

Úloha: Kinematická kalibrace manipulátoru.

Zadání:

Provedte kinematickou kalibraci paralelního planárního manipulátoru. Kalibraci připravte a řešte pro planární smíšený kinematický řetězec, pro který jste řešili přímou a inverzní kinematickou úlohu. Při řešení vycházejte z těchto předpokladů:

- Pro kalibraci je k dispozici měřicí zařízení, které umožňuje měřit polohu koncového bodu v pravoúhlé souřadné soustavě. Rozsah měření přitom není omezen.
- Měření probíhá ve stejných jednotkách jako jsou zadány rozměry manipulátoru, tj. v decimetrech. Přesnost měření je 0,001 dm (směrodatná odchylka normálního rozdělení).
- Měřicí zařízení pracuje v pravoúhlé souřadné soustavě, která však není totožná s globální souřadnou soustavou (x,y) .
- Měřicí zařízení je namontováno tak, že počátek jeho souřadné soustavy je přibližně na pozici $[0,0]$ globálního souřadného systému a jeho osy jsou přibližně rovnoběžné s osami globálního souřadného systému. Jde o konstrukční údaje, tj. přibližné z hlediska kalibrace. Přesná poloha globálního souřadného systému samozřejmě není nijak známa a ani se nedá nijak zjistit.
- Kalibrovanými parametry manipulátoru jsou délky ramen $(l_{11}, l_{12}, l_{21}, l_{22})$, polohy upevňovacích bodů (kloubů) P_1, P_2 a úhly $(\gamma_{10}, \gamma_{20})$ definující počátek odměřování polohy otočného kloubu resp. sklon dráhy vozíku.
- Předpokládáme, že manipulátor bude pracovat pouze v jedné konfiguraci. Kalibrovat manipulátor proto budeme také pouze v této konfiguraci. Je to konfigurace označená hodnotou $cnf = 1$ dle definice uvedené níže.
- Počet iterací při výpočtu omezte maximálně na 25.

Konfigurace manipulátoru:

Pro přípravu funkce pro výpočet manipulovatelnosti je zásadním údajem konfigurace manipulátoru. Zadaný paralelní planární manipulátor má obecně při zadaných kloubových souřadnicích dvě konfigurace. Konfiguraci budeme definovat na základě polohy koncového bodu X vůči orientované přímce $\{O_1, O_2\}$. Máme koncový bod X v němž jsou kloubem spojeny ramena L_{21} a L_{22} . Definujeme bod O_1 jako bod na opačném konci ramene L_{21} než je bod X . Bod O_2 je pak bodem na opačném konci ramene L_{22} než je bod X .

Polohu bodu X vůči orientované přímce $\{O_1, O_2\}$ určíme na základě obecné rovnice této přímky:

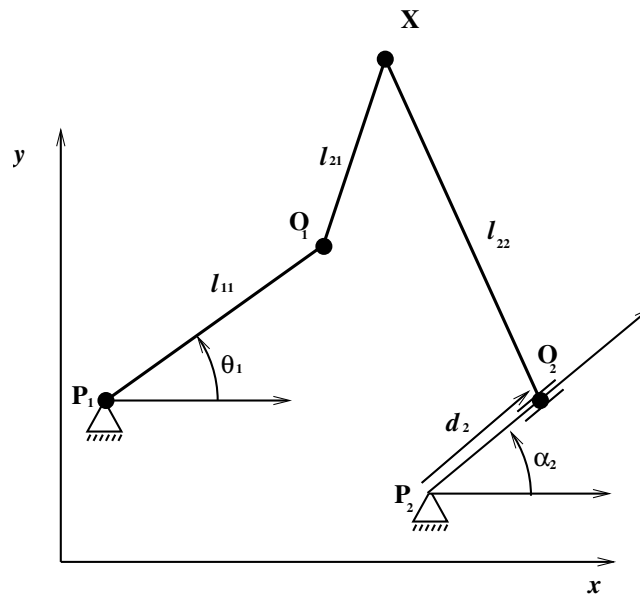
- Obecná rovnice této přímky má tvar:

$$(O_{2y} - O_{1y})x - (O_{2x} - O_{1x})y + O_{1y}(O_{2x} - O_{1x}) - O_{1x}(O_{2y} - O_{1y}) = 0$$

- Pokud do obecné rovnice přímky dosadíme souřadnice bodu X dostáváme vztah:

$$(O_{2y} - O_{1y})X_x - (O_{2x} - O_{1x})X_y + O_{1y}(O_{2x} - O_{1x}) - O_{1x}(O_{2y} - O_{1y}) = K$$

- Konfiguraci manipulátoru budeme označovat dle znaménka $\mathbf{cnf} = \text{sgn}(K)$.



Obrázek 1: Paralelní planární manipulátor s jedním rotačním a jedním posuvným kloubem.

Úkoly:

1. Sestavte soustavu rovnic vazbových podmínek.
2. Připravte Jacobiho matici soustavy rovnic.
3. Navrhněte kalibrační polohy manipulátoru. Vzhledem k náročnosti proměření kalibračních poloh, je dobré jejich počet zbytečně nezvyšovat. Za maximální počet kalibračních poloh považujeme 250.
4. Navržené kalibrační polohy definované kloubovými souřadnicemi uložte do souboru **data.mat** ve formátu MAT, který bude součástí odevzdávaného archivu.

5. Implementujte v Matlabu iterativní algoritmus kinematické kalibrace manipulátoru.
6. V průběhu kalibrace nezapomínejte kontrolovat podmíněnost Jacobiho matice - kvalitu kalibrace.
7. Připravte si pomocí řešení DKT data pro testování a ověřte funkčnost kalibrace.
8. Funkčnost kalibrace dokumentujte ve zprávě. Zajímavá je například chyba odhadu parametrů manipulátoru v závislosti na přesnosti referenčního měření.
9. Zkontrolujte syntaxi Vašeho kódu příkazem `mlint`. Váš kód by neměl generovat žádné chyby ani varovná hlášení.
10. Připravte Vaše odevzdávané funkce v Matlabu.
11. Nezapomeňte přibalit soubor **variant.m** s vybranou variantou.
12. Nezapomeňte přibalit soubor **data.mat**.
13. Výsledný archiv nahrajte do odevzdávacího systému.
14. Průvodní nákresy, schemata či odvození případně zprávu připravte ve formátu PDF. Zprávu nahrajte jako výsledek úlohy označené stejným pořadovým číslem jako zadaná úloha s dovětkem "report".

Formát funkcí a testovacích dat:

- Proměnná `calib` popisuje parametry manipulátoru získané kalibrací. Proměnná `calib` je struktura ve tvaru:
 - `links`, čtyři čísla l_{ij} , která popisují délku ramen v jednotkách délky. V případě posuvného kloubu bude u délky chybějícího ramene v proměnné `links` (l_{11} nebo l_{12}) uvedena hodnota NaN. Délky ramen jsou uloženy po sloupcích:

$$links = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{bmatrix}$$

- `origins`, čtyři čísla, která definují polohu upevňovacích bodů (kloubů) P_1, P_2 v souřadnicové soustavě měřícího zařízení. Souřadnice kloubů jsou v této proměnné uloženy jako sloupcové vektory:

$$origins = \begin{bmatrix} x_{P1} & x_{P2} \\ y_{P1} & y_{P2} \end{bmatrix}$$

- **rotations**, dvě čísla, která udávají sklon dráhy vozíku (posuvný kloub) či počátek odměřování úhlu natočení kloubu (otočný kloub):

$$rotations = [\gamma_1, \gamma_2]$$

Tyto úhly jsou vztaženy k souřadnicové soustavě měřicího zařízení.

- **struct**, vektor definující strukturu manipulátoru, není předmětem kalibrace, jde jen o zkopírovaná data ze vstupní proměnné robot tak, aby obě proměnné byly formálně stejné a bylo možné je používat ve všech funkcích stejně.
- Kalibraci manipulátoru připravte ve formě funkce **calib = mycalib(robot,J,Xm)**, kde
 - **robot** je proměnná popisující zadaný manipulátor a jeho konstrukční rozměry ve tvaru, který byl definován v první úloze. Jednotky délky jsou dm (decimetry), jednotky úhlu jsou radiány.
 - **J** je matice, kde každý sloupec délky 2 reprezentuje kloubové souřadnice poloh v nichž se bude kalibrovat. Jednotky jsou dm resp. rad dle typu kloubu.

$$J = \begin{bmatrix} \varphi_{11}, & \cdots, & \varphi_{1n} \\ \varphi_{21}, & \cdots, & \varphi_{2n} \end{bmatrix}$$

- **Xm** je matice, kde každý sloupec délky 2 reprezentuje polohu koncového bodu zjištěnou měřicím zařízením. **Xm(:,i)** je poloha koncového bodu naměřená pro manipulátor nastavený dle vektor kloubových souřadnic **J(:,i)**. Pokud je poloha definovaná kloubovými souřadnicemi **J(:,i)** nedosažitelná či nerealizovatelná jsou v příslušném sloupci matice **Xm** uvedeny hodnoty NaN.

$$Xm = \begin{bmatrix} x_1, & \cdots, & x_n \\ y_1, & \cdots, & y_n \end{bmatrix}$$

- **calib** je struktura popisující parametry manipulátoru získané kalibrací. Obsah této struktury je definován výše.
- Navržené kalibrační body uložte do proměnné **J** ve stejném formátu jako je formát vstupního parametru **J** funkce **mycalib**. Tuto proměnnou uložte do souboru **data.mat**, který odevzdáte spolu s funkcí **mycalib**.
- Všechny úhly jsou zadané v radiánech.
- Vaše funkce nesmí psát na terminál, na disk, kreslit grafy ani generovat chyby. Vaše funkce musí pouze vracet výstupy v definovaných výstupních proměnných, a to pouze reálné hodnoty nebo NaN.

- Vaše funkce nesmí používat symbolický toolbox. Tyto funkce musí být v principu použitelné pro online řízení robotu a musí tedy zaručit, aby doba výpočtu nepřekročila zvolenou hodnotu odezvy systému. V každém případě není rozumné řešit symbolicky rovnice pro každou polohu robotu.
- Testovací data nejsou součástí zadání. Návrh testovacích dat (procedury) je standardní součástí inženýrského řešení, a proto musí být procvičováno.
- Je třeba sdělit systému, jakou úlohu jste vyřešili. To provedete připojením souboru `variant.m` obsahujícím funkci, jejíž výstupem bude jediná proměnná obsahující jediný znak, a to znak identifikující vybranou variantu. Znak “a” kóduje lehkou variantu, znak “b” střední variantu a znak “c” těžkou variantu. Vyřešení více variant jedné úlohy není dovoleno.