



Robotika

Kalibrace robotu (Identifikace systému)

Vladimír Smutný

Centrum strojového vnímání

Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky (CIIRC)

České vysoké učení technické v Praze

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21



- ◆ Zjištění přibližných hodnot parametrů systému, např. hmotnosti a momenty setrvačnosti jednotlivých ramen robotu.
- ◆ Zjištění skutečných hodnot parametrů systému, u kterých známe jejich nominální hodnoty, např. geometrické parametry robotu.
- ◆ Zjištění hodnot parametrů systému složeného z více podsystémů, např. poloha kamery v souřadnicovém systému robotu.
- ◆ Známe nebo navrhujeme matematický model systému?
- ◆ Co jsou kalibrované parametry?
- ◆ S jakou přesností známe nominální hodnoty kalibrovaných parametrů?
- ◆ Co jsou měřené parametry?
- ◆ Co jsou známé parametry?

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

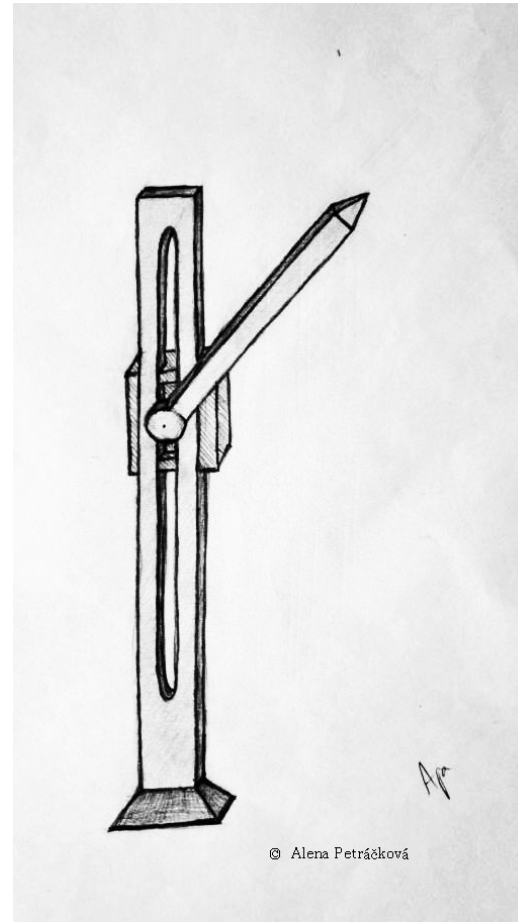
17

18

19

20

21



1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

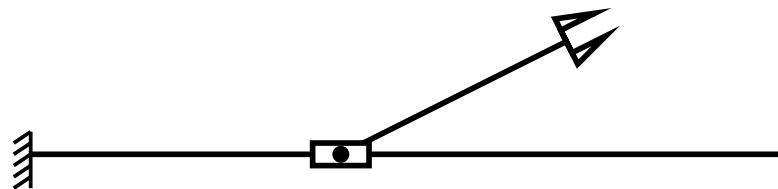
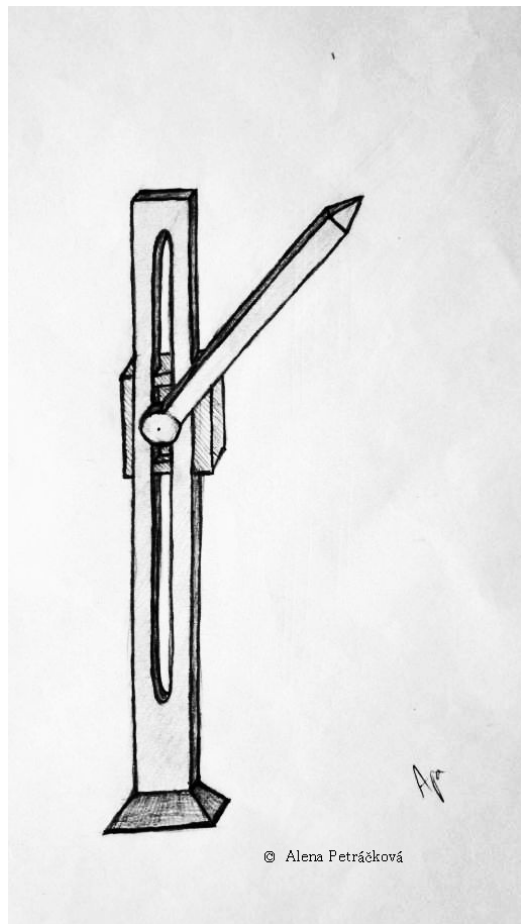
20

21

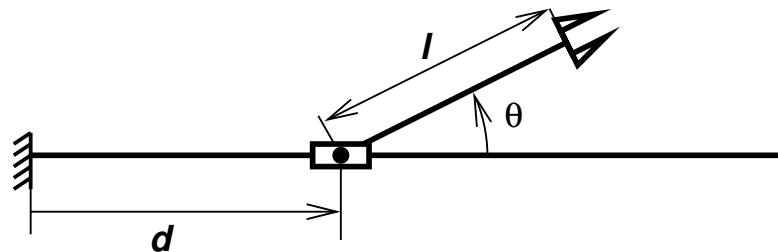
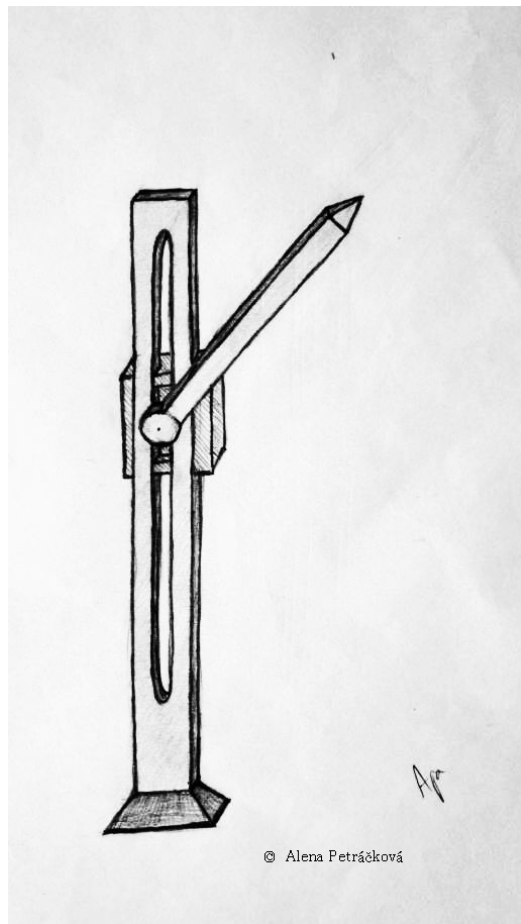
Kalibrace robotu - geometrické schema



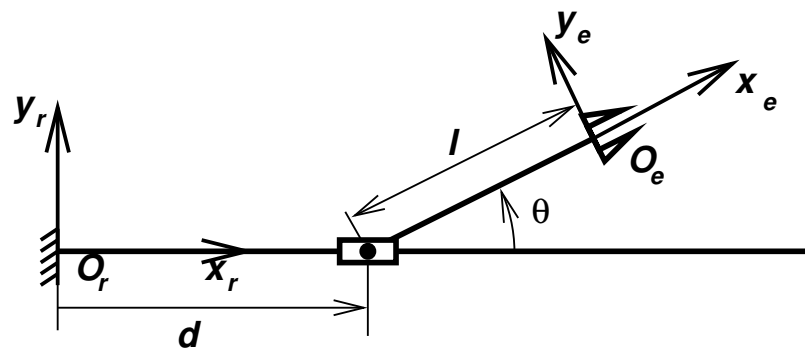
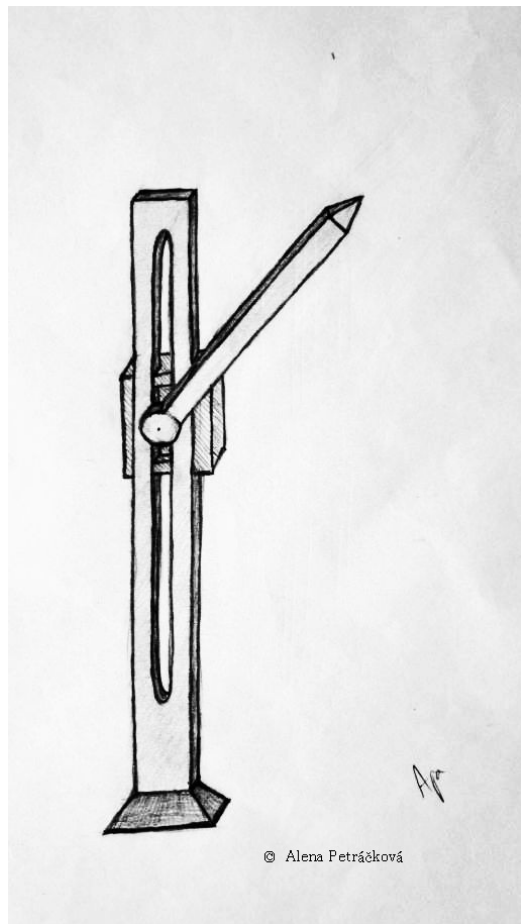
m p



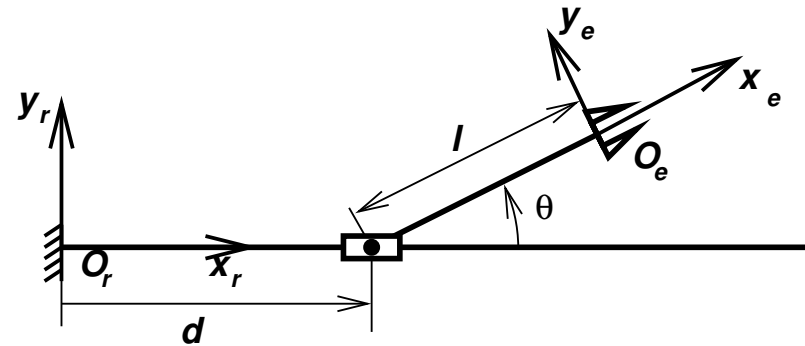
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21



$$x_e^r = d + l \cos \theta$$

$$y_e^r = l \sin \theta$$

$$\phi = \theta$$

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

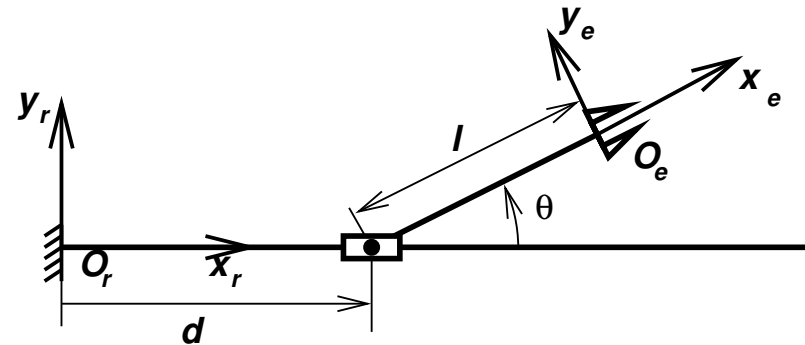
17

18

19

20

21



$$x_e^r = d + l \cos \theta$$

$$y_e^r = l \sin \theta$$

$$\phi = \theta$$

$$T_e^r(d, \theta, l) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & d + l \cos \theta \\ \sin \theta & \cos \theta & l \sin \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\vec{x}_e^r = \vec{O}_e^r = T_e^r(d, \theta, l) \vec{O}_e^e = T_e^r(d, \theta, l) (0, 0, 1)^T$$

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

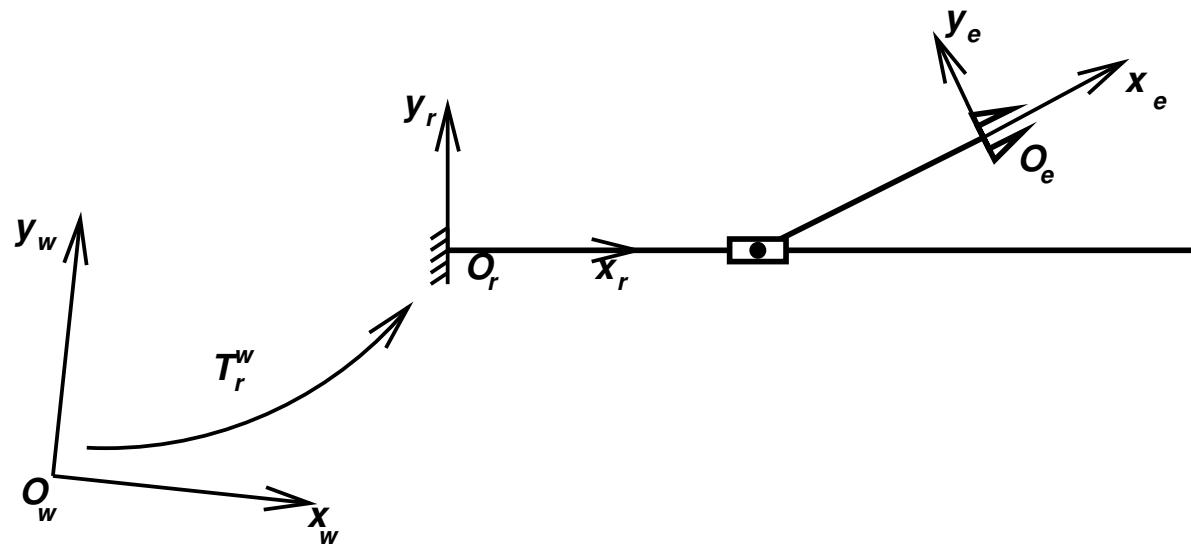
17

18

19

20

21



1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

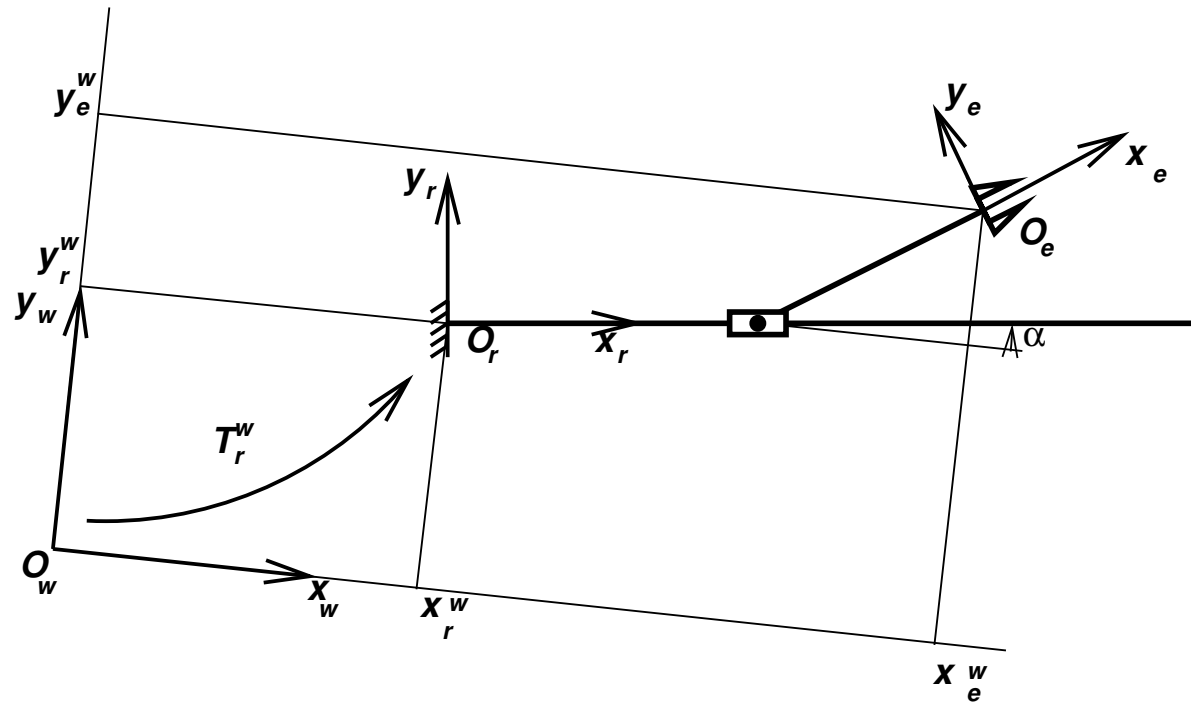
17

18

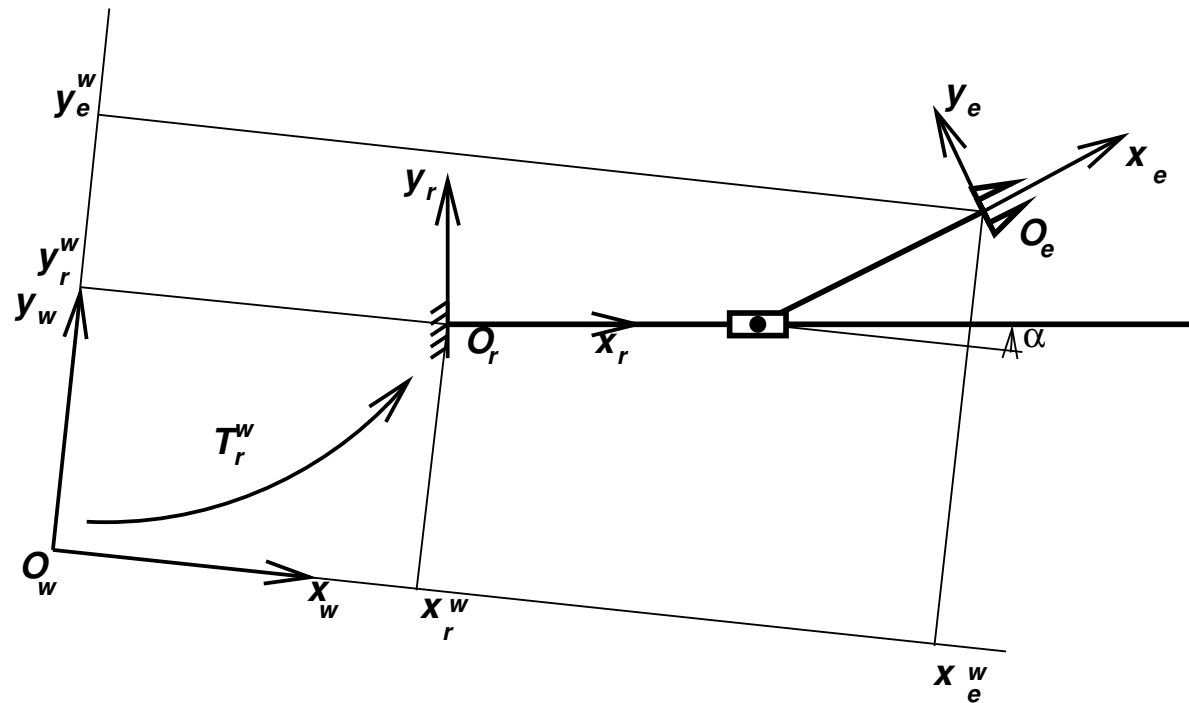
19

20

21



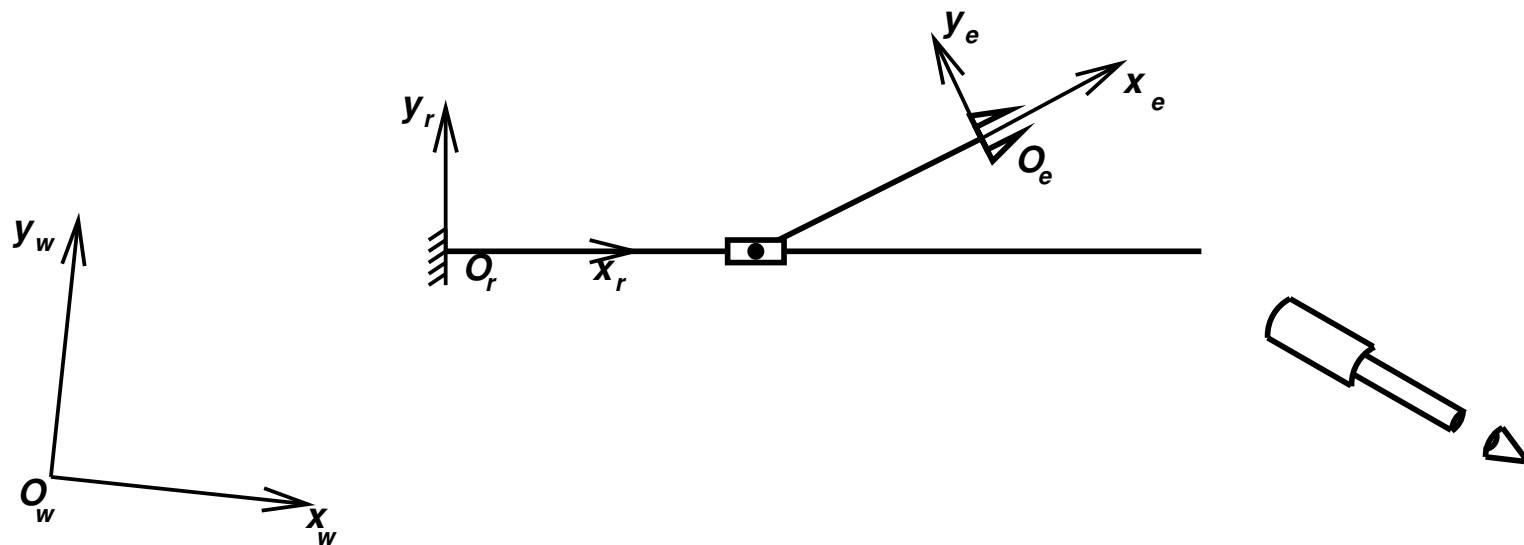
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10**
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21



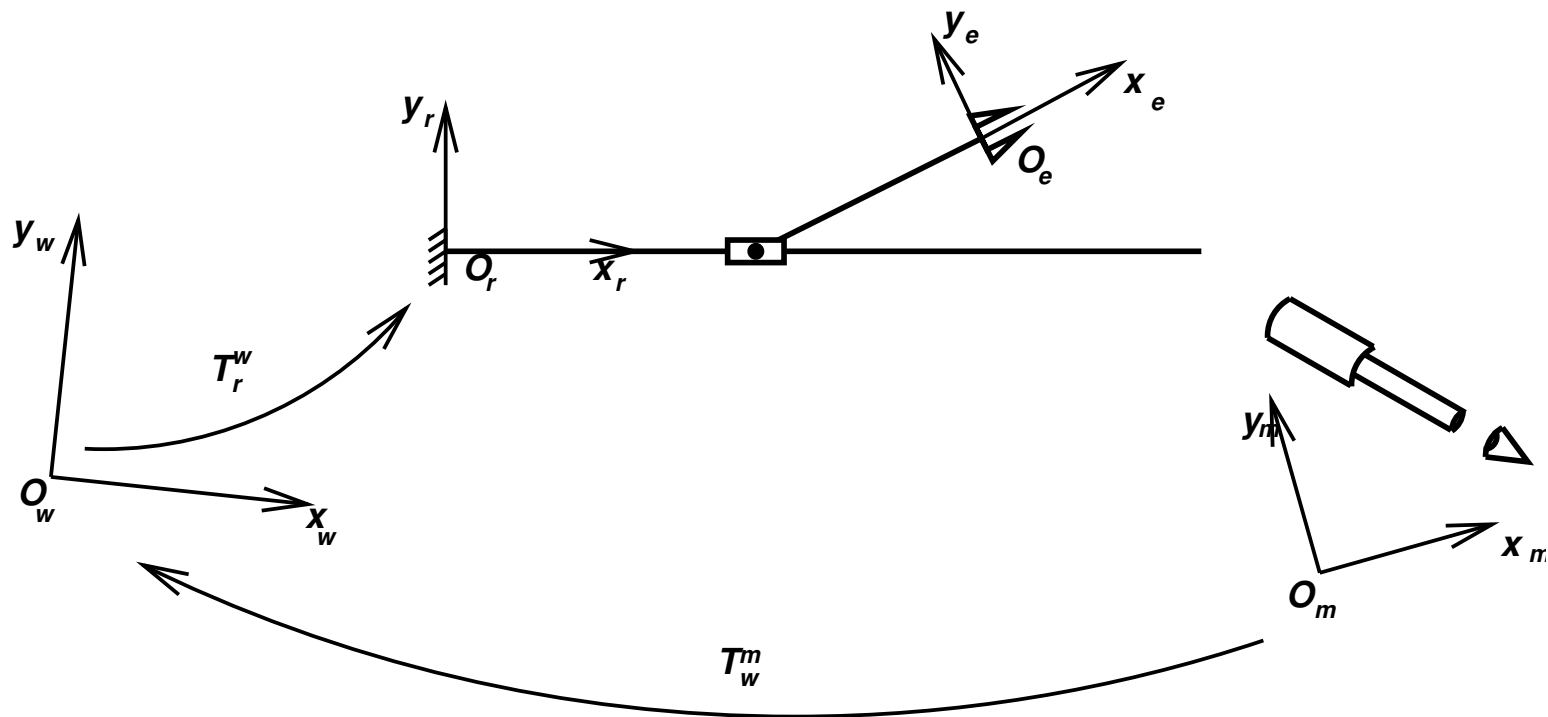
$$\vec{O}_e^w = T_r^w(x_r^w, y_r^w, \alpha) T_e^r(d, \theta, l) \vec{O}_e^e$$

$$\vec{x}^w = T_r^w(x_r^w, y_r^w, \alpha) T_e^r(d, \theta, l) \vec{x}^e$$

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21

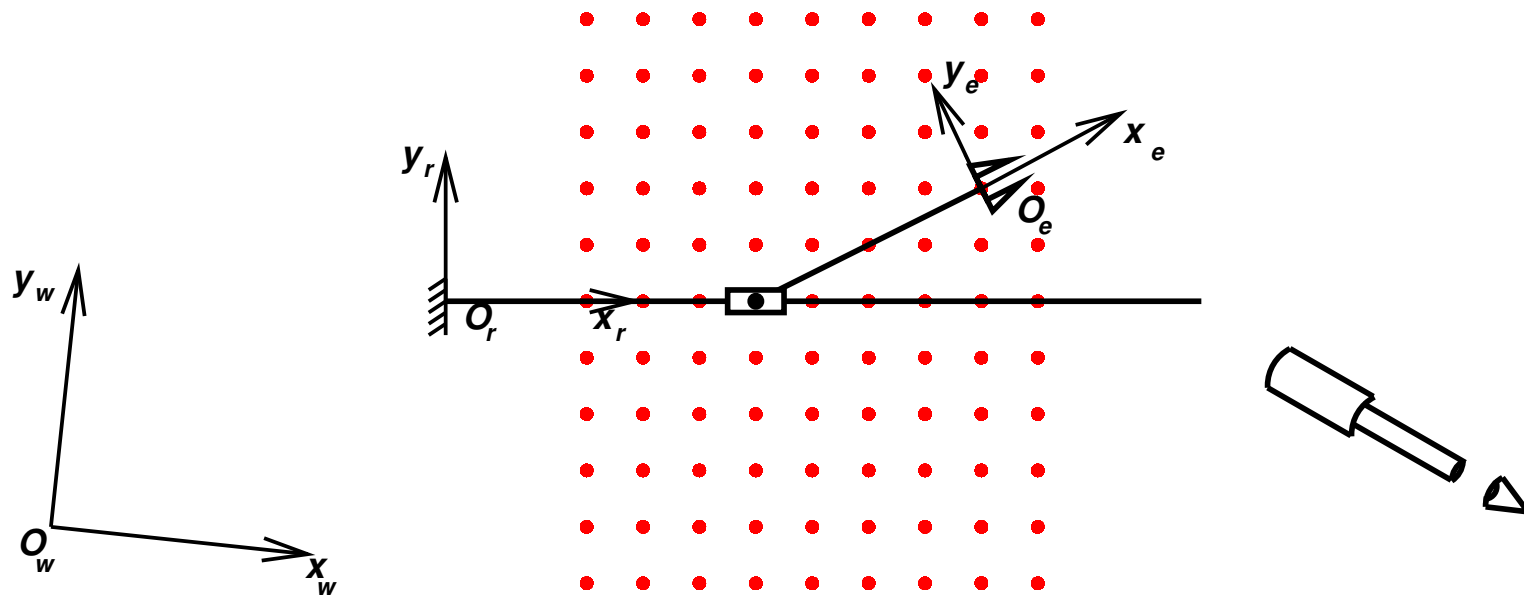


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21

kalibrační body



m p



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21



1. Vybrat/navrhnout model systému.
2. Určit počet kalibrovaných parametrů (odhad počtu).
3. Zvolíme měřené parametry - úzce souvisí s kalibrační metodou.
4. Určíme nepřesnost měřicích čidel.
5. Zvolíme optimalizační kritérium.
6. Sestavit rovnice/implementovat optimalizační program.
7. Zvolíme optimalizační metodu.
8. Navrhnout, v kterých bodech budeme provádět kalibraci.
9. Testovat parametry na minimálnost.
10. Testovat parametry na podmíněnost.
11. Určit odhady parametrů, výkresové/nominální hodnoty.
12. Testovat program na syntetických datech.
13. Naměřit skutečná data.
14. Provést výpočty parametrů.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

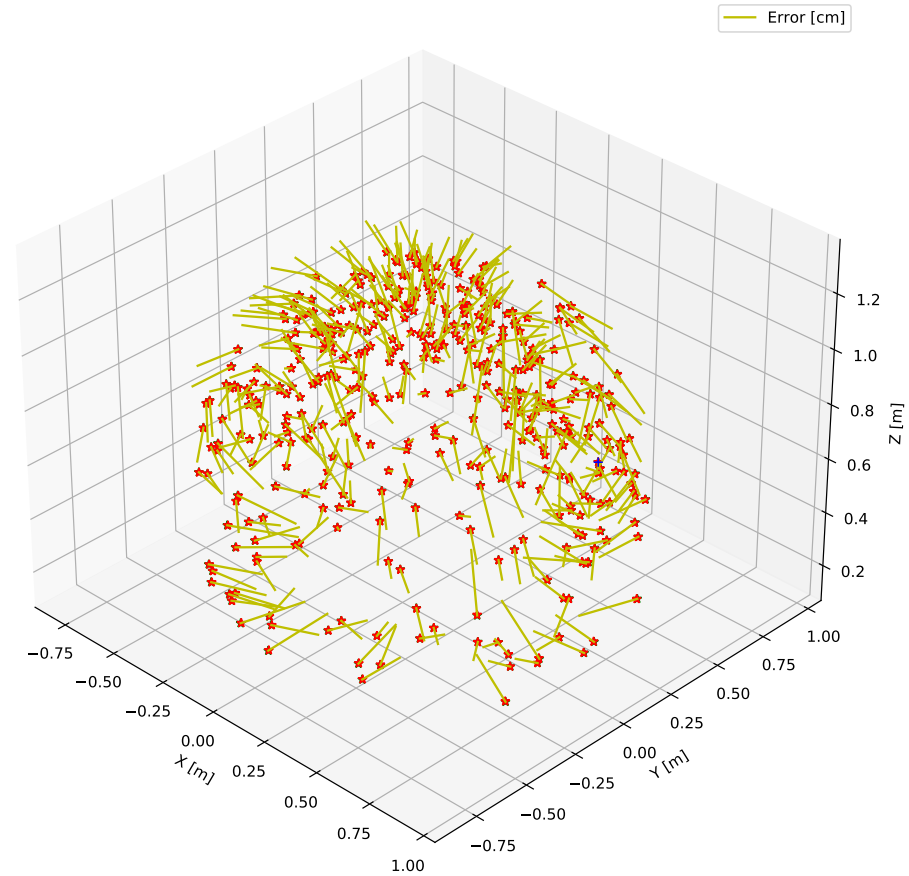
17

18

19

20

21



Model:

Průměrná chyba [mm]:

Maximální chyba [mm]:

Kalibrovatelnost:

Bez průhybu (poloha a vše z DH)

1.4

3.6

2326

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

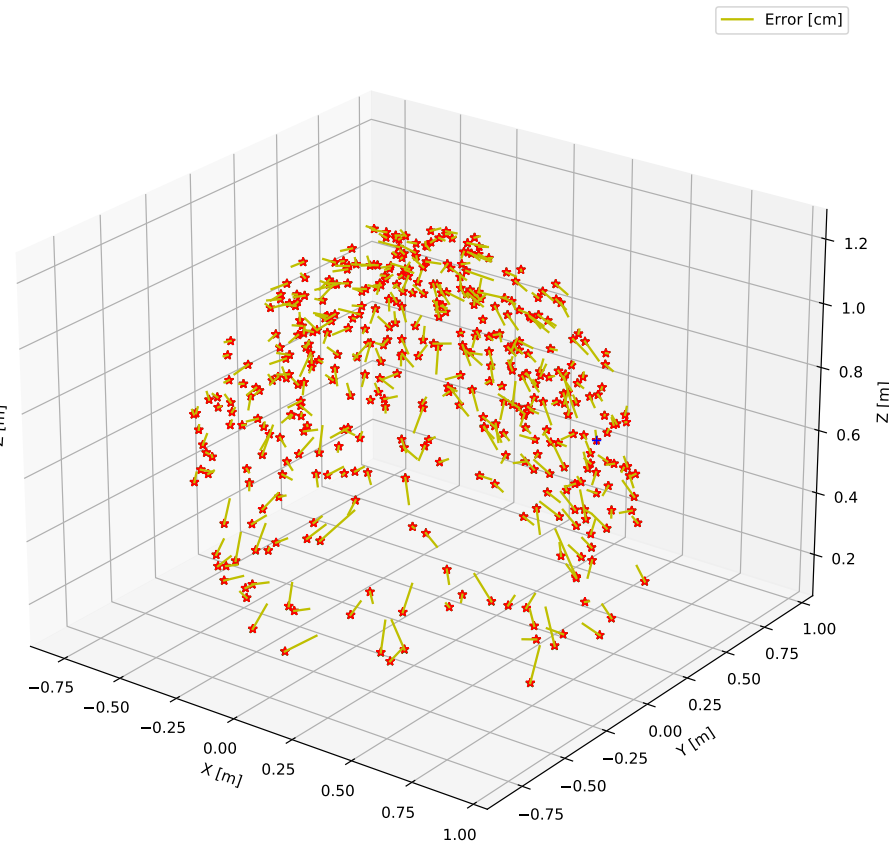
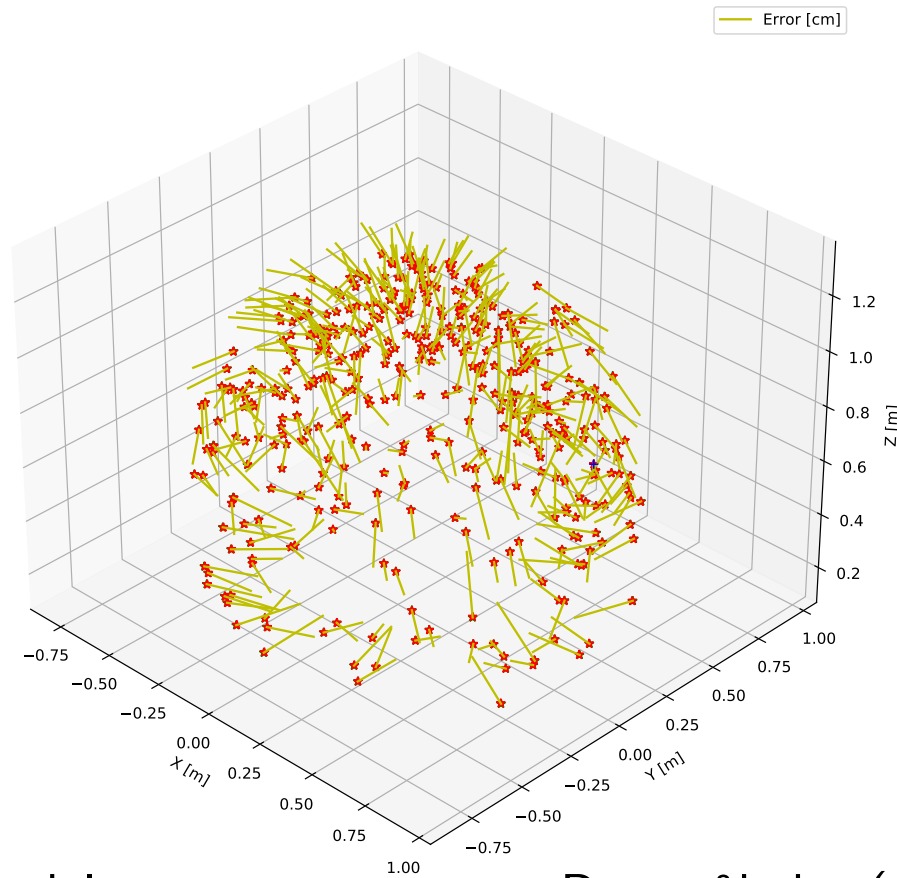
20

21

Kalibrace robotu KUKA LBR s prověřením



m p



Model:

Bez průhybu (poloha a vše z DH)

Průhyb

Průměrná chyba [mm]:

1.4

0.5

Maximální chyba [mm]:

3.6

1.7

Kalibrovatelnost:

2326

2404

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

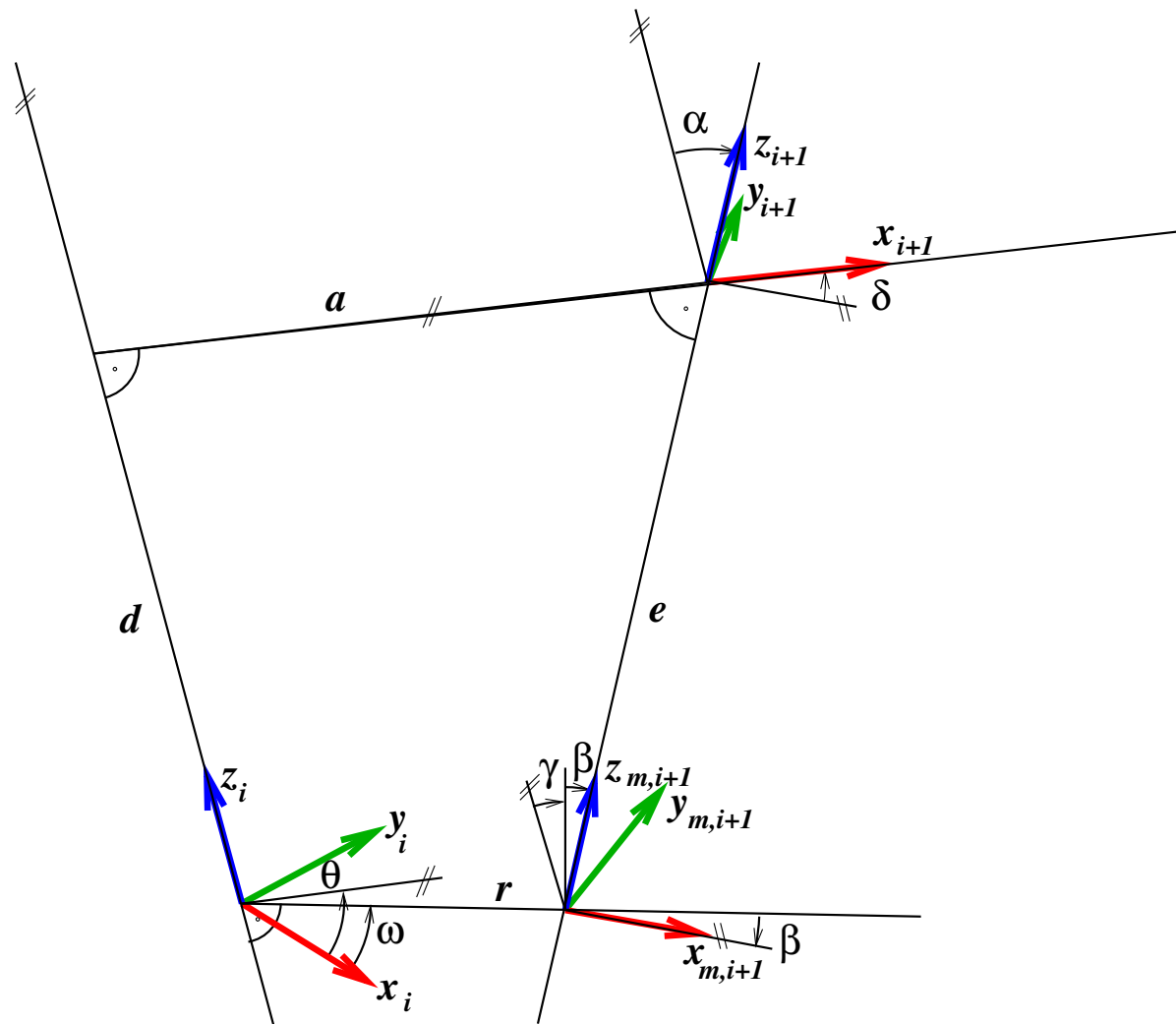
19

20

21

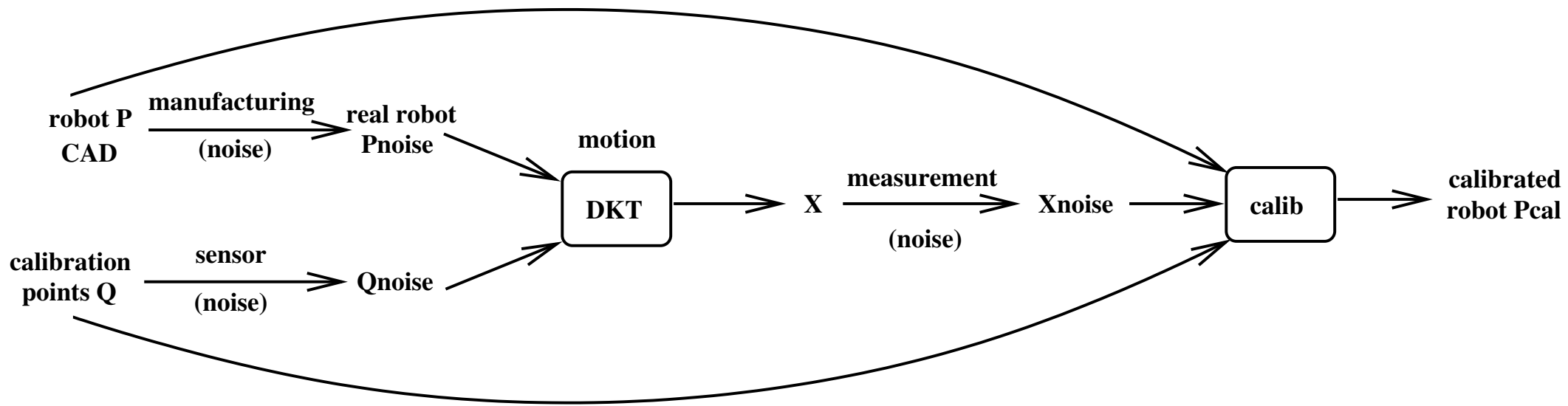
Nevhodně zvolené kalibrační parametry

Téměř rovnoběžné osy dvou kloubů, řešením je například modifikovaná DH notace.

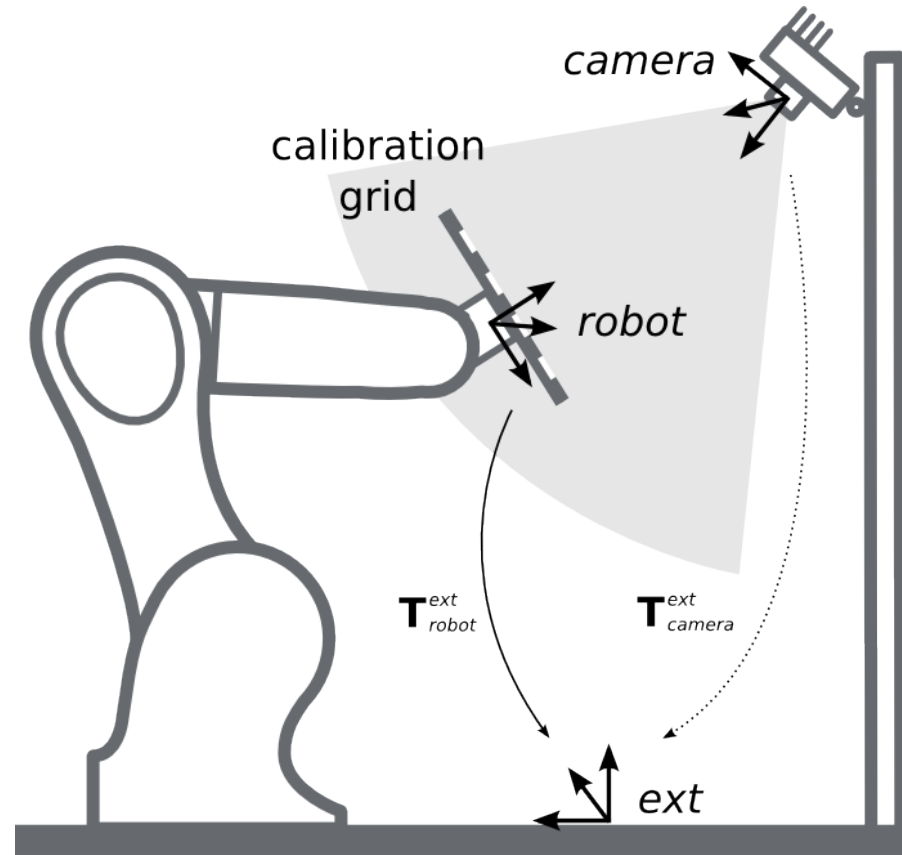




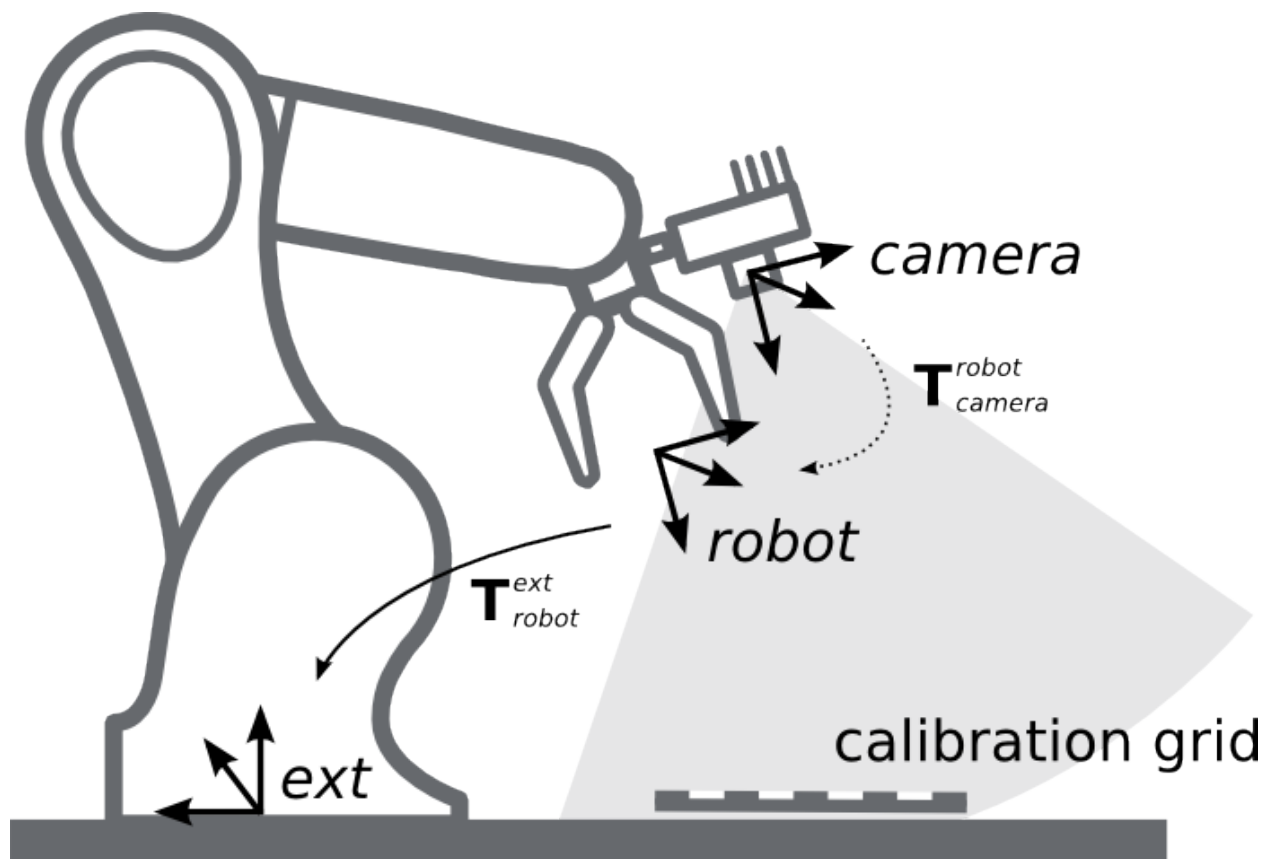
Příklad kalibrace rozměrů robotu

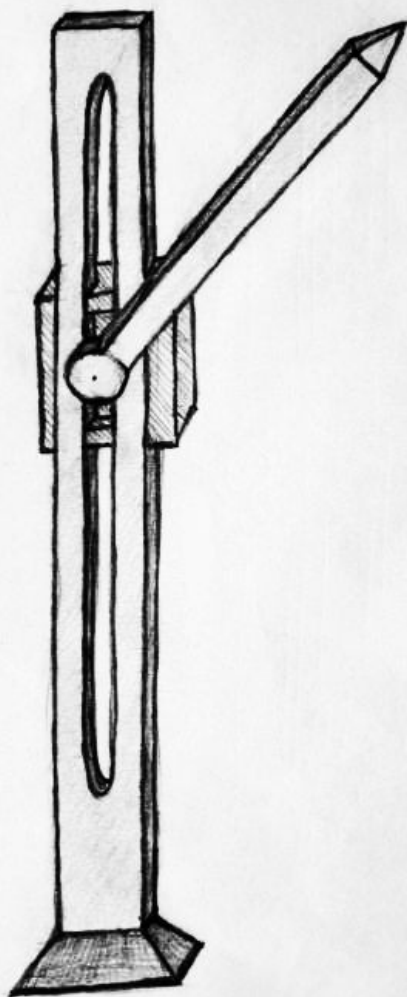


Kalibrace kamery a robotu - kamera na rámu

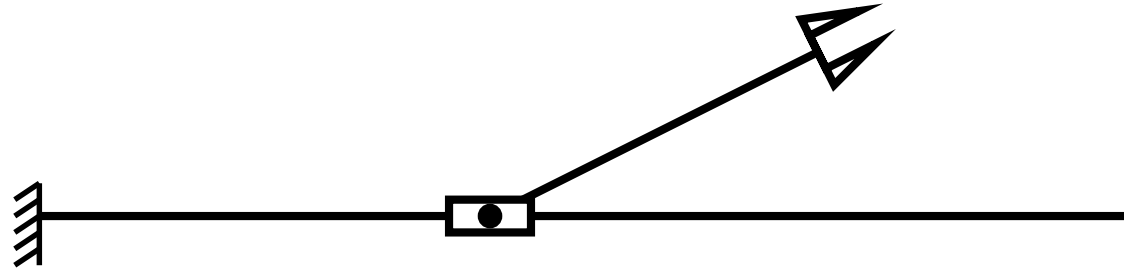


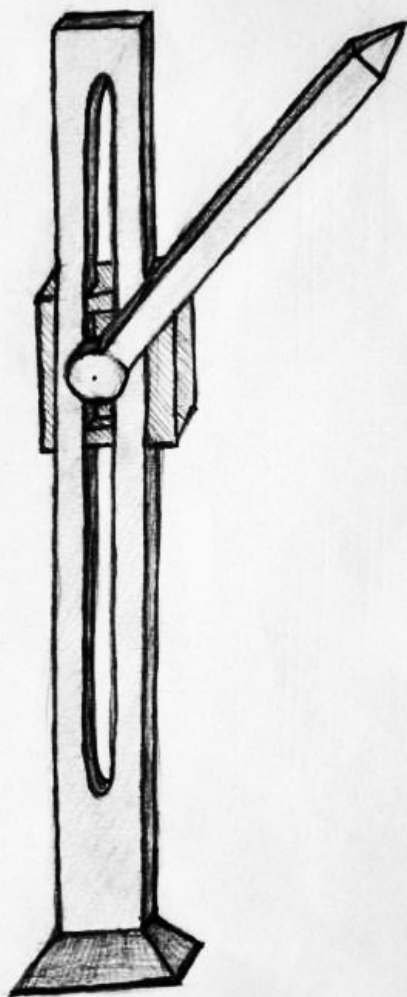
Kalibrace kamery a robotu - kamera na chapadle



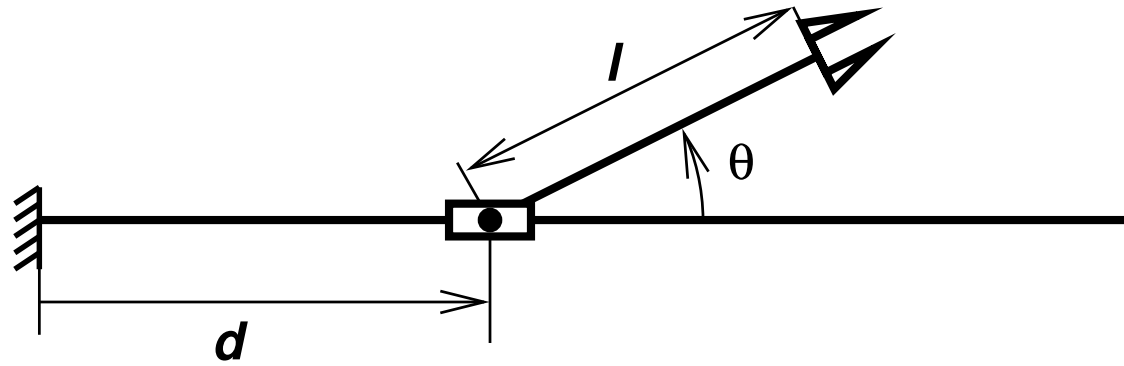


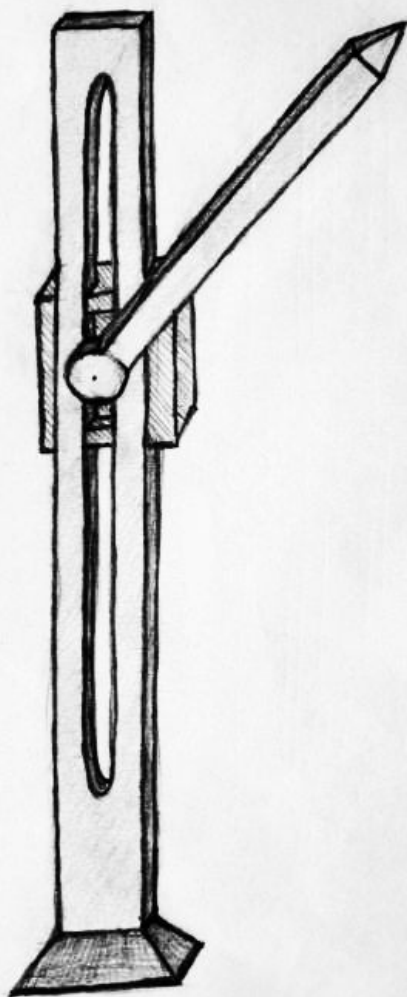
AP



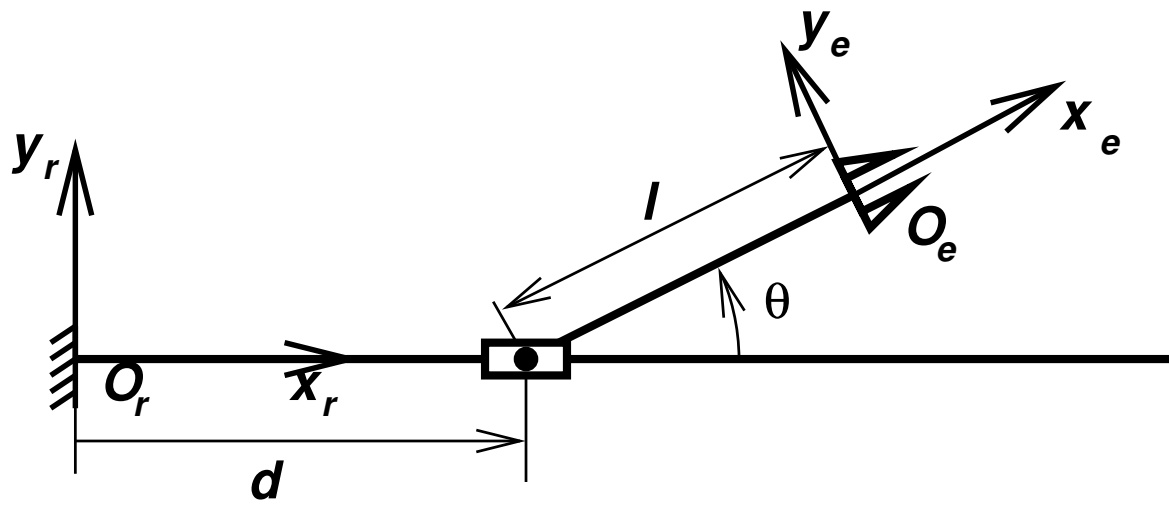


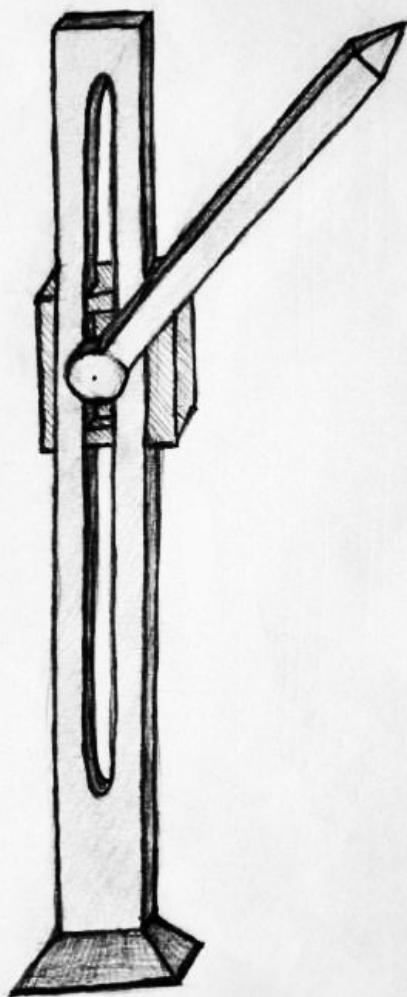
AP





AP





AP

