

1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	

Robotika

Úvod do kinematiky

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	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	

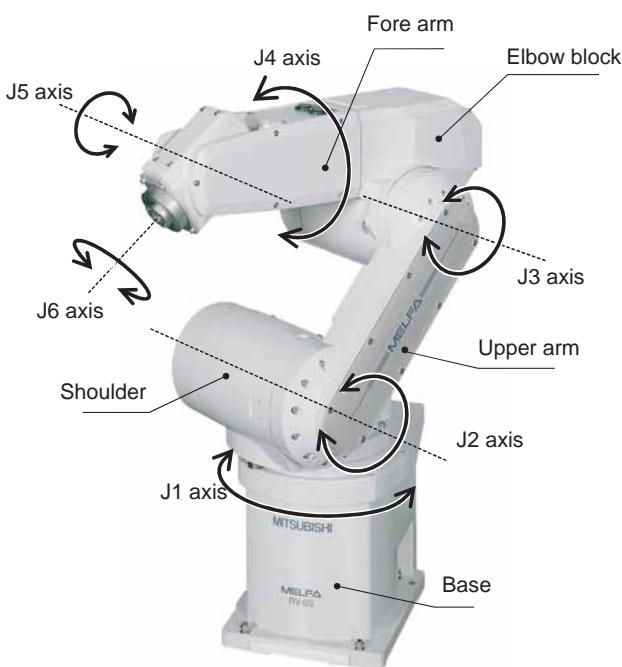
Kinematika studuje geometrii pohybu robota a trajektorie, po kterých se pohybují jednotlivé body. Klíčový pojem je **poloha**.

Statika studuje vliv sil působících na robota v klidu a jejich vliv na jeho deformace. Klíčový pojem je **pružnost**.

Dynamika analyzuje vliv sil a momentů na robota za pohybu.

Použité pojmy a zákony mohou být použity na jakémkoliv mechanické stroje.

Kinematika – Terminologie



Rameno (link) je pevná část robotu.

Kloub (joint) je část robotu, která umožňuje řízený nebo volný pohyb dvou ramen, které spojuje.

Chapadlo (end effector) je část manipulátoru, sloužící k uchopování nebo namontování dalších nástrojů (svařovací hlavice, stříkací hlavice,...).

Základna (rám, base) je část manipulátoru, která je pevně spojena se zemí.

Kinematická dvojice (kinematic pair) je dvojice ramen spojených kloubem.

Kloub může být řízený nebo volně pohyblivý. Řízený je jeho polohu. Poloha volně pohyblivého kloubu není řízena po-kloub má namontován pohon a řídicí systém může měnit honem a závisí na poloze ostatních kloubů.

Kinematický řetězec je množina rámů spojených klouby. Kinematický řetězec může být reprezentován grafem. Uzly grafu představují ramena a hrany predstavují klouby.

Mechanismus je kinematický řetězec, jehož jedno rameno je připevněno k zemi.

Kinematika – Terminologie III

Otevřený kinematický řet.
je řetězec, který může být po-
psán acyklickým grafem.



Smišený kinematický řet.,
graf obsahuje smyčku.

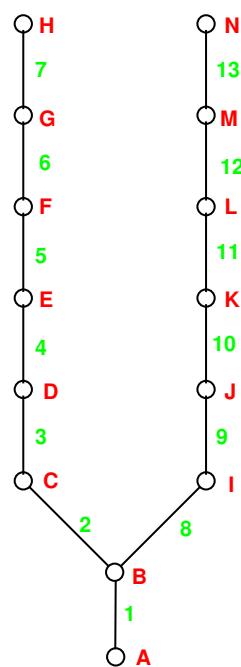
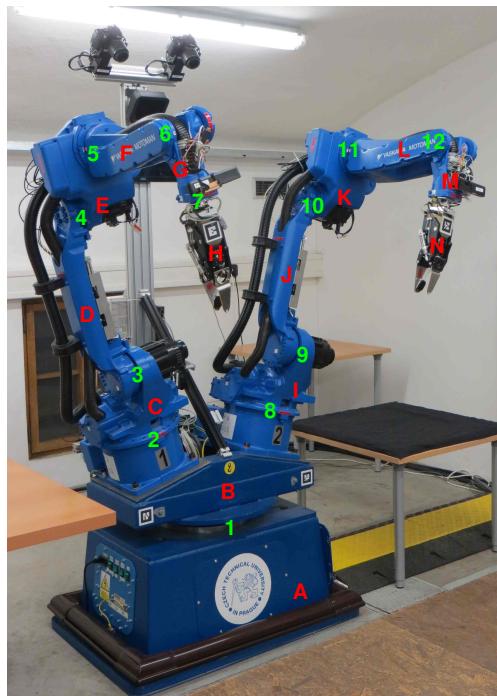


Paralelní manipulátor
obsahuje ekvivalentní
smyčky.

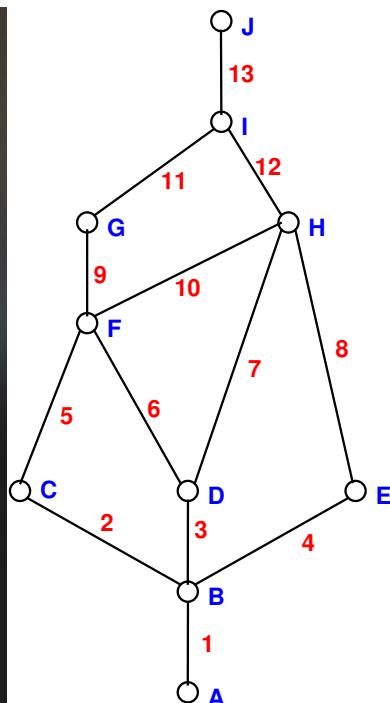


<https://www.youtube.com/watch?v=7zgKDgTIfgk>

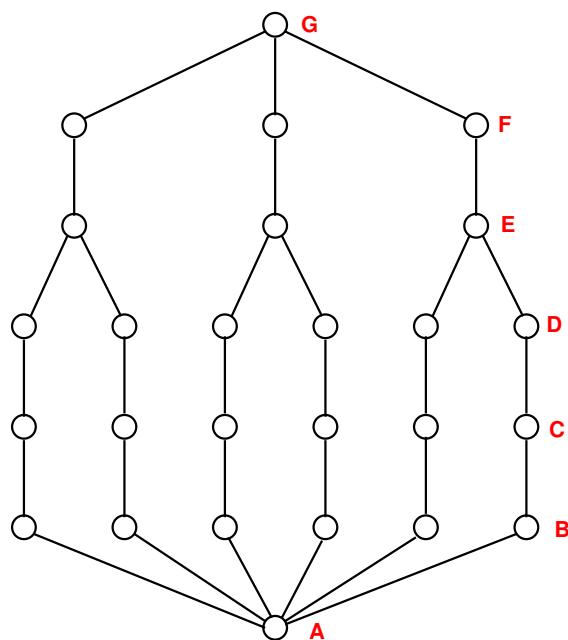
Graf robotu - Otevřený kinematický řetězec



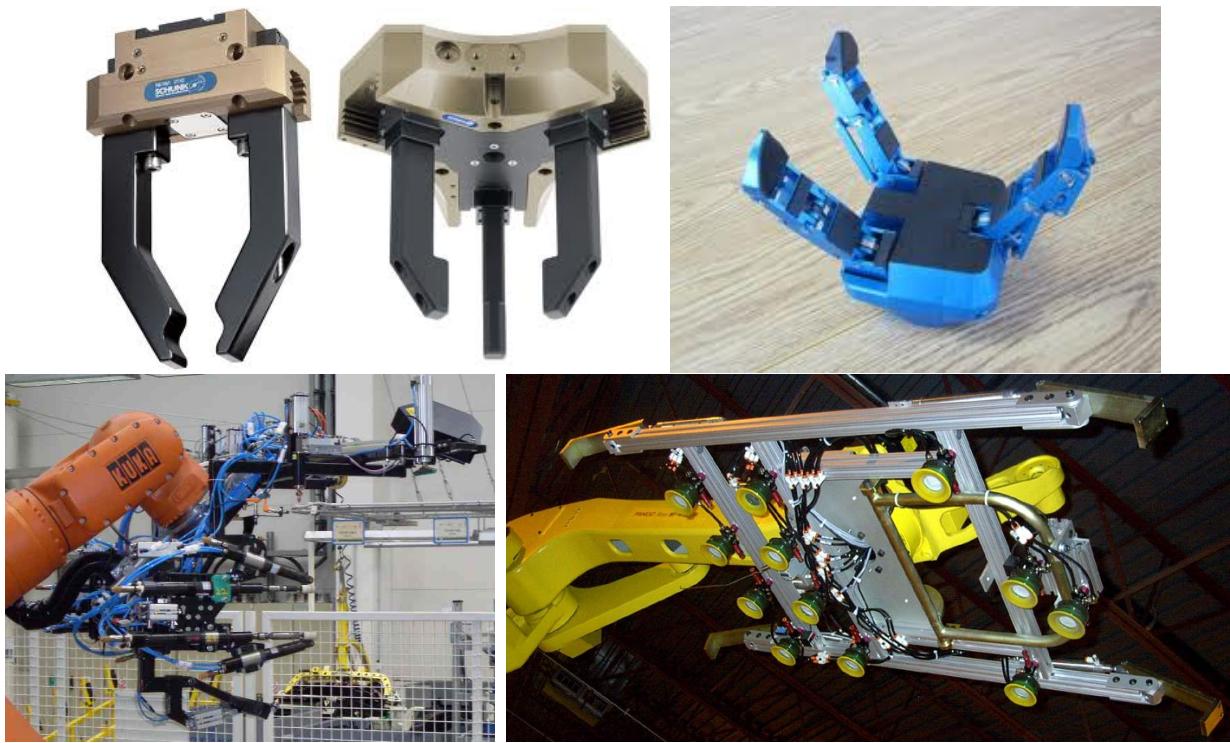
Graf robotu - Smíšený kinematický řetězec



Graf robotu – paralelní – Stewartova/Goughova plošina



1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	



Kromě standardních katalogových chapadel se často v účel průmyslu používají technologické hlavice vyrobené pro daný

1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	



Versaball: <http://www.youtube.com/embed/b0uzb0LA7fY>

Schunk dexterous hand: <https://www.youtube.com/watch?v=hPtSbPzR0rs>

Schunk SDH-2: <https://www.youtube.com/watch?v=4QvShViUceM>

Na Cornellově univerzitě byla vyvinuta hlavice, která umí manipulovat s rozmanitými objekty. Shadowhand je neúspěšný pokus o imitaci lidské ruky. Ruka Schunk SDH-2 je komerčně dostupná.

1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	

Počet stupňů volnosti (intuitivní definice) je minimální počet nezávislých parametrů, které jednoznačně systém popisují.

Příklady:

Bod v rovině má 2 DOF.

Bod v prostoru má 3 DOF.

Tuhé těleso v rovině má 3 DOF.

Tuhé těleso v prostoru má 6 DOF.

Počet stupňů volnosti je důležitý pojem nejen v robotice. Zde je několik souvisejících definic:

Okolní prostor – prostor, ve kterém robot nebo mechanismus pracuje, obvykle E^2 (rovina, planární manipulátor) nebo E^3 (prostor). Je to Euklidovský prostor (nebo jeho approximace).

Operační prostor

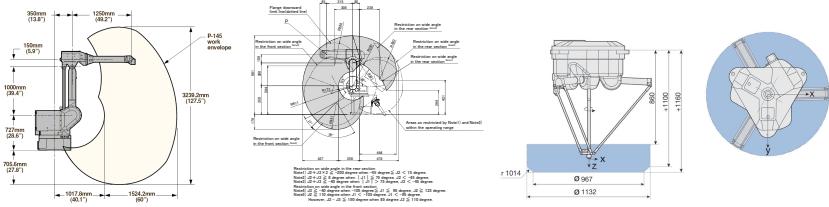
je podprostor okolního prostoru, do kterého může při pohybu robot zasáhnout některou ze svých částí.



Kinematika – Počet stupňů volnosti

Pracovní obálka (pracovní prostor 3-D)

je podprostor okolního prostoru, kde kam robot může sahnout referenčním bodem chapadla.

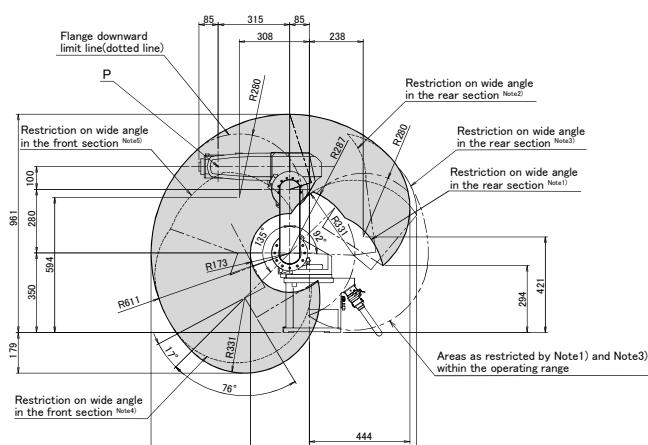


Operační prostor musí být ohraněn bezpečnostním plotem, bezpečnostními dveřmi, optickou závorou a podobně.

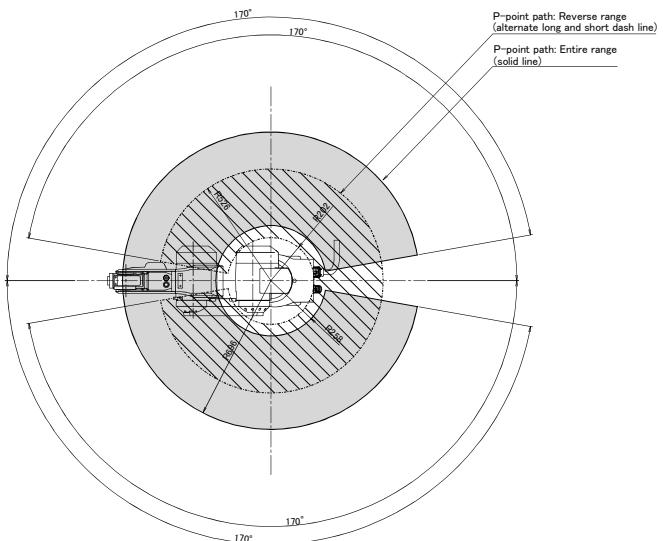
Rezy *pracovní obálkou* jsou obvykle součástí dokumentace

robotu. V praxi pracovní obálka jen nastiňuje dosah robota, protože na své hranici zpravidla zahrnuje jen jedinou orientaci manipulovaného předmětu.

Pracovní obálka - příklad



Restriction on wide angle in the rear section
 Note1) $J_2 + J_3 \times 2 \geq -200$ degree when $-45 \leq J_2 < 15$ degree.
 Note2) $J_2 + J_3 \geq 8$ degree when $|J_1| \leq 75$ degree, $J_2 < -45$ degree.
 Note3) $J_2 + J_3 \geq -40$ degree when $|J_1| > 75$ degree, $J_2 < -45$ degree.
 Restriction on wide angle in the front section
 Note4) $J_3 \geq -40$ degree when $-105 \leq J_1 \leq 95$ degree, $J_2 \geq 123$ degree.
 Note5) $J_2 \geq 110$ degree when $J_1 < -105$ degree, $J_1 < -95$ degree.
 However, $J_2 - J_3 \leq 150$ degree when $85 \leq J_2 \leq 110$ degree.



Obvykle studujeme možné polohy manipulovaného objektu nebo nástroje.
Předpokládejme, že manipulovaný objekt je tuhé těleso

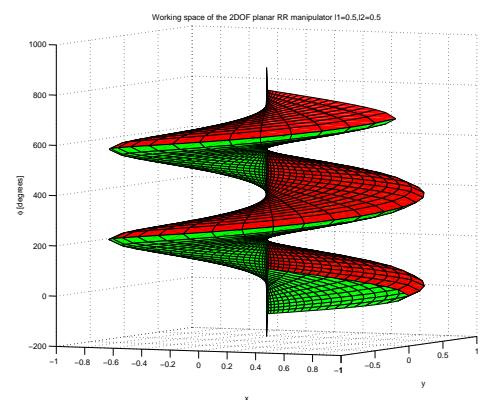
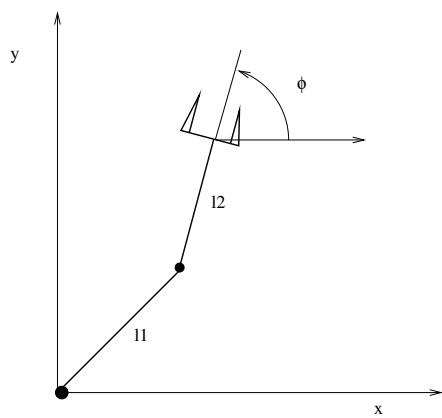
Poloha tuhého tělesa ve třírozměrném okolním prostoru může být popsána šesti parametry. Význam těchto parametrů závisí na zvolené parametrizaci, např. souřadnice zvoleného bodu (3 parametry) a orientace určená třemi úhly.

Prostor všech poloh je šestirozměrný prostor reprezentující všechny možné polohy tuhého tělesa.

Poloha chapadla může být studována v prostoru všech poloh.

Pracovní prostor je podprostor prostoru všech poloh obsahující všechny polohy, které může chapadlo zaujmout. Řešitelnost konkrétní úlohy musíme posuzovat v tomto šestirozměrném pracovním prostoru.

Počet stupňů volnosti - jednoduchý příklad



Druhy kinematických dvojic



m p

1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	

Symbol	Název	má/odnímá DOF
	rotační	1 / 5
	posuvná	1 / 5
	válcová	2 / 4
	sférická	3 / 3
	plochá	3 / 3

V praxi je dávána přednost rotačnímu kloubu, protože následujícím výkladu budeme studovat především rotační a jeho realizace je levná, má malé tření a vysokou tuhost. V posuvné klouby.

Počet stupňů volnosti mechanismu:

c_i počet stupňů volnosti odebraných kloubem i ,

f_i počet stupňů volnosti kloubu i ,

n počet rámů mechanismu (mechanismus má rám fixní),

j počet kloubů mechanismu (všechny jsou uvažovány binární),

λ počet stupňů volnosti tuhého tělesa v okolního prostoru,

F počet stupňů volnosti mechanismu.

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i,$$

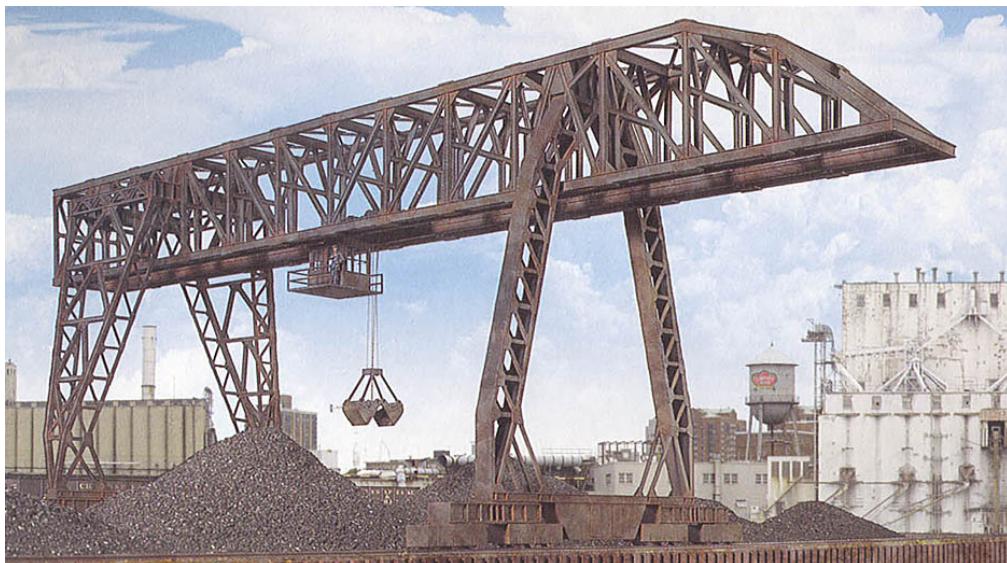
nebo

$$F = \lambda(n - 1) - \sum_{i=1}^j c_i.$$

1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	

Kutzbachovo kritérium poskytuje správné výsledky v případě nezávislých kloubů a nepřítomnosti volných nepozorovatelných stupňů volnosti. Například si představte hřídel uchycenou v rotačním kloubu. Pokud uchytíte hřídel pro zvýšení tuhosti ještě v jednom rotačním kloubu, může nastat několik možností. Pokud oba klouby budou mít společnou osu a správnou vzdálenost, bude jeden redundantní a v Kutzbachově kriteriu se nezapočítává. Pokud nebude mít společnou osu nebo vzdálenost, a to ani v mezích daných vůlemi, bude soustava přeurčená a hřídel se nebude otáčet.

Tímto způsobem přeurčené soustavy se ve strojírenství běžně používají a podle kvality a přesnosti výroby nastává jedna nebo druhá situace. Například motor, který používaly vozy Škoda od typu 1000MB po Fabii, měl klikovou hřídel uchycenou ve třech ložiscích a "modernější" čtyřválcové motory mají uchycení dokonce v pěti místech. Kutzbachovo kritérium ale jemné geometrické nuance neumí podchytit, protože pracuje na kvalitativní úrovni, proto je nutné při jeho použití kriticky zkoumat geometrické závislosti mezi klouby.



1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	

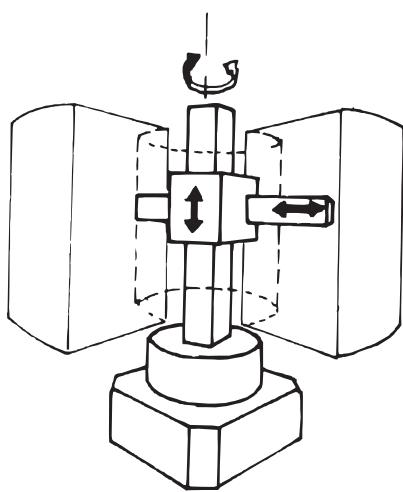
Kvíz: Kolik řídí bagrista/jeřábník stupňů volnosti? **A-3, B-4, C-5, D-Jiné číslo**

Tuhé těleso v prostoru má 6 stupňů volnosti. Manipulátor, který má umožnit alespoň v omezeném prostoru libovolnou polohu a orientaci tělesa, musí mít nejméně 6 stupňů volnosti. Protože každý další stupeň volnosti manipulátor prodražuje a snižuje jeho tuhost, mají obecné manipulátory právě 6 stupňů volnosti.

Klouby, které mají být řízeny a odměrovány, mají většinou právě jeden stupeň volnosti, protože sestrojit řízený kloub se dvěma stupni volnosti je technicky obtížné, rozuměj drahé. Nejčastěji jsou používány posuvný a rotační (otočný) kloub. Pokud má být kooub volný, není problém sestrojit kloub sférický, válcový a podobně.

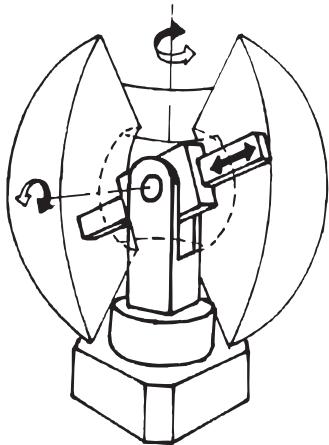
Manipulátory s otevřeným kinematickým řetězcem (sériové) mají samozřejmě všechny klouby řízené a odměrovány (proč?).

Sériové manipulátory se šesti stupni volnosti, které obsahují jen posuvné a otočné klouby a které mají zajistit obecnou orientaci manipulovaného tělesa, musí mít alespoň 3 klouby otočné. Vysvětlete proč není možné libovolným počtem jen posuvných kloubů otočit tělesem. Většinou první tři klouby (počítáno od rámu) mají velký rozsah pohybu a určují tak tvar a vlastnosti pracovní obálky robotu, poslední tři klouby, nejčastěji otočné, zajišťují orientaci tělesa. Toto nám dává přiležitost klasifikovat roboty podle prvních třech kloubů (os) do jednotlivých struktur. Výše uvedený seznam struktur není úplný ani z matematického hlediska ani z hlediska reálných robotů, ale většina robotů má jednu z uvedených struktur. Pořadí kloubů je uvedeno písmeny, např. RPP je rotoční-posuvný-posuvný, tedy válcový manipulátor.

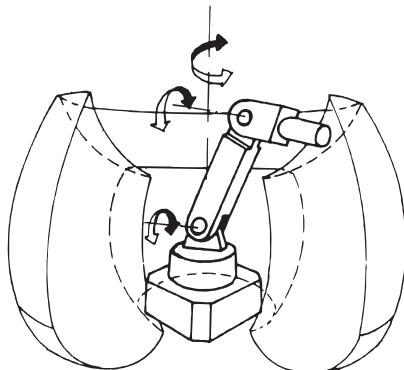


1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	

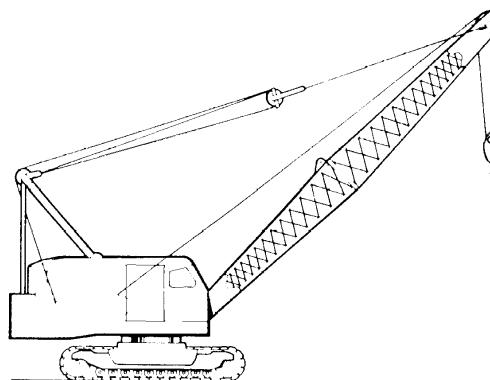
1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	



1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	



Angulární roboty mají dobrý poměr mezi objemem pravovní obálky a rozměry robotu.



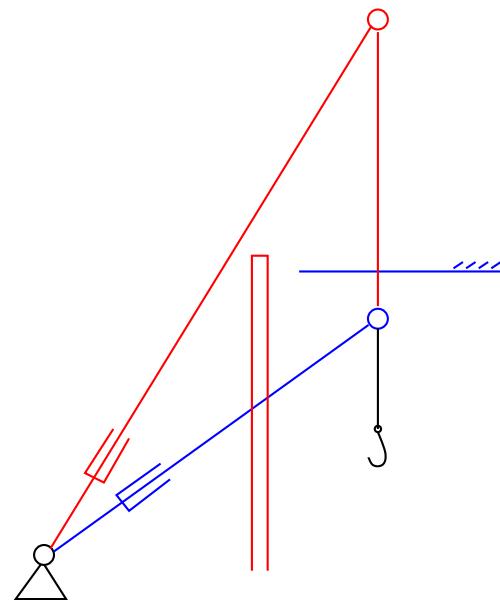
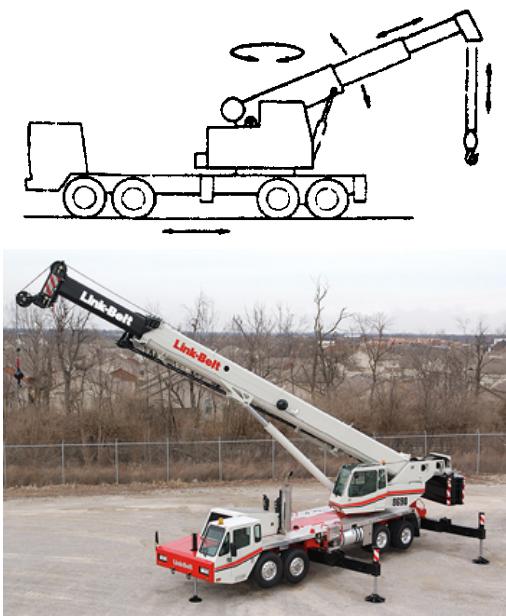
1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	

Kvíz: Kolik řídí jeřábník stupňů volnosti? A-3, B-4, C-5, D-Jiné číslo

Typická struktura manipulátoru – jeřáb RRPP



m p



1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	

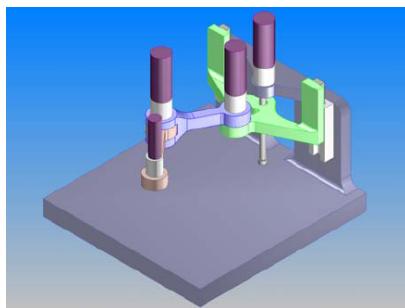
Na rozdíl od jeřábu pásového RRP, který může přinejmenším v některých případech pojíždět se zavěšeným břemenem, automobilové jeřáby potřebují vysunout a zafixovat stabilizační opěry a nemají tak další stupně volnosti spojené s pojížděním.

Automobilové jeřáby mají typicky teleskopické rameno a mají tak 4 stupně volnosti, které může jeřábník může

řídit. Hák na laně má samořejmě 3 stupně volnosti. Proč se takový jeřáb vyrábí? Hlavním důvodem je zvýšení dosahu jeřábu (pracovního prostoru) při zachování maximální velikosti jeřábu ve složeném stavu, tedy při přepravě.

Jeřáb s teleskopickým rámennem má také další výhodu v tom, že jeden stupeň volnosti navíc lze využít v přítomnosti překážek.

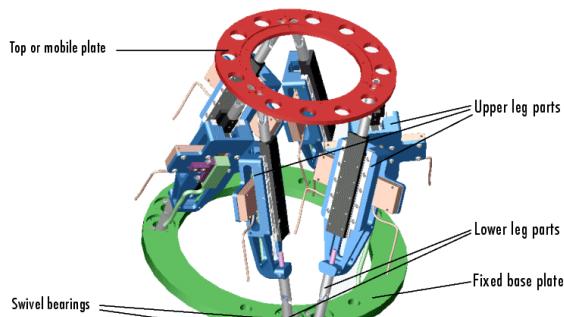
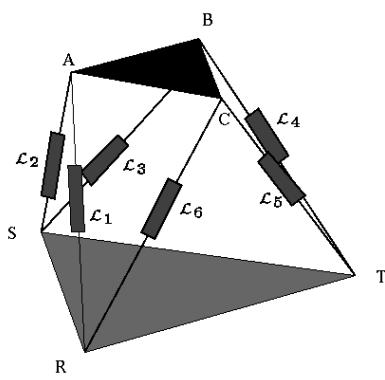
1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	



Animace převzaty z webu Masuda Salimianiho

Robot SCARA je zvláště vhodný pro operace nad rovinou, ve které má značný rozsah, a je zpravidla velmi rychlý, protože tři otočné osy nepracují proti gravitaci.

1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	



1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	

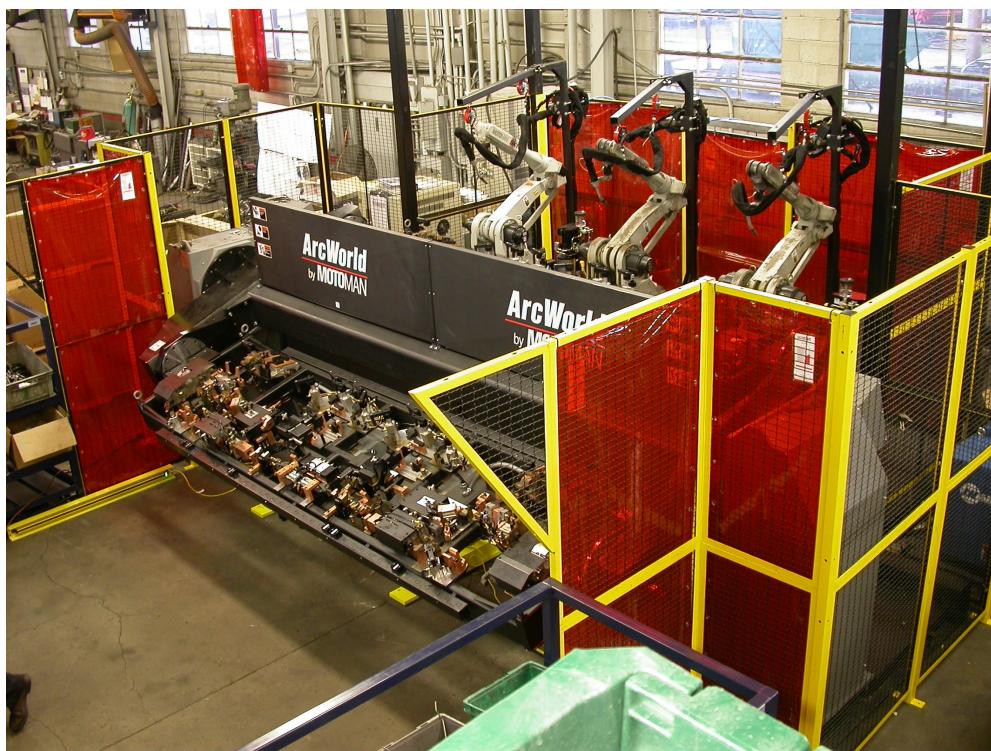


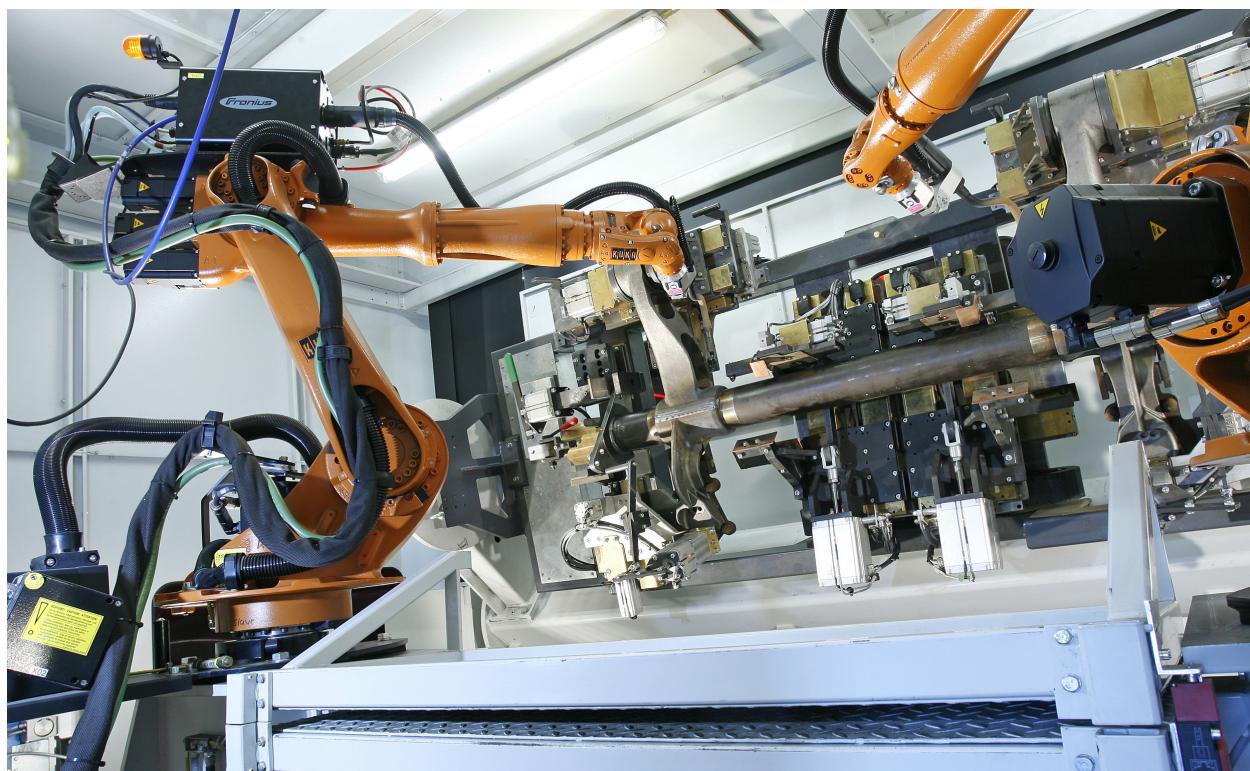
Systémy s více stupni volnosti se používají především ze dvou důvodů:

- Zvětšení pracovní obálky. Robot umístěný například na lineárním pojazdu nebo na křížovém (často zavěšeném) stole může obhospodařovat mnohem větší pracovní objem.
- Získání přístupu do míst, kam by se robot nedostal. Robot se šesti stupni volnosti může standardně umístit

těleso nebo pracovní hlavici do jakékoliv polohy v prostoru. Při svařování mu stačí rotačně symetrickou svařovací hlavici polohovat jen pěti stupni volnosti. Sváry jsou ale často skryty tak, že všechna řešení inverzní kinematické úlohy jsou v kolizi s obrobkem. V takovém případě se často používá jedna nebo dvě rotační osy, které polohují obrobek před robotem nebo roboty stojícími na zemi.

1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	





1	2
3	4
5	6
7	8
9	10
11	12
13	14
15	16
17	18
19	20
21	22
23	24
25	26
27	28
29	30
31	32
33	34
35	36
37	