

分支主題 1

欧拉角转换为旋转矩阵:

$$R_x(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix}$$
$$R_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix}$$
$$R_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$R = R_x R_y R_z$

旋转矩阵变成欧拉角:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$
$$\theta_z = \text{atan2}(r_{21}, r_{11})$$
$$\theta_y = \text{atan2}(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2})$$
$$\theta_x = \text{atan2}(r_{32}, r_{33})$$

圖1. 旋轉矩陣與歐拉角轉換公式

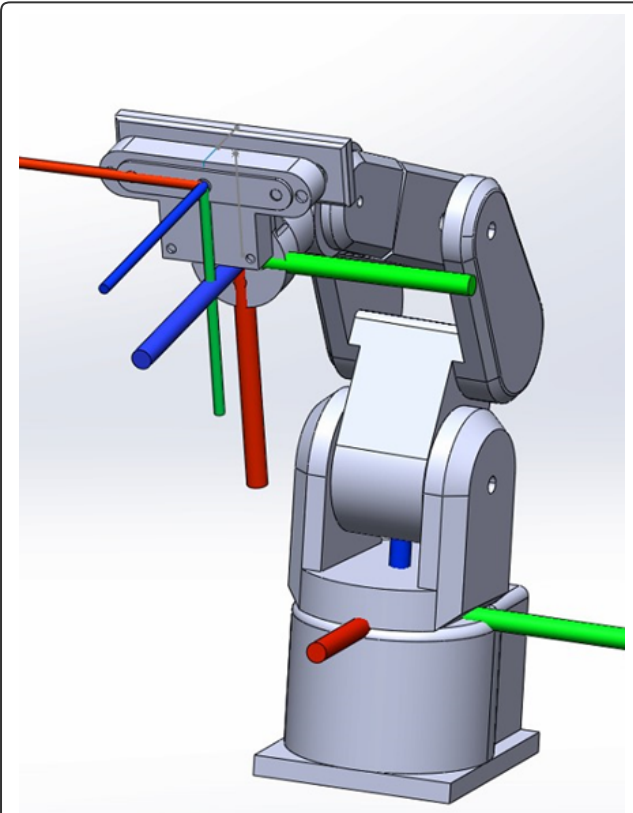


圖2. 相機座標系與手臂末端座標系

驗證內部參數方式:

- 驗證Cx,Cy: 相機中心是否為相機感光元件大小(長,寬)的一半
- 驗證Fx,Fy: 取得的焦距內參值為pixel單位, 乘上單位像素長度(感光元件單位像素尺寸, 例: 1.55um)後得到的應為該相機鏡頭的使用焦距。

驗證姿態方式:

- tvec(位移向量): 量測過標定板方格實際長度後(單位:mm), 將其乘上自定義的標定板世界座標系, 即得出對應的標定板尺寸, 後使用solvePnP()取得位移向量tvec, 來計算其標定板原點座標與相機中心(以像素中心點Cx,Cy)的實際距離大約量測是否正確。
- rvec(旋轉向量): solvePnp會得出相機原點座標與標定板原點座標的旋轉向量, 使用projectPoints函數將獲得標定板原點的投影座標姿態(以標定板原點來看), 確認姿態是否正確。

驗證手臂末端相對基座的變換矩陣(K):

- 驗證手臂位移向量(t): 一般機械手臂的座標值即為末端座標相對於基座的座標
驗證方式即是將手臂末端座標設為[0,0,0]乘以變換矩陣(K), 則應得到當前機械手臂返回座標。
- 驗證手臂姿態旋轉矩陣是否正確(R):
手眼標定需輸入手臂末端的姿態旋轉矩陣, 但一般手臂獲取的姿態值為旋轉向量(rx,ry,rz)歐拉角(Euler) 其值可能為角度或弧度, 需視機械手臂廠商設定為何。

若要轉為旋轉矩陣, 需先確認姿態(rx,ry,rz)歐拉角(Euler)是否為弧度, 若為角度則需先將(角度/180 * pi) 來得到弧度值, 再將其弧度值輸入至cv2.Rodrigues(rvec)[0] 來獲取旋轉矩陣, 或是以圖1中的公式將其轉換為旋轉矩陣。

在此須注意, 轉換後的Rx,Ry,Rz的相乘順序是會影響最後的姿態, 要確認手臂的旋轉矩陣是否轉換正確, 須將轉換後的旋轉矩陣透過圖1中的公式將旋轉矩陣轉回歐拉角(Euler), 轉回的歐拉角為弧度, 若手臂的姿態歐拉角(Euler)為角度, 則須再將弧度轉為角度(弧度* 180 / pi), 若轉回的角度與手臂原始角度相同, 則表示該旋轉矩陣正確。

上述皆驗證成功後, 即可將相機座標中偵測到的物體座標, 乘以變換矩陣(K)
相機到基座(K) = 末端到基座(K)@相機到末端(K)
即可換算得出手臂座標
驗證方式:
當得出手臂座標後, 設定其座標讓機械手臂至該座標上, 確認是否為該目標物體的位置。

1.相機校正

2.相機姿態

3.手臂姿態變換矩陣

4.相機座標相對於末端座標

5.相機座標相對於模端坐標

驗證

眼在手上手眼標定

步驟

1. 相機校正

獲取相機內部參數與畸變細數

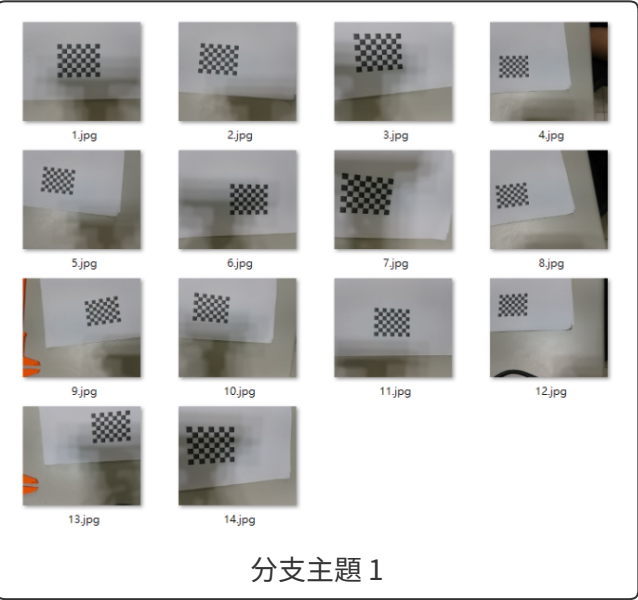
```
camera_matrix:
- - 1576.8047555474366
- 0.0
- 632.9278622512543
- 0.0
- 1575.515545635797
- 539.3335500403698
- 0.0
- 0.0
- 1.0
dist_coeff:
- - 0.13695288774913747
- -0.8412416333979543
- 9.852656680428965e-05
- 0.0005211349839114367
- 2.78748309206552
```

分支主題 1

2. 將相機架設在手臂末端並對著標定板做不同角度的拍攝

獲取多組相機姿態(與手臂座標對應)(標定板原點相對於相機中心)使用opencv solvePnP()

獲取相機到標定板原點的旋轉向量R與位移向量t



分支主題 1

獲取多組機械手臂(與相機對應)末端座標: X,Y,Z 末端姿態: rx,ry,rz

須將末端姿態的旋轉向量rx,ry,rz轉為旋轉矩陣。後與X,Y,Z座標組成末端相對於基座的變換矩陣T (旋轉矩陣R與位移向量t)

	A	B	C	D	E	F
1	dx	dy	dz	ax	ay	az
2	154.3	-0.7	215.3	176.99	86.65	176.72
3	140	-0.3	186.2	-131.49	84.41	-131.16
4	140.5	80.1	222.2	164	81.79	155.97
5	160.1	95.9	186.4	133.16	81.32	122.28
6	197.2	80.9	148.9	-47.15	84.8	-56.12
7	164.3	-27.9	178.4	-134.43	86.48	-137.31
8	163.8	-56.8	165.9	-55.9	87.49	-40.76
9	133.4	-43.9	207.5	-163.96	79.59	-154.36
10	127.7	-45.2	137.1	-0.01	83.53	2.99
11	152.9	-120.1	157.2	-73.9	86.6	-55.7
12	141.9	-90.6	216.5	-134.36	74.1	-112.92
13	148.6	-98.9	194.3	-143.61	77.34	-117.21
14	160.1	-111.8	157.9	-59.98	86.62	-32.27
15	169.7	-129.1	135.2	-29.26	83.23	-18.21
16	180.6	-125.2	95.9	-3.24	76.15	10.01
17	209.4	-27.7	210.2	-163.16	77.94	-161.28
18	244.8	-13.1	125.3	-8.64	77.41	-13.45
19	188.9	118.5	89.5	21.1	74.83	10.15
20	220.3	-73.7	93.3	-16.55	73.69	-5.12
21	147.1	-10.3	210.3	178.75	81.75	172.55

分支主題 1

3.執行opencv手眼標定函數(將上步驟獲取的多組相機與手臂姿態輸入)

共四組參數, 依序是
(1) 末端相對於基座的旋轉矩陣
(2) 末端相對於基座的位移向量
(3) 標定板相對於相機的旋轉矩陣
(4) 標定板相對於相機的位移向量
(5) method = 3,cv2.CALIB_HAND_EYE_ANDREFF

求得R,t 為機械手臂末端與相機之間的變換矩陣

4.將相機座標轉換為手臂基座座標(即機械手臂座標系)

利用末端到基座的變換矩陣將相機座標轉換到基座其變換矩陣順序如下: (K 為變換矩陣) - 下為眼再手
相機到基座(K) = 末端到基座(K)@相機到末端(K)
若為眼再手外則為:
相機到基座(K) = inv(末端到基座(K)@相機到末端(K))

將相機看到的目標物體座標乘上變換矩陣後轉為手臂座標