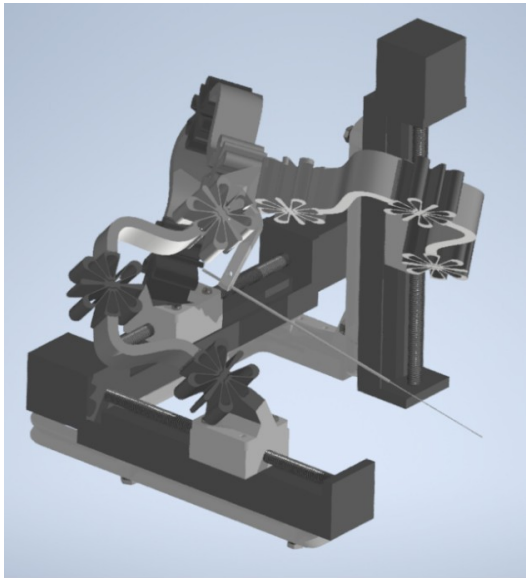


TRIPTERON

Paralelní mikromanipulátor pro buněčnou manipulaci



Konstrukční 3D model systému



Demonstrační prototyp z ABS

Výsledkem projektu je návrh a funkční demonstrátor tříosého paralelního mechanismu s vlastními pružnými klouby, matematickým modelem, elektronikou a softwarovým řízením. Řešení bylo vyvinuto a experimentálně ověřeno jako autorský akademický projekt; nejde o hotové klinické zařízení.

01 Technické zadání

Navrhnout alternativu k sériovým mikromanipulátorům pro jemné polohování mikropipety. Hlavními kritérii byly tři translační stupně volnosti, dobře podmíněný kinematický převod, omezení vůlí, kompaktní zástavba a možnost realizace cenově dostupného prototypu.

02 Posouzení konstrukčních variant

Koncepce	Technický přínos	Rozhodnutí
Delta – lineární	Dobré rozložení zatížení; proměnný převod a větší zástavba.	Nezvoleno
Orthoglide	Příznivé chování kolem izotropní polohy; složitější pružné vazby.	Předběžně posouzeno
Tripterion	Převážně rozvázané osy, redukční převod, rovinné pružné větve.	Vybráno

PŮVOD A STATUS PROJEKTU Autorský projekt zpracovaný v rámci diplomové práce „Paralelní mikromanipulátor pro buněčnou manipulaci“, Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2026. Autor: Kryštof Czerný. Fotografie a CAD vizualizace pocházejí z této práce. Reference prezentuje zkušenosti autora, nikoli dodávku firmy Cernetics zákazníkovi.

03 Matematický a numerický model

V MATLABu vznikl model přímých a inverzních kinematických vazeb, rychlostí a zrychlení jednotlivých větví. Dynamika byla formulována pomocí Lagrangeových rovnic s holonomními vazbami a multiplikátory. Model byl využit pro posouzení sil aktuátorů, převodu, podmíněnosti i optimalizaci geometrie.

3

translační stupně volnosti

 $\approx 1,5 : 1$

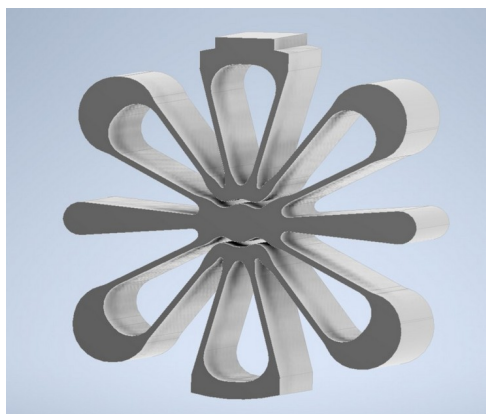
posuv aktuátor / efektor

 $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}$ návrhový pracovní prostor¹

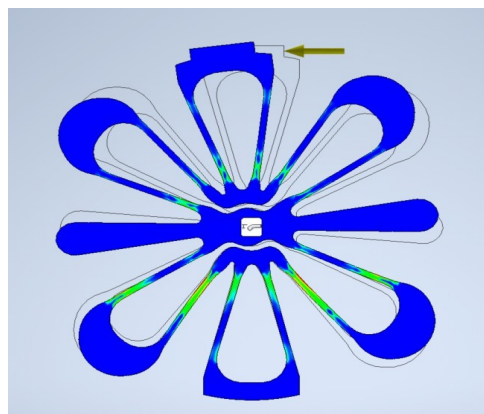
¹ Optimalizace vycházela z návrhového prostoru $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}$; experimentální ověření se vztahovalo k centrální oblasti přibližně $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}$. Oba údaje představují odlišné fáze projektu.

04 Konstrukční návrh a CAD

V CAD vznikla prostorová sestava se třemi lineárními moduly, nosným rámem, středem a držákem mikropipety. Zvláštní pozornost byla věnována návrhu monolitických pružných rotačních vazeb typu butterfly flexure. Jejich geometrie byla iterativně posuzována pomocí MKP s ohledem na deformaci, napětí, tuhost a technologii FDM.



CAD: návrh pružné vazby



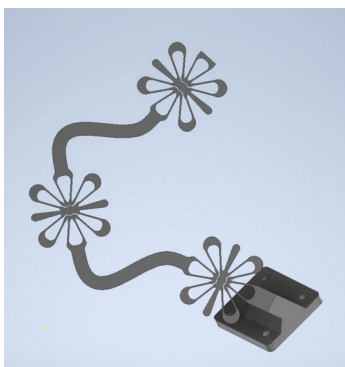
MKP: posouzení deformace a napjatosti

05 Prototyp, elektronika a řízení

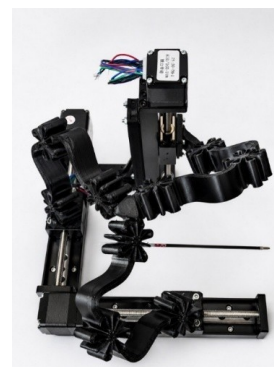
Mechanika 3× lineární modul s krokovým motorem NEMA 11; rám a monolitické větve tištěné technologií FDM z ABS.

Elektronika Raspberry Pi Pico 2, drivery TMC2209, dva joysticky a šest koncových snímačů.

Software Řízení v otevřené smyčce; transformace kartézského pohybu na aktuátory, rychlostní režimy, softwarové a hardwarové limity, generování STEP pomocí PIO.



Monolitická 3D tištěná větev



Reálný prototyp – druhý pohled

06 Experimentální ověření

Byly provedeny dvě nezávislé experimentální série s kamerou přibližně kolmo k rovinám XZ a YZ. Pohyby jednotlivých aktuátorů byly zadávány opakovaně; polohy referenčního objektu na efektoru byly určovány z kalibrovaného 4K videa metodou odhadu pózy. Zpracování obrazu bylo realizováno vlastním skriptem v Pythonu (OpenCV, NumPy, Pandas, scikit-learn).

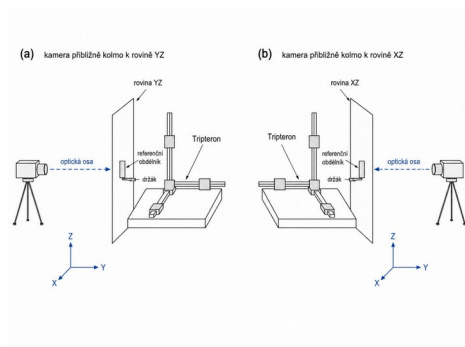
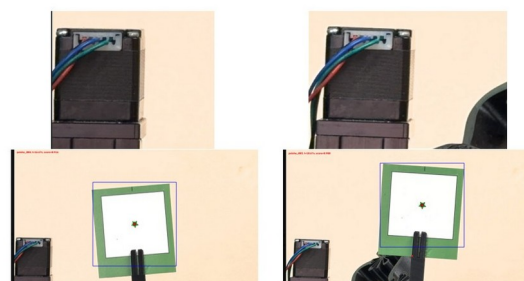


Schéma dvou měřicích orientací



Záznam měření s referenční značkou

Metrika	Kamera $\perp$ XZ	Kamera $\perp$ YZ
Rozsah v obrazové rovině	30,425 × 22,133 mm	23,572 × 20,502 mm
Průměrná rovinná opakovatelnost ²	0,130 mm	0,113 mm
Nejvyšší hodnota ve skupinách	0,278 mm	0,199 mm
Platné ustálené polohy	108 / 114	92 / 92

² Opakovatelnost byla určena ze středu referenčního obdélníku v obrazové rovině; zahrnuje mechanické i měřicí vlivy. Nejde o samostatně prokázanou polohovou přesnost nebo opakovatelnost samotného efektoru.

07 Co experiment potvrdil

Funkční trojosý prostorový pohyb, opakovatelné chování demonstračního prototypu a pracovní rozsah stejného řádu jako teoretický kinematický předpoklad. Při testovací rychlosti 10 mm/s a zrychlení 20 mm/s² nebylo pozorováno vynechávání kroků.

08 Omezení a další vývoj

Identifikovaná omezení

Poddajnost rámu z ABS a spojů, nežádoucí natočení efektoru, omezená přesnost kupovaných pohonů a provoz bez zpětnovazebního odměřování. Metoda jedné kamery měla menší spolehlivost v hloubkové souřadnici; absolutní polohová přesnost nebyla stanovena.

Doporučená další iterace

Tužší kovový rám, přepracované bezvúlové napojení větví, přesnější aktuátory s odměřováním, geometrická kalibrace a prostorové metrologické ověření. Teprve poté lze řešit vhodnost pro skutečnou biologickou manipulaci.

09 Co projekt dokládá

Schopnost propojit návrh mechanismu, aplikovanou mechaniku, analytické a numerické výpočty v MATLABu, CAD/MKP, 3D prototypování, embedded řízení a vlastní zpracování experimentálních dat v Pythonu do jednoho vývojového cyklu.