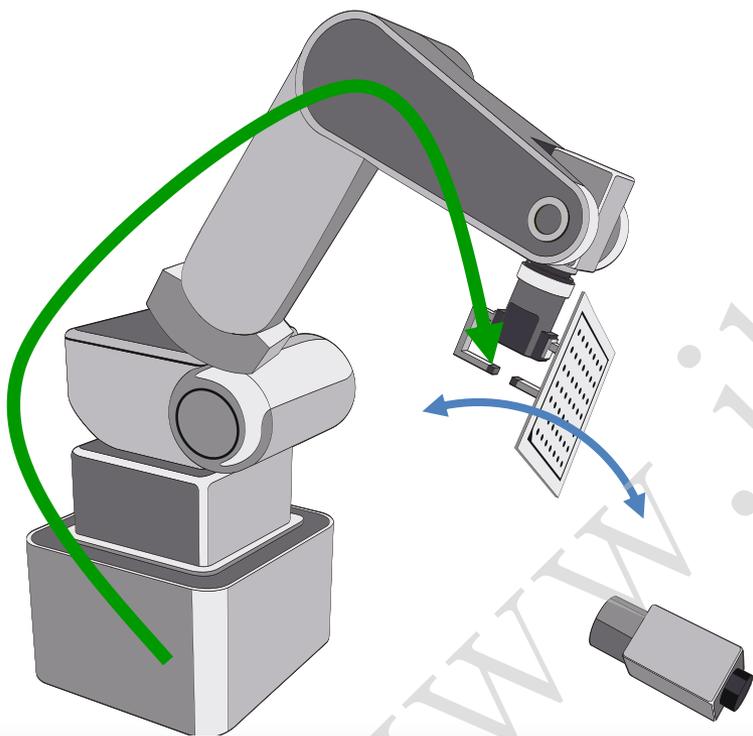
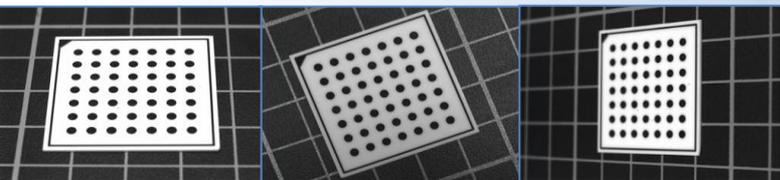
RobotPoses

|

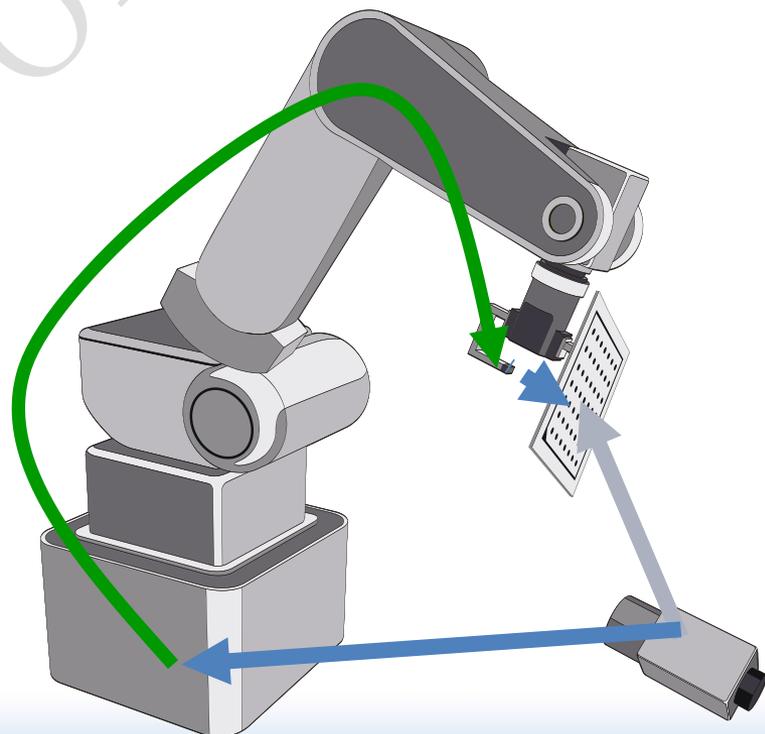
CalibrationPose

➤ 使用

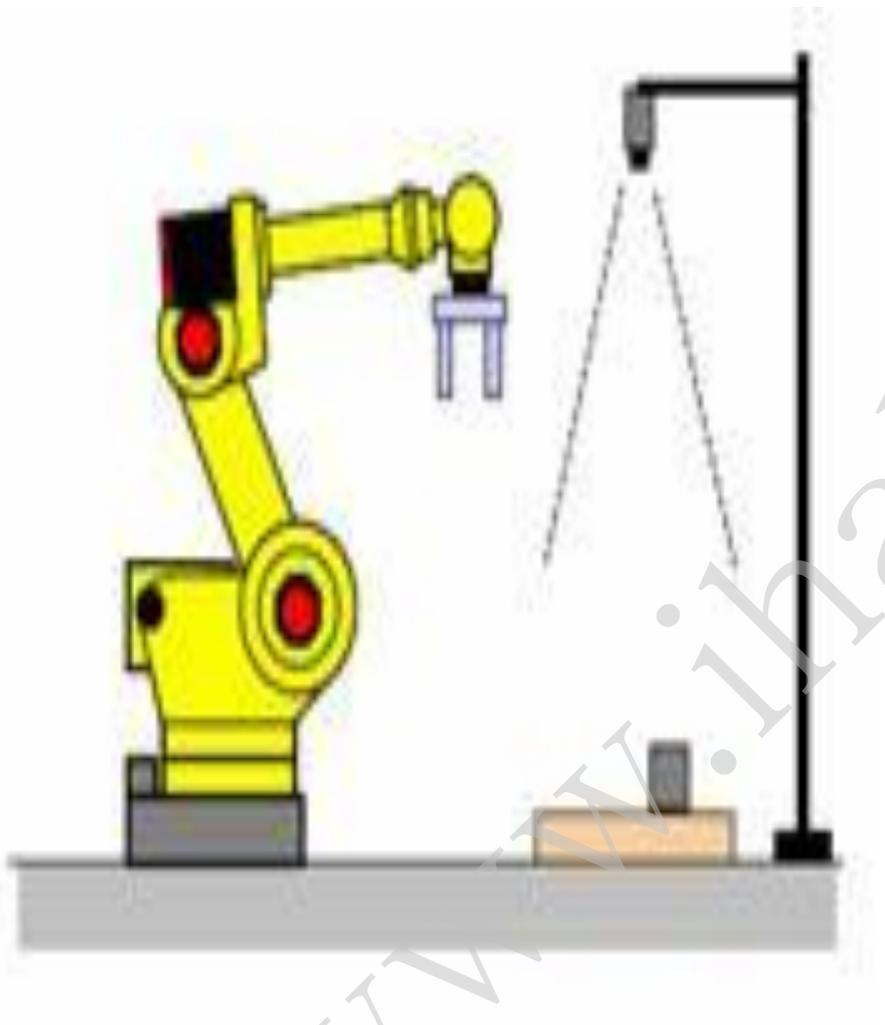
$$\text{base H}_{obj} \equiv \text{base H}_{cam} \cdot \text{cam H}_{obj}$$



1. 准备标定数据模型



2. 手眼标定



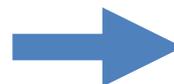
优势：可在机器人运动时照相。

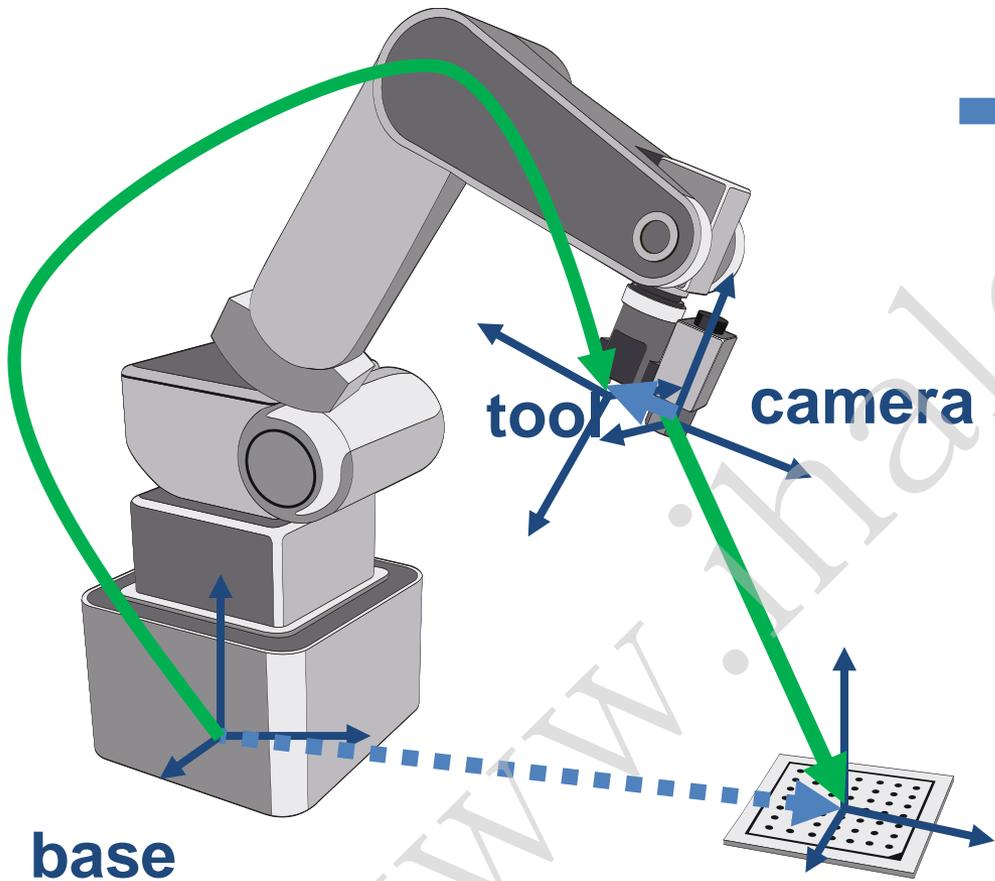
照相机连接电缆铺设简单。

劣势：检测区域固定化。

如果因外界因素导致照相机和机器人间相对位置变更，必须重新示教camera calibration。



 已知
 手眼标定结果

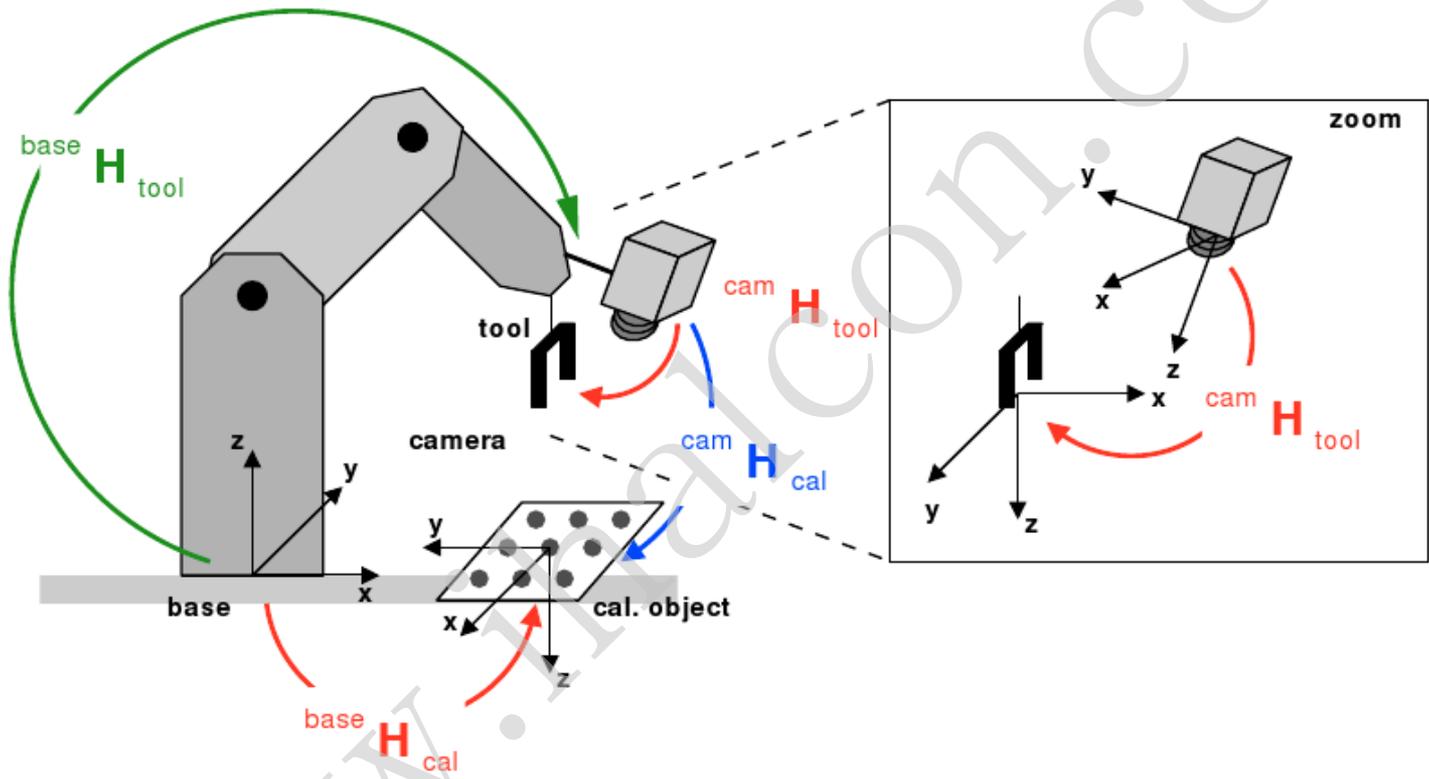


base

tool

camera





$${}^{cam}H_{cal} = {}^{cam}H_{tool} ({}^{base}H_{tool})^{-1} {}^{base}H_{cal}$$

➤ 计算

$$\text{cam_H_cal} = \text{cam_H_tool} * \text{tool_H_base} * \text{base_H_cal}$$

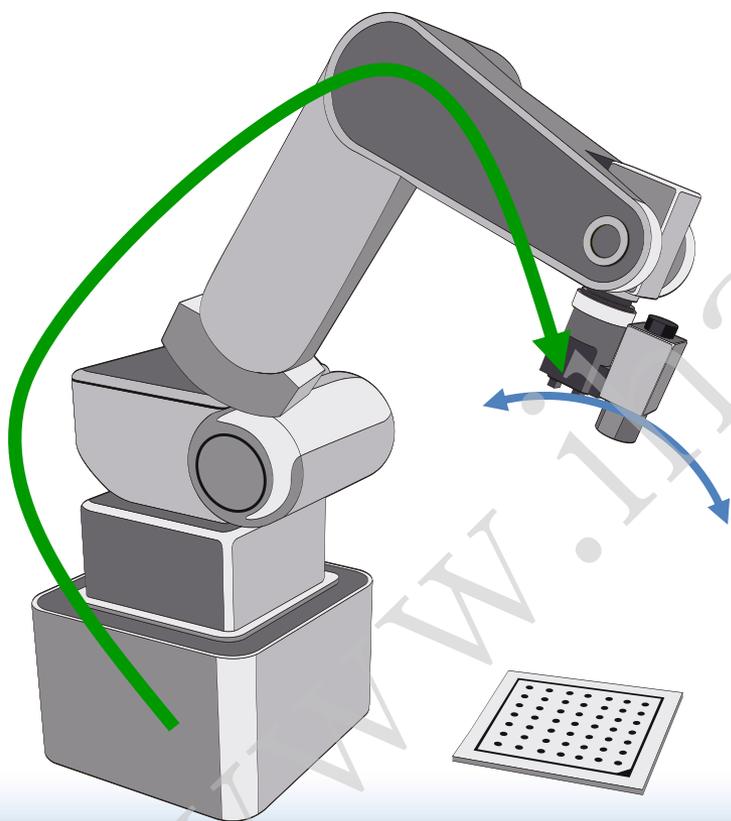
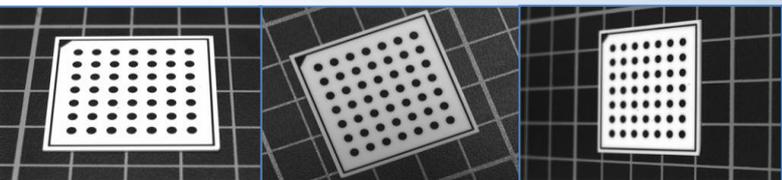
|
|
|

CameraPose
RobotPoses
CalibrationPose

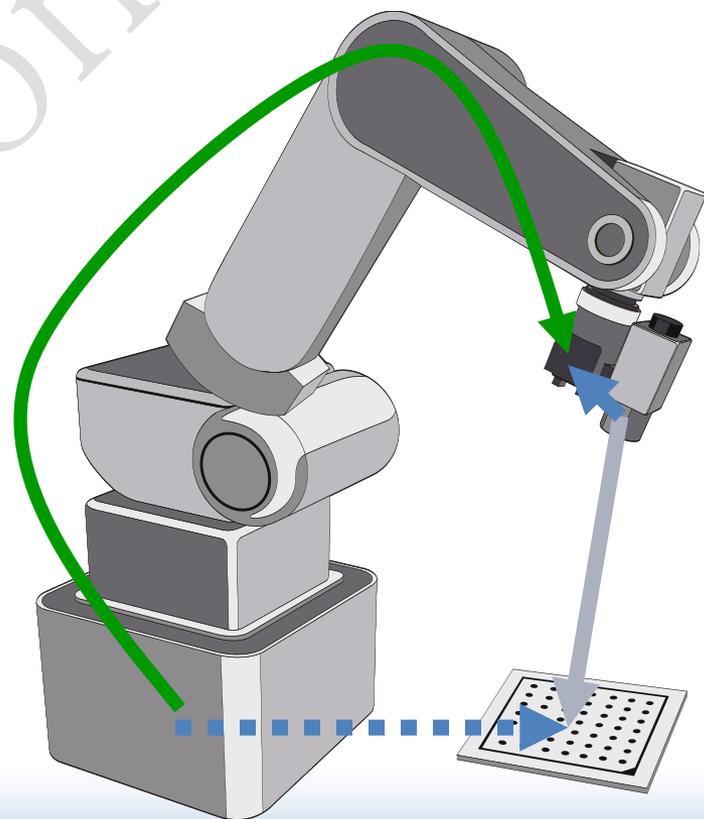
➤ 使用

$${}^{base}\mathbf{H}_{obj} = {}^{base}\mathbf{H}_{tool}(\text{acq. pos.}) \cdot {}^{tool}\mathbf{H}_{cam} \cdot {}^{cam}\mathbf{H}_{obj}$$

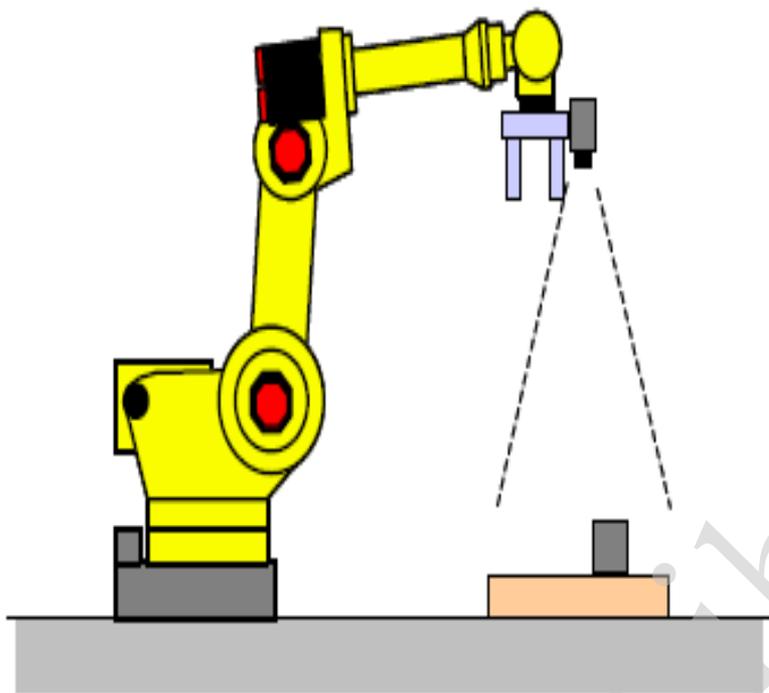
注意：视觉返回的是标定时使用的坐标系。



1. 准备标定数据模型



2. 手眼标定



优势：检测区域可以随机器人变化，整体检测范围增加。

较大的照相机焦距使用可能，检测精度提升。

易拓展再检测功能。

劣势：机器人必须停止照相。

必须注意光源是否被机器人或外围设备干涉。

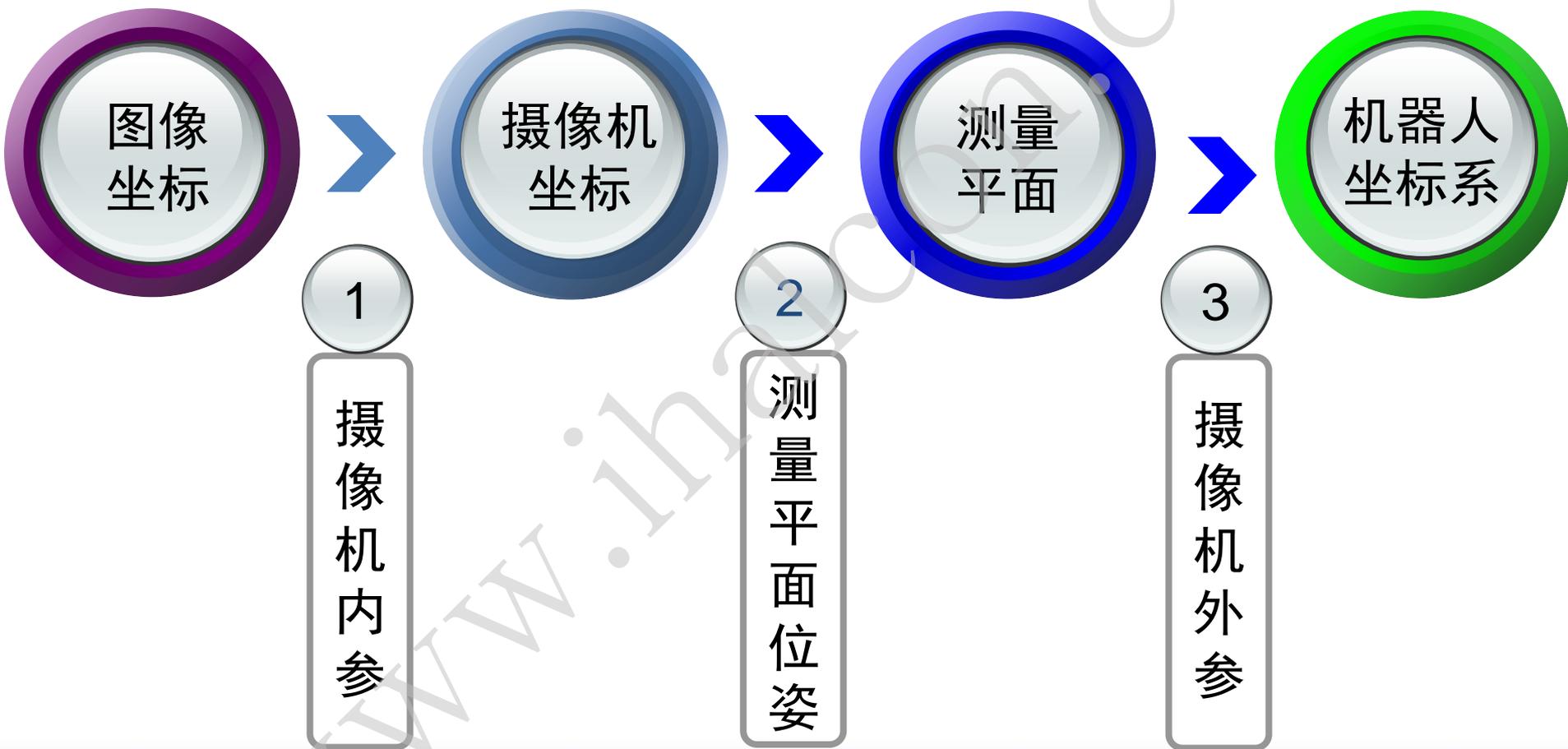
必须注意照相机连接电缆的磨损现象。

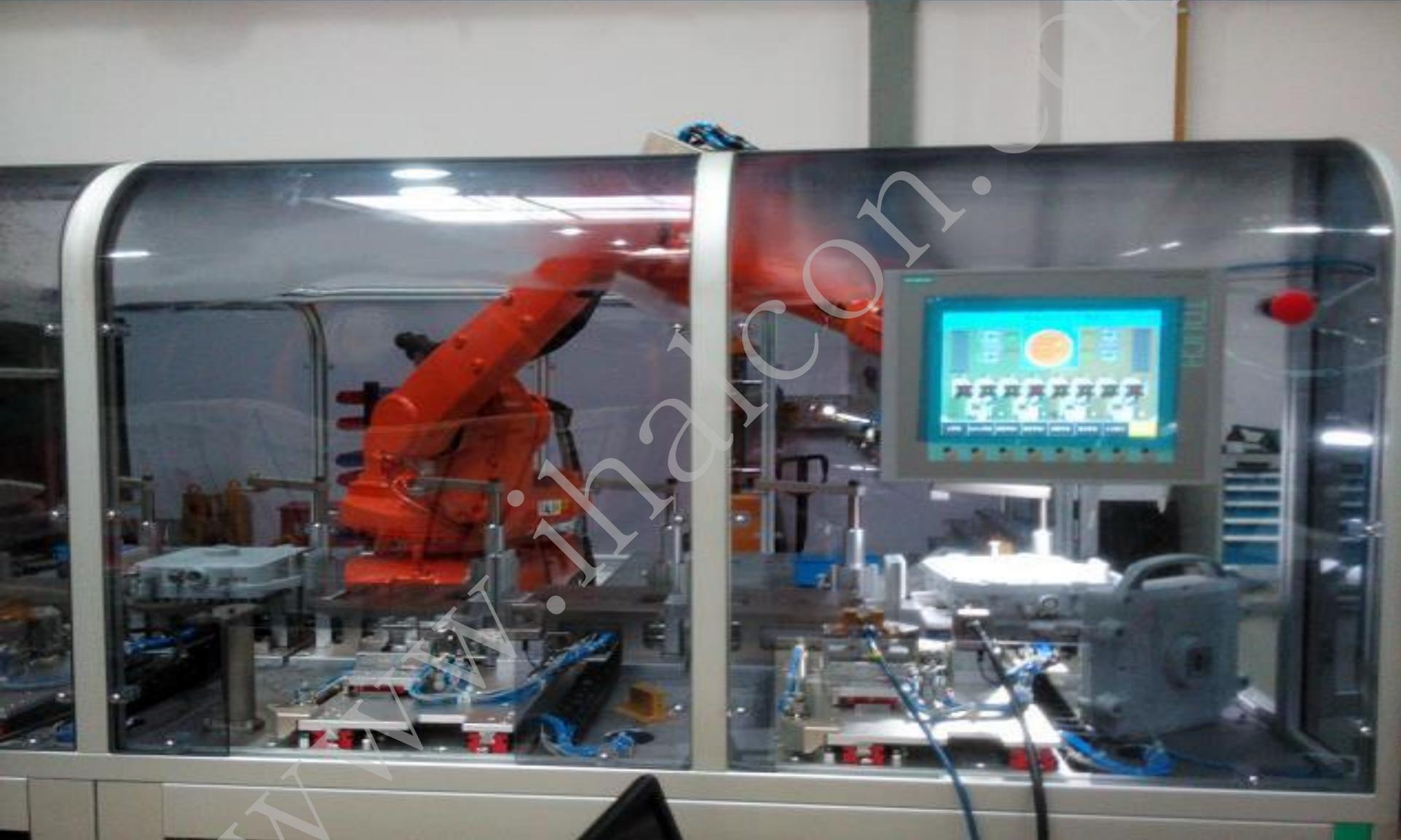
。

- 标定时使用哪个工具坐标系，视觉返回的坐标即基于哪个工具坐标系；
- 若标定时使用Tool0坐标系，而最终应用时不是Tool0（如抓取或喷涂），则需完成Tool0到最终应用的工具的坐标系之间的转换；

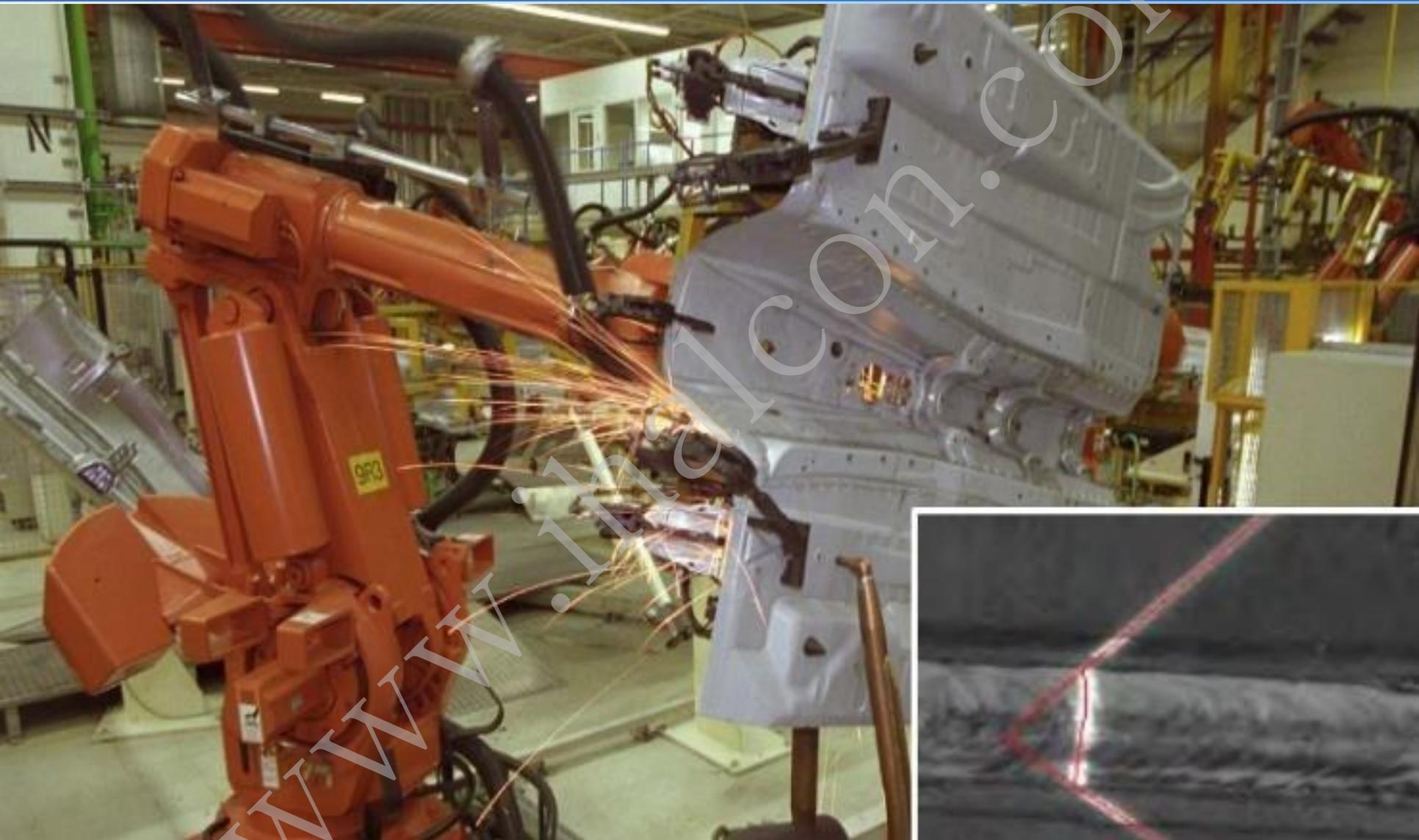
	固定相机	运动相机
结果	BasePoseInCam	ToolPoseInCam
步骤	标定板固定在夹具上，机械手带领标定板至一系列不同位置供固定相机拍摄，同时提供拍照点位姿。	标定板放置在某一位置，机械手带领运动相机至一系列不同位置并拍摄图片，同时提供拍照点位姿。
验证	1.查看Pose值，实际测量粗验证 2.抓取验证	

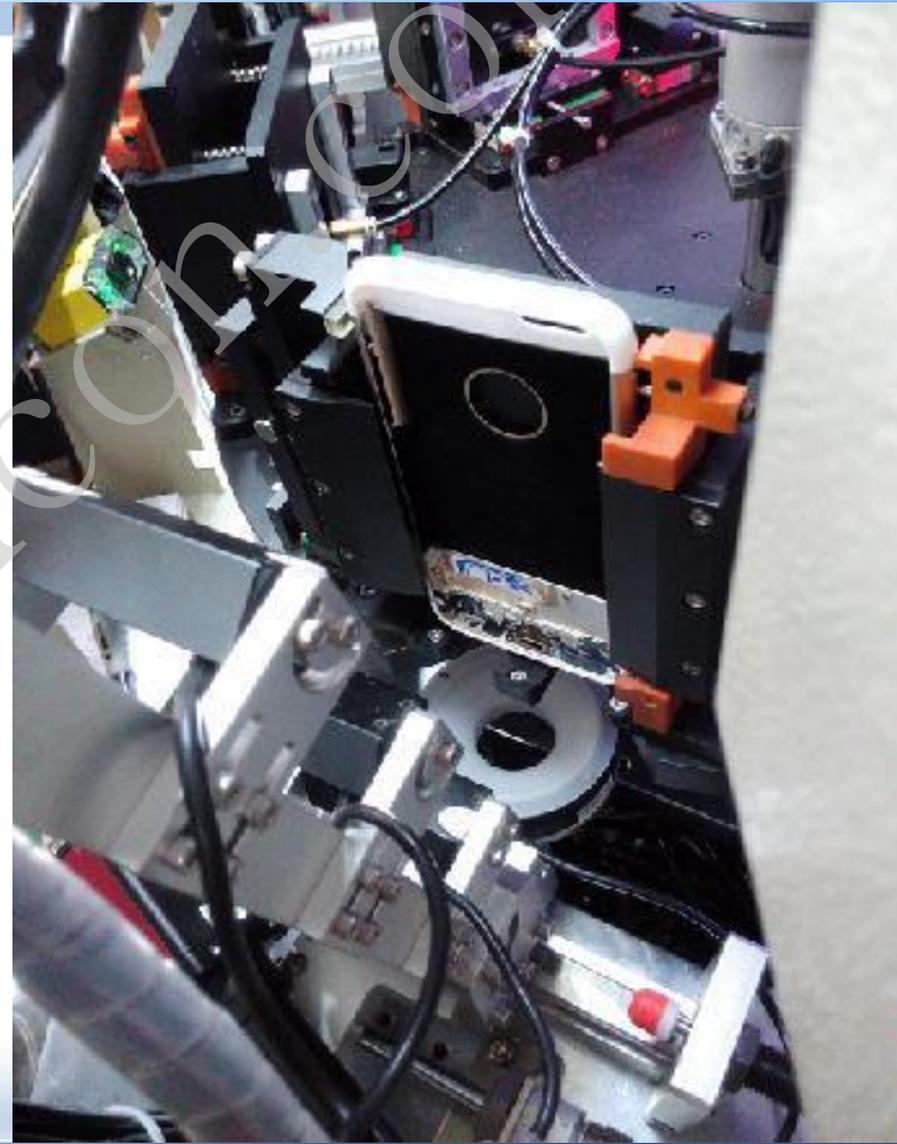
1. 定位算法得到像素坐标(Row, Col)
2. 通过ImagePointsToWorldPlane算子使用相机内参和测量平面位姿把像素坐标转换到图像坐标(X,Y) ;
3. 通过AffineTransPoint3d算子使用相机外参把测量平面上的点转换到机器人坐标系 ;

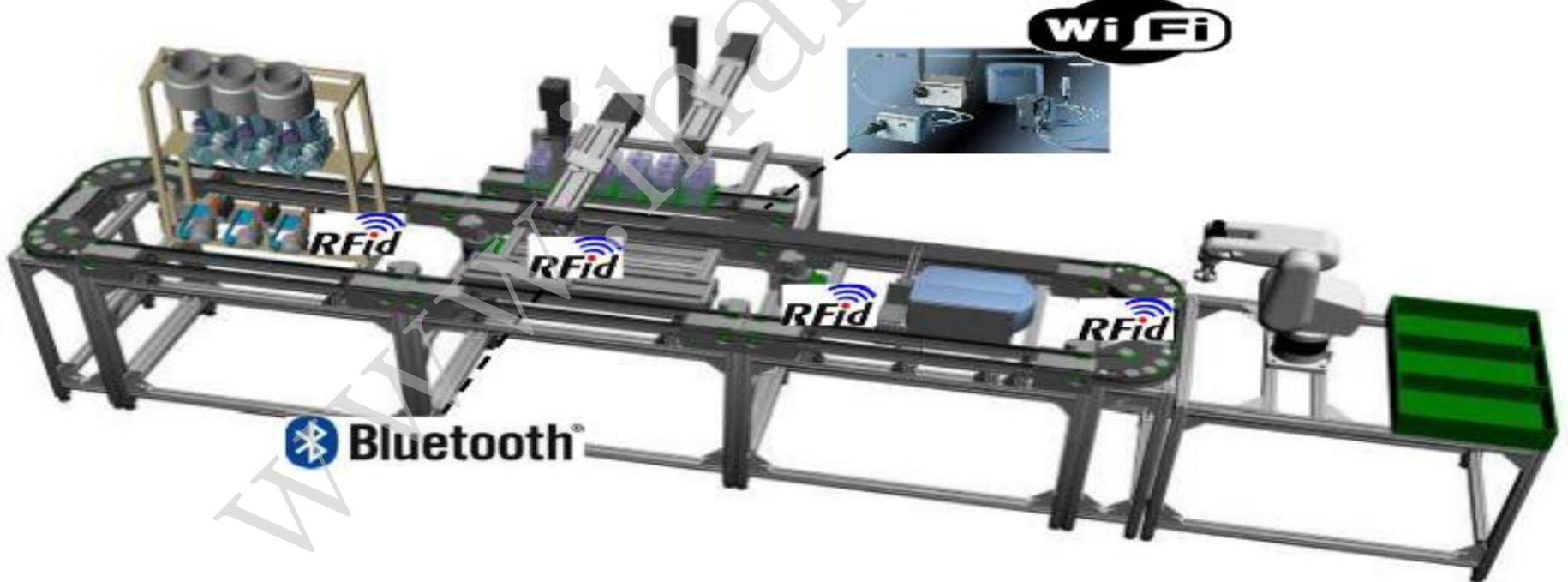














TRUMPF公司



SAP公司



BOSCH公司



WITTENSTEIN公司



FESTO公司



- ▶ 与多家机器人厂商合作
- ▶ 便捷式手眼标定
- ▶ 通讯协议可扩展
- ▶ 多功能，检测、测量、定位抓取等





应用：

www.ihalcon.com



应用：

www.ihalcon.com





致谢

谢谢!

魏学光

weixg@daheng-image.com