

Mechanika úchopného prvku antropomorfního typu chapadla

Martin Schönbauer

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 3. ročník
Bakalářský studijní program – STROJÍRENSTVÍ

Abstrakt: Práce se zaměřuje na návrh mechaniky antropomorfního úchopného prvku inspirovaného lidskou rukou. Cílem je vytvořit modulární a konstrukčně jednoduchý mechanismus s vysokou flexibilitou a možností praktické integrace. Navrženo bylo několik variant přenosu síly, přičemž finální řešení kombinuje lankový a motorický pohon. Výsledný návrh byl optimalizován pro funkčnost, kompaktnost a ekonomickou dostupnost.

Klíčová slova: Efektory, úchopný prvek, flexibilita, antropomorfní chapadla.

Úvod

Robotická manipulace dnes čelí rostoucím nárokům na flexibilitu, adaptabilitu a schopnost manipulace s různorodými objekty, a to jak z hlediska geometrie, tak i materiálových vlastností. Tradiční dvou, či tříprstá chapadla již často nepostačují v aplikacích, kde je vyžadována jemná motorika, přizpůsobivost nebo bezpečný kontakt s citlivými předměty. Jedním z perspektivních směrů vývoje jsou proto antropomorfní úchopné systémy inspirované funkcí lidské ruky, která je schopna intuitivního a přesného uchopení široké škály objektů. Taková chapadla se vyznačují větším počtem stupňů volnosti, možností koordinovaného pohybu jednotlivých prstů a vysokou variabilitou způsobu uchopení. Práce se zaměřuje na návrh mechaniky aktivního modulárního úchopného prvku, jenž umožňuje integraci do systému víceprvkových efektorů a přibližuje se přirozenému fungování lidské ruky nejen tvarově a pohybově, ale i z hlediska konstrukční jednoduchosti a ekonomické dostupnosti. Cílem je najít optimální kompromis mezi funkčností, rozměrovou kompaktností a technickou realizovatelností tak, aby navržené řešení bylo vhodné pro praktické nasazení v průmyslové robotice i výzkumných aplikacích.

1. Současnost antropomorfních úchopných prvků

Antropomorfní úchopné prvky představují vysoce specializovanou kategorii robotických efektorů, jejichž konstrukce a funkce jsou inspirovány lidskou rukou. Jejich hlavní předností je schopnost přizpůsobit se různorodým tvarům a velikostem objektů, čímž umožňují realizaci jemné manipulace v prostředích, kde běžná průmyslová chapadla selhávají. Složení těchto systémů obvykle zahrnuje víceprsté uspořádání s jednotlivými články a klouby, které napodobují pohyby falang a kloubů lidské ruky. Z konstrukčního hlediska lze tato chapadla rozdělit na systémy s integrovanými pohony v jednotlivých člácích, nebo na řešení s centrálním řízením prostřednictvím lanek, mechanických převodů či pneumatických aktuátorů. Pokročilejší konstrukce často využívají kombinaci aktivního a pasivního ovládání, přičemž důraz je kladen na co nejpřirozenější kinematiku a zároveň jednoduchost a cenovou efektivitu. Díky své schopnosti přizpůsobení a vysoké variabilitě jsou antropomorfní úchopné prvky předmětem intenzivního výzkumu v oblasti průmyslové automatizace, servisní robotiky

i biorobotických aplikací. Moderní návrhy navíc často integrují senzorku a zpětnou vazbu, což dále rozšiřuje možnosti adaptivního řízení úchopu v reálném čase.

Jedním z významných příkladů moderních antropomorfních chapadel je *BionicSoftHand* [1] od společnosti Festo, která využívá pneumatické aktuátory v kombinaci s elastickými materiály. Tato konstrukce umožňuje přirozený a plynulý pohyb prstů s vysokou mírou bezpečnosti při interakci s prostředím. Chapadlo je schopné jemného uchopení i objektů s nepravidelným tvarem a zahrnuje senzory pro snímání tlaku a deformace, což zajišťuje adaptivní reakci bez nutnosti přesného programování.

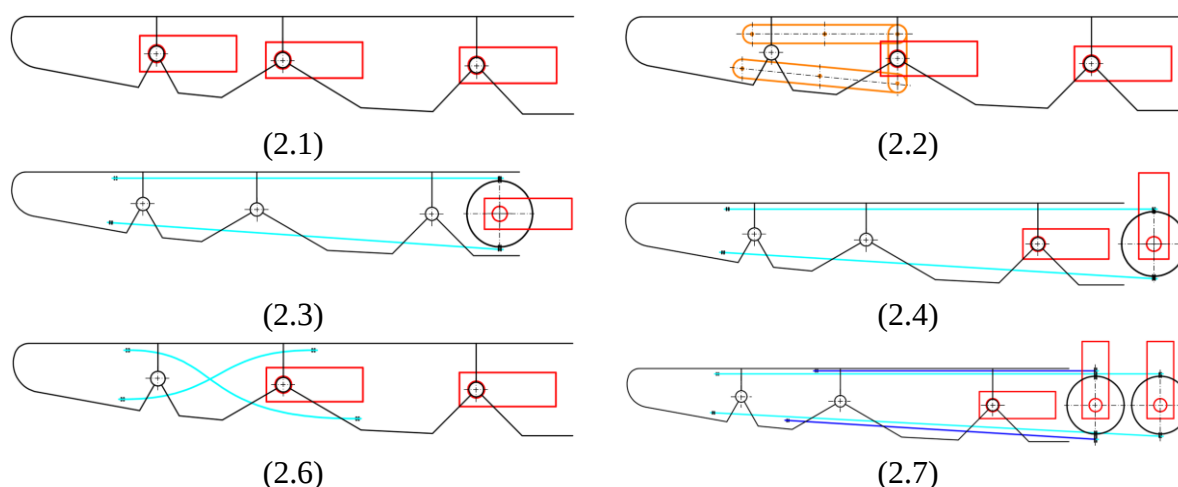
Dalším příkladem je *Shadow Dexterous Hand* [2]. Toto chapadlo představuje jedno z nejvěrnějších napodobenin lidské ruky z hlediska počtu stupňů volnosti, přičemž každý prst je ovládán pomocí soustavy lanek, která přenášejí pohyb z aktuátorů umístěných mimo samotnou ruku. Tato konstrukce umožňuje kompaktní rozměry prstů při zachování vysoké flexibility pohybů a nezávislého ovládání jednotlivých článků. Lankový systém napodobuje funkci šlach v lidské ruce a spolu se senzorickým vybavením umožňuje realizaci složitých manipulačních úkonů, jako je precizní uchopení malých předmětů, jejich otáčení nebo překládání v rámci úchopu.

Tyto příklady ukazují různé přístupy k dosažení funkční antropomorfie, od měkkých pneumatických struktur až po přesné mechanické kloubové sestavy, a demonstrují, že výběr konkrétní konstrukce závisí na požadavcích aplikace, například zda je kladen důraz na bezpečnost při kontaktu s lidmi, nebo na maximální přesnost a sílu úchopu.

2. Návrh koncepce mechaniky úchopného prvku

Na základě provedené rešerše technologií a trendů v oblasti antropomorfních úchopných systémů bylo přistoupeno k návrhu několika konstrukčních variant mechaniky úchopného prvku. Cílem bylo vytvořit aktivní modulární komponentu, která je schopna napodobit pohyb lidského prstu při zachování co nejnižších výrobních nákladů a rozměrové kompaktnosti.

Základní koncepce vychází z tříčlankového uspořádání, přičemž každá varianta se liší způsobem přenosu síly a umístěním pohonů. Jednotlivé návrhy jsou zobrazeny na obrázku 1, kde jsou znázorněny následující řešení:



Obrázek 1: Konstrukční varianty

(černá) konstrukční části článků prstu, (červená) motorické pohony, (modrá) lankový přenos síly, (oranžová) kloubový mechanismus

2.1. Motory v jednotlivých kloubech

Každý kloub úchopného prstu je osazen samostatným motorem, což umožňuje plně nezávislé řízení pohybů všech článků. Výhodou je vysoká přesnost a flexibilita ovládání. Nevýhodou jsou však nároky na prostor – při použití běžných motorů by došlo k výraznému nárůstu rozměrů prstu, nebo by bylo nutné využít miniaturní a drahé aktuátory.

2.2. Sdružené ovládání pomocí kloubového mechanismu

V této konstrukci je pohyb dvou po sobě jdoucích kloubů řízen jediným motorem skrze mechanicky spojený kloubový převod. Tím se snižuje počet motorů potřebných pro pohyb prstu. Nevýhodou je náročnost výroby přesného a malého kloubového systému spojeného s vyšší cenou.

2.3. Centrální lankový pohon

Celý pohyb prstu je realizován pomocí jediného lanka, které ovládá všechny klouby najednou. Tento přístup je konstrukčně velmi jednoduchý a cenově dostupný, protože vyžaduje pouze jeden motor. Hlavním omezením je však neschopnost samostatného řízení jednotlivých článků prstu, což limituje variabilitu úchopu a jemnou manipulaci.

2.4. Nezávislý motorický a lankový přenos

Možnost ovládat více kloubů nezávisle na sobě, přičemž první dva články jsou konstrukčně propojeny a jejich pohyb je na sobě závislý. Třetí článek má samostatné ovládání, což umožňuje částečně nezávislé přizpůsobení tvaru uchopeného objektu. Tato varianta nabízí vhodnou rovnováhu mezi jednoduchostí konstrukce a schopností adaptace. Nevýhodou je nemožnost nezávislého řízení prvního a druhého článku, což snižuje flexibilitu úchopu, a také složitější realizace a ladění lankového přenosu kvůli nutnosti přesného vedení a napnutí lanek.

2.5. Křížený lankový přenos

Specifický návrh, kde se využívá dvojice lanek vedených tak, aby se jejich pohyb přenášel na jednotlivé klouby s protiběžným účinkem. Tento systém umožňuje plynulý a vzájemně koordinovaný pohyb článků bez potřeby více motorů. Je vhodný pro aplikace s požadavkem na jemnou manipulaci, ale vyžaduje pečlivé nastavení přenosového systému.

2.6. Oddělené lankové a motorické ovládání

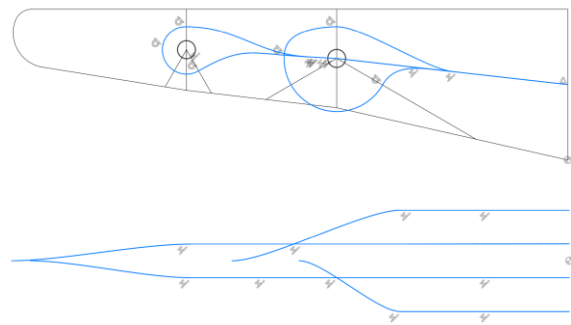
Finální zvolená varianta, která kombinuje přímé motorické řízení některých kloubů s lankovým přenosem u ostatních. První dva články prstu jsou ovládány lankem a jejich pohyb je na sobě nezávislý, zatímco třetí článek je řízen samostatným motorem. Toto řešení umožňuje optimálně vyvážit mezi konstrukční složitostí, velikostí komponent a přesností řízení. Zároveň poskytuje vysokou variabilitu a možnost efektivní modularity, což je klíčové pro její nasazení v rámci víceprvkových hlavic.

3. Konstrukční řešení

Vybranou koncepcí se stalo řešení s odděleným lankovým a motorickým pohonem kloubů. Tato koncepce umožňuje nezávislé ovládání jednotlivých článků úchopného prvku, přičemž je zajištěna dobrá modularita a přiměřená složitost konstrukce. Zvolená řešení respektují požadavky na rozměrovou podobnost s lidským prstem.



(a)



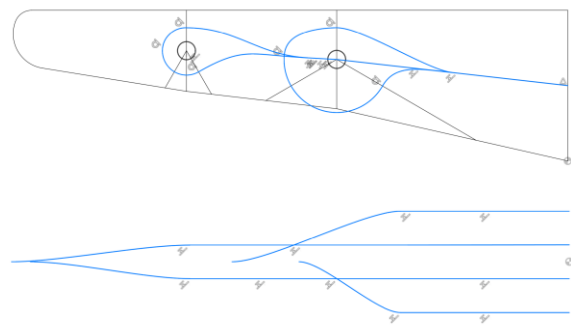
(b)

Obrázek 2: (a) 3D model člankového prstu první konstrukční verze,
(b) Boční a horní pohled na rozdělení a trasy jednotlivých kanálků

Počáteční konstrukční návrh (viz obrázek 2) pracoval s vedením lanek uvnitř článků pomocí PTFE trubiček, jejichž nízký koeficient tření měl přispět k hladkému chodu. V praxi se však ukázalo, že trubičky ztěžují montáž a jejich omezená pružnost brání požadovanému pohybu. Proto bylo vedení přepracováno tak, aby lanka vedla přímo kontaktem po konstrukci. Kloubové spoje byly v této fázi řešeny jako součásti výtisku, čímž se eliminovala potřeba dodatečné montáže.



(a)



(b)

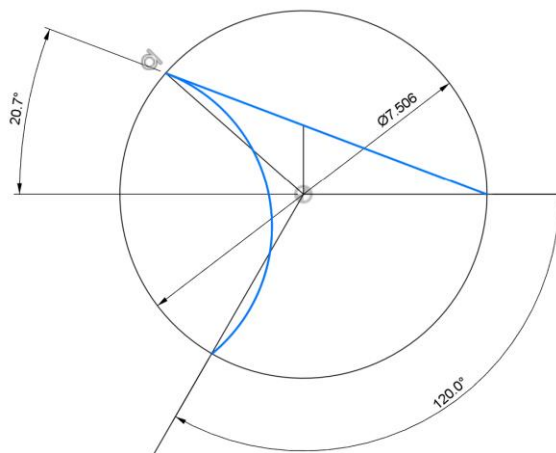
Obrázek 3: (a) Upravený 3D model člankového prstu,
(b) Boční a horní pohled na rozdělení a upravené trasy jednotlivých kanálků

Další iterace návrhu přinesla optimalizaci samotného kontaktu lanka s konstrukcí. V místech vývodů lanek byly zaobleny přechody a vyhlazeny ostré hrany (obrázek 3a), což vedlo ke snížení třecích ztrát. Polohy vývodů byly posunuty dále od rotační osy kloubu, čímž se zlepšil moment v kloubu. Experimentálně byl stanoven i optimální průměr kanálku, který zajistil vhodný kompromis mezi třením, pevností a ovladatelností. Vedení lanek v druhém článku

bylo přepracováno tak, aby se lanka uvnitř těla nekřížila, úprava lze vidět na obrázku 3b, čímž se zvýšila provozní spolehlivost.



(a)

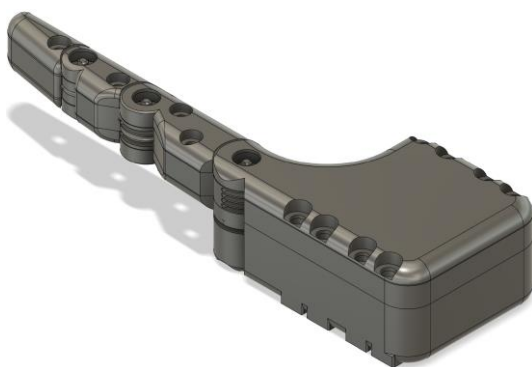


(b)

Obrázek 4: (a) 3D model článkového prstu s upravenými klouby,
(b) Speciální geometrie v kloubech

Významného zlepšení doznaly také kloubové mechanismy, které byly v další konstrukční verzi vybaveny ložisky typu 623. Nahrazením plastových pantů těmito ložisky došlo k výraznému zvýšení plynulosti pohybu a snížení mechanického odporu v kloubech.

Současně s optimalizací kloubového mechanismu došlo i k úpravě geometrie vedení lanek, zejména v místech jejich průchodu skrze kloubové oblasti. Původní vedení lanka často způsobovalo ostré zalomení v místech vstupu do kloubu, což mělo za následek zvýšené tření, rychlejší opotřebení materiálu lanka a nerovnoměrný přenos síly. Tyto ostré lomy byly přepracovány do formy plynulých drážek se speciální geometrií, zobrazenou na obrázku 4b. Nové klouby nyní umožňují pozvolné zakřivení trajektorie lanka při ohybu prstu. Tímto konstrukčním zásahem se podařilo výrazně snížit namáhání lanka v kritických bodech a zajistit lehčí průchod lanka celým mechanismem. Výsledkem je plynulejší a přesnější přenos mil mezi jednotlivými články prstu, což přispívá k lepší funkční spolehlivosti celého úchopného prvku a snižuje riziko poruchy v důsledku mechanického opotřebení.



(a)

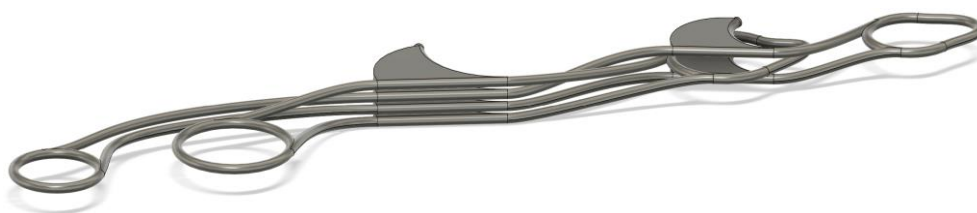


(b)

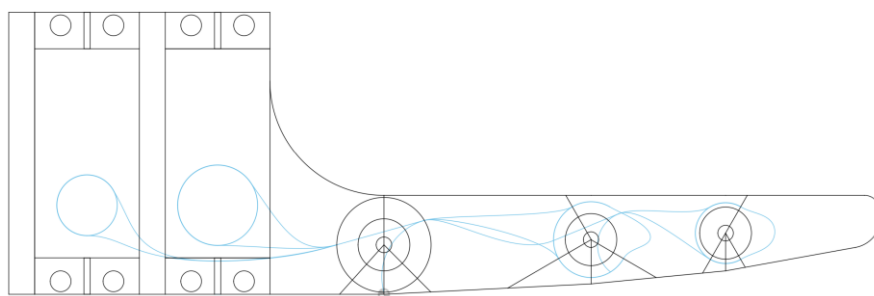
Obrázek 5: 3D model článkového prstu s testovacím segmentem
(a) hlavní pohled, (b) pohled s otvory pro motory

V poslední fázi vývoje byla integrována možnost přímého motorického ovládání třetího článku. Použitý servomotor byl umístěn přímo do kloubového prostoru (obrázek 5b) a umožnil nezávislé řízení ohybu posledního článku. V konstrukci byl rovněž navržen testovací segment (obrázek 5b) pro vedení lanek, kde byl vyzkoušen rybářský vlasec jako alternativa běžného lanka. Výsledky ukázaly nižší tření a dostatečnou pevnost při zachování potřebné flexibility.

Celkově konstrukce reflektuje požadavky na kompaktnost, funkčnost a realizovatelnost s ohledem na cílové použití v modulárním antropomorfním efektoru.



(a)



(b)

Obrázek 5: (a) Finální 3D model kanálků
(b) Finální boční pohled na rozdělení a upravené trasy jednotlivých kanálků

4. Technicko-ekonomické zhodnocení

Navržené konstrukční řešení úchopného prvku antropomorfního typu představuje významný přínos v oblasti flexibilní robotické manipulace. Díky své mechanické koncepci, která vychází z principů lidské ruky, umožňuje navržený prvek napodobit přirozené pohyby prstů a adaptivně se přizpůsobit různým tvarům a velikostem uchopovaných objektů. Modulární struktura konstrukce dovoluje snadnou integraci do víceprvkových úchopných hlavic a zajišťuje vysokou variabilitu využití v průmyslových i výukových aplikacích. Kombinace motorického a lankového pohonu umožňuje dosáhnout rovnováhy mezi mechanickou jednoduchostí, cenovou efektivitou a dostatečnou přesností pohybu.

Z ekonomického hlediska byl návrh úchopného prvku realizován s důrazem na minimalizaci nákladů a dostupnost jednotlivých komponent. Většina konstrukčních částí je navržena tak, aby mohla být vyrobena pomocí běžně dostupných metod, především 3D tisku s použitím materiálu PLA. Pohonné jednotky a spojovací prvky jsou standardní komerčně dostupné komponenty, jejichž pořizovací cena je nízká. Tím se podařilo vytvořit konstrukci, která je nejen funkčně efektivní, ale zároveň i finančně nenáročná na výrobu a údržbu. Díky své jednoduchosti a nízké ceně je tak vhodná nejen pro prototypování a výukové účely, ale i pro

lehké průmyslové aplikace, kde není vyžadována extrémní mechanická zátěž ani vysoká přesnost.

Celkové náklady na výrobu jednoho funkčního prototypu úchopného prstu se pohybují přibližně kolem 2 500 Kč v závislosti na konkrétním zvoleném motoru a použitých tiskařských parametrech.

5. Závěr

Tato práce se zabývala návrhem a konstrukčním řešením mechaniky úchopného prvku antropomorfního typu, který je určen pro použití v robotických systémech s vysokými nároky na flexibilitu a adaptabilitu. Cílem bylo vytvořit funkční, modulární a zároveň výrobně nenáročný prvek inspirovaný lidskou rukou, jenž bude schopen přizpůsobivého a bezpečného uchopení objektů různého tvaru a materiálových vlastností.

Na základě rešerše současných technických řešení a analýzy jejich výhod a nevýhod byla navržena a posouzena řada variant mechanických koncepcí. Finální konstrukční řešení kombinující lankový a motorický přenos sil přineslo uspokojivý kompromis mezi složitostí, variabilitou pohybu a prostorovými nároky. Optimalizací vedení lanek a konstrukčních detailů kloubů, včetně implementace ložisek, se podařilo zvýšit plynulost pohybu a celkovou spolehlivost mechanismu.

Technické zhodnocení potvrdilo funkčnost a přínos navrženého řešení pro aplikace, kde je nutná jemná manipulace s nepravidelnými objekty. Z ekonomického hlediska byl návrh zpracován s důrazem na využití dostupných výrobních technologií a cenově přijatelných materiálů, čímž se zvyšuje potenciál pro praktické nasazení v průmyslovém prostředí.

Navržený úchopný prvek představuje vhodný základ pro další vývoj směrem k plně funkční antropomorfní úchopné hlavici, případně pro integraci pokročilých senzorických systémů a algoritmů řízení. Výsledky práce potvrzují, že i při zachování konstrukční jednoduchosti lze dosáhnout efektivního a flexibilního úchopného mechanismu, který se blíží schopnostem lidské ruky.

Literatura

- [1] *BionicSoftHand* | Festo USA [online]. [vid. 2025-05-05]. Dostupné z: https://www.festo.com/us/en/e/about-festo/research-and-development/bionic-learning-network/bionic-grippers-and-soft-robots/bionicsofthand-id_68106/
- [2] Shadow Dexterous Hand Series - Research and Development Tool. *Shadow Robot* [online]. 19. září 2023 [vid. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://shadowrobot.com/dexterous-hand-series/>