



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**NÁVRH MIKROROBOTŮ – TECHNOLOGIE V
MIKROSVĚTĚ**

DESIGN OF MICROROBOTS – MICROWORLD TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Kamrla

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	Jan Kamrla
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh mikrorobotů – technologie v mikrosvětě

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh a konstrukce mikrorobotů, které jsou inspirovány přírodou je poměrně nový přístup v robotice. Probíhá aktuální vývoj robotických komponentů, jako jsou umělé svaly, čidla, křídla, apod. Tyto komponenty jsou použity na vývoj prototypů subsystému, jako jsou robotické nohy, robotická křídla, apod. a potom jsou integrovány do komplexních robotických zařízení.

Cíle bakalářské práce:

1. Analýza problému a literární rešerše.
2. Vytvoření fyzikálních modelů základních elementů mikrorobotů.
3. Popis technologií v mikrosvětě

Seznam doporučené literatury:

Yves Bellouard, Microrobotics: Methods and Applications, ISBN-10: 142006195X, CRC Press (12 Nov 2009).

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce si klade za úkol představit problematiku návrhu mikrorobotů a mikrosystémů. Práce klade důraz především na technologie, které jsou vhodné pro aplikaci v mikrosvětě a jejich výrobu. V závěru práce je shrnutí směřování budoucího vývoje mikrorobotů.

ABSTRACT

This Bachelor thesis aims to introduce problematics of designing microrobots and microsystems. The thesis emphasizes technology, which are suitable for application in the microworld. The conclusion is summary and future development of microrobots.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikrosvět, mikrorobot, mikroobrabění, aktuátor, senzor, litografie, poddajný mechanismus, efekt změny měřítka, miniaturizace

KEYWORDS

Microworld, microrobot, micromachining, actuator, sensor, lithography, flexible mechanism, scaling effect, miniaturization

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLOVOPIČKA, Alexander. *Jméno bakalářské práce*, Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky.

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování je nepovinné, použijte je dle vlastního uvážení. Okruh osob, kterým chcete poděkovat, není omezen, záleží pouze na Vás. Považuje se za neslušné, aby se oponent nebo jakýkoliv jiný čtenář k poděkování vyjadřoval, a když už se o tom někdo zmíní, tak jediné kladně. Vedoucí práce, kterému nepoděkujete, se neurazí.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 22. 5. 2021

.....

Jan Kamrla

OBSAH

1	ÚVOD.....	10
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	11
2.1	Co je mikrorobot.....	11
2.2	Mikrosvět.....	11
2.3	Efekty změny měřítka.....	12
2.3.1	Efekty změny měřítka na povrch a objem	12
2.3.2	Efekt změny měřítka na fyzické veličiny	13
3	TECHNOLOGIE V MIKROSVĚTĚ.....	14
4	OHYBY(FLEXURES).....	15
4.1	Jednoduché ohybové spoje	16
4.2	Poddajné mechanismy	16
5	AKČNÍ ČLENY	17
5.1	Zesílení pohybu akčních členů	18
5.2	Elektrostatické akční členy	20
5.3	Termické akční členy.....	21
5.4	Slitiny s tvarovou pamětí	23
5.5	Piezoelektrické akční členy	24
6	VÝROBNÍ TECHNOLOGIE	27
6.1	Materiály vhodné pro mikroobrábění	27
6.2	Povrchové mikroobrábění a litografické procesy	27
6.3	HARM(High-Aspect Ration micromachining)	29
6.3.1	LIGA.....	29
6.3.2	Laserové mikroobrábění	30
7	SENZORY	32
7.1	Elektromagnetické senzory.....	32
7.1.1	Indukční senzory.....	32
7.1.2	Kapacitní senzory	33
7.2	Opticko-posuvné senzory	33
7.2.1	Metody sledování paprsku.....	33
7.2.2	Senzory založené na stínové projekci.....	34
7.3	Sledování pohybu pomocí mikroskopů	35
7.3.1	Techniky rozpoznávání vzorů.....	35
8	ZÁVĚR	36
9	SEZNAM SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	37

1 ÚVOD

Miniaturizace zařízení má pro technologii velké využití. Miniaturizace ušetří materiál, cenu a rozměry. Z vývojem technologií mikroroboti už nejsou pouze součástí sci-fi literatury ale obor vědy, který jde rychle kupředu. Tyto zařízení představují velký potenciál v odvětvích vědy. Objevují se nové přístupy, technologie a průlomy které pomáhají vývoji mikrorobotů a blíží se doba kdy budou komerčně využíváni.

V cestě ale stojí mnoho výzev, protože není možné zmenšit současné stroje na úroveň mikrosvěta a očekávat jejich původní efektivnost v makrosvětě. Jsou tedy zapotřebí nová řešení.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Co je mikrorobot

“Mikrorobotika je technologická disciplína, která zahrnuje návrh systémů schopných fyzicky interagovat kontrolovaným a předepsaným způsobem s milimetrovými a submilimetrovými objekty.“[1]

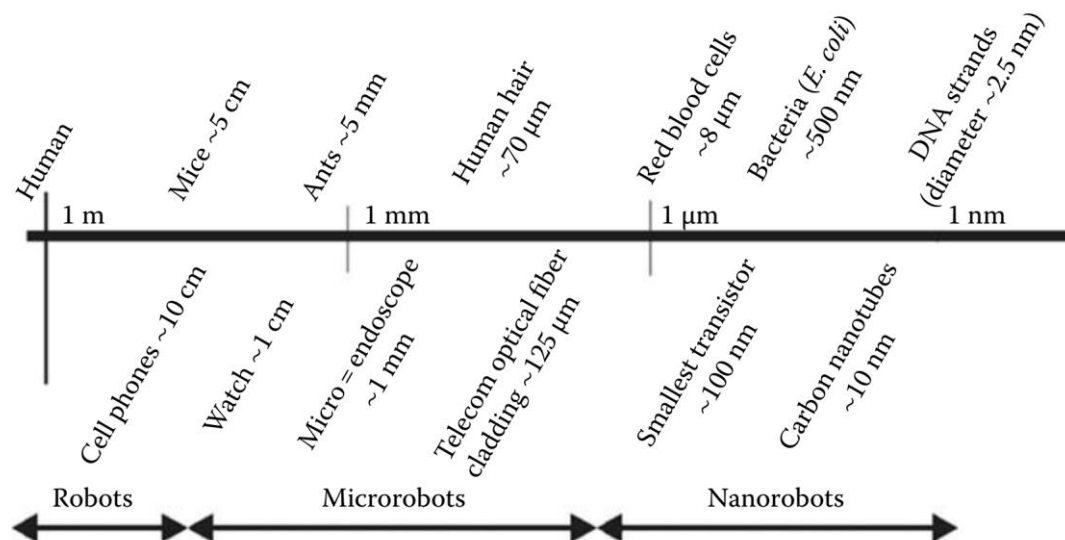
Mikrorobot samotný nemá pevně danou definici a nemusí být menší než milimetr. Za mikrorobota se považují roboti kteří pracují se submilimetrovými objekty nebo mají submilimetrové pracovní prostory.

Obecně jsou nejmenší mikroroboti menší než milimetr a ti největší mají velikost několik kubických centimetrů.

2.2 Mikrosvět

Mikrosvětem se rozumí velikosti od milimetru po mikron, neboli těžko viditelné objekty lidským okem. Toto označení nevzniklo díky vědeckému uvažování, ale kvůli rozlišování mezi mikrosvětem a makrosvětem.

Jako příklad, gravitace a setrvačnost mají malý vliv na objekty v mikrosvětě narozdíl od přílnavostních sil, které jsou zde slině zastoupeny. Dále malá velikost změní přenos tepla a dynamiku tekutin.



Obr. 2.1: Stupnice velikostí organismů a technologie [1]

2.3 Efekty změny měřítka

Změna měřítka na úroveň mikrosvěta má velký vliv na síly působící na systémy. Abychom zjistili jak se působení sil změní se změnou měřítka, zavedeme funkci popisující systém ve kterém jsou některé parametry bezrozměrné (w v rovnici níže), a jiné parametry závisí na geometrii (v):

$$(v_0, \dots, v_n, w_0, \dots, w_n) \rightarrow f(v_0, \dots, v_n, w_0, \dots, w_n) = y$$

Pokud zmenšíme všechny rozměry o faktor k , dostaneme:

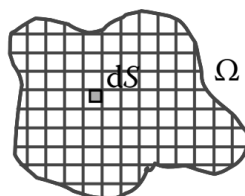
$$(kv_0, \dots, kv_n, w_0, \dots, w_n) \rightarrow f(v_0, \dots, v_n, w_0, \dots, w_n) = k^s y$$

Parametr s je měřítkový faktor.

Dle konvence pak použijeme měřítkový faktor L^s k popisu účinku změny měřítka dimenze na danou vlastnost.

2.3.1 Efekt změny měřítka na povrch a objem

Plochu lze vyjádřit pomocí dvojitého integrálního součtu přes danou oblast Ω .



Obr. 2.2: Integrovaná plocha [1]

Pokud zmenšíme integrační oblast, tak můžeme vidět že plocha se zmenší o měřítkový faktor L^2 .

$$f(x, y) \iint_{\Omega} dS = \iint_{\Omega} dx dy$$

$$f(kx, ky) \iint_{\Omega} dS = \iint_{\Omega} d(kx)d(ky) = k^2 \iint_{\Omega} dx dy = k^2 f(x, y)$$

Je tedy zřejmé že pokud by jsme použili stejnou metodu pro výpočet objemu, měřítkový faktor by se rovnal L^3 .

[1]

2.3.2 Efekt změny měřítka na silové působení

Stejnou metodou zjistíme efekty změny měřítka i pro jiné vlastnosti.

Tab. 2.1: Měřítkové faktory [1]

Vlastnost	Měřítkový faktor
Povrch	L^2
Objem	L^3
Hmotnost	L^3
Moment setrvačnosti	L^4
Pružná síla	L^1
Oscilační frekvence	$L^{-\frac{3}{2}}$
Elektrický odpor	L^{-1}
Indukčnost	L^5
Kapacita	L^1
Gravitační síla mezi objekty	L^3
Reynoldsovo číslo	L^3
Elektrostatická síla	L^2
Elektrostatický potenciál	L^2

U měřítkového faktoru musíme brát na vědomí:

- Použité fyzické zákony nemusí stále platit i na měřítku mikrosvěta
- V určitých případech může být závislost určitých proměnných na velikosti “skrytá“
- Technologie může představit další limitace

[1]

3 TECHNOLOGIE V MIKROSVĚTĚ

Malé rozměry s sebou přináší nové technologické obtíže. Výroba a montáž malých dílů se stává obtížnou, a díky velké přilnavosti povrchu v mikrosvětě, i nepraktickou. Změna měřítka vyžaduje technologie efektivní v mikrosvětě. Pro konstrukci mikrorobotů se konstruktéři začaly soustředit na existující technologie při návrhu mikrosystémů a jejich výrobě.

Miniaturizace není jenom o zmenšování existujících systémů. Miniaturizace spočívá v úplném přehodnocení struktury systémů pro použití v mikrosvětě. Při navrhování těchto systémů musíme respektovat zákony o změně měřítka.

Některé problémy které malá velikost způsobí jsou:

- Tření je větší než setrvačnost. Kapilární, elektrostatické a atomové síly a také postavení na mikroúrovni může být významné.
- Rozptyl tepla je větší než jeho akumulace a následné tepelné přenášení vlastnosti může být problémem nebo naopak velkou výhodou.
- Fluidní nebo hromadné transportní vlastnosti jsou nesmírně důležité. Drobné mezery jsou náchylné k zablokování, ale mohou naopak regulovat pohyb tekutin.
- Vlastnosti materiálu (Youngův modul, Poissonův poměr, struktura zrna) a mechanická teorie (zbytkové napětí, opotřebení a únava atd.) může záviset na velikosti.
- Balení a testování miniaturních zařízení není jednoduché. Některé senzory MEMS vyžadují přístup k životnímu prostředí i ochranu před jinými vnějšími vlivy. Testování není rychlé a je nákladné ve srovnání s konvenčními zařízeními integrovaných obvodů
- Cena - pro úspěch zařízení MEMS musí využít svou dávkovou výrobu IC zdroje a být vyráběny hromadně. Ovladače masového trhu proto musí být nalezeny generovat velkoobjemovou výrobu.

Kvůli rozsáhlosti tématu, tahle kapitola se zaměřuje spíše slouží k seznámení s některými technologiemi vhodnými pro použití a implementaci v mikrosvětě.

[1],[2],[5]

4 OHYBY (FLEXURES)

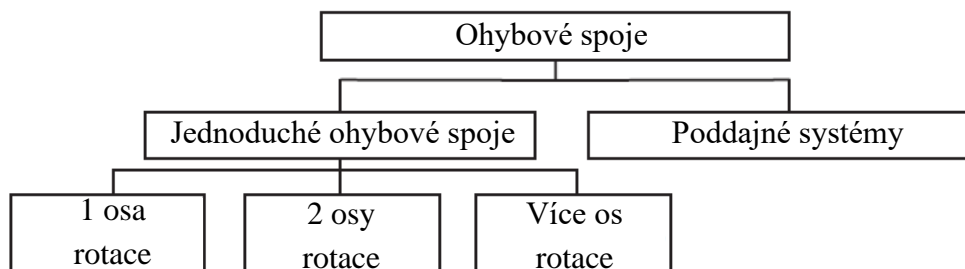


Obr. 4.1: Ohybový spoj [4]

Díky obtížné montáži malých dílů a velkým kontaktním silám jsou kloubové spoje v mikrosvětě neefektivní. Dosud nalezené řešení je založeno na využití elastických vlastností materiálů. Díky definované geometrii a řízení deformace můžeme omezit vzájemný pohyb dvou součástí a nahradit tak klasický kloubový spoj. I když rozsah pohybu je omezený, a spoj akumuluje energii díky pružnosti materiálu, tak má mnoho výhod.

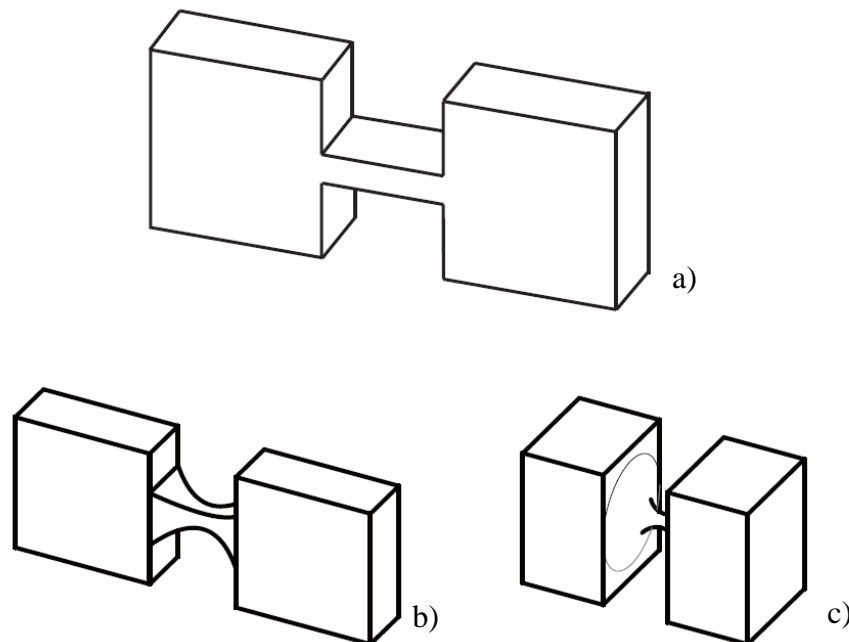
Výhody proti běžným kloubovým spojům:

- Menší cena
- Jednodušší výroba
- Žádné tření ve spoji
- Velikost spoje omezena pouze technologií výroby
- Možnost 3d tisku celého spoje nebo mechanismu
- Méně součástí v mechanismu
- Netřeba použití ložiska



Obr. 4.2: Rozdělení ohybů [6]

4.1 Jednoduché ohybové spoje

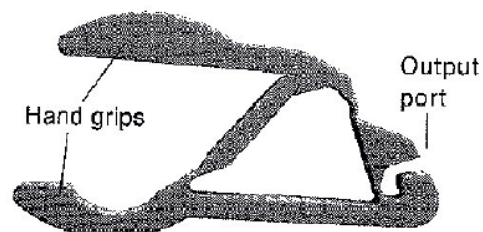


Obr. 4.3: Příklady jednoduché ohybových spojů: a) Jednoosý b) Dvouosý c) Víceosý [6]

Tyhle jednoduché ohybu jsou hojně využívány pro svoji jednoduchost a dostupnost a jsou to také základní prvky při tvorbě poddajných mechanismů. Pokud jsou vyrobeny ze speciálních materiálů, jako z paměťových slitin, mohou se stát akčními členy.

4.2 Poddajné mechanismy

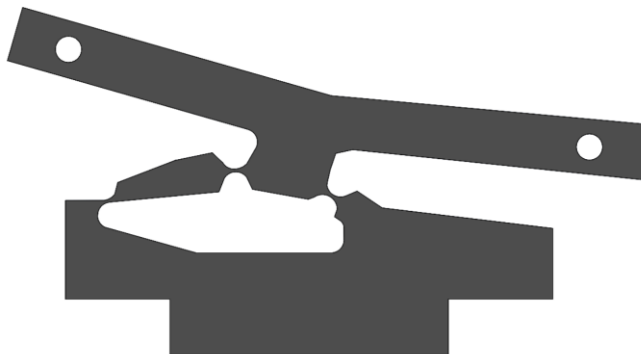
Poddajné mechanismy používají ohybové spoje jako panty. Hlavními výhodami jsou snížený počet součástek, často na jednu, levnější montáž a jednodušší výroba.



Obr. 4.4: Klešťový poddajný mechanismus [6]

Klešťový poddajný mechanismus na obrázku 4.2 může být vytisknuta na 3D tiskárně. Tloušťka těchto kleští může být libovolná a v případě hromadné výroby je možnost

vytisknout delší model a ten rozřezat na jednotlivé kusy bez problémů. Poddajné mechanismy mají překvapivě velkou odolnost proti cyklickému namáhání. Tato odolnost záleží na konstrukci mechanismu ale pro vypínač na Obr. 4.4 dokáže vydržet přes milion cyklů.



Obr. 4.5: Poddajný mechanismus vypínače [5]

[1],[6],[5],

5 AKČNÍ ČLENY

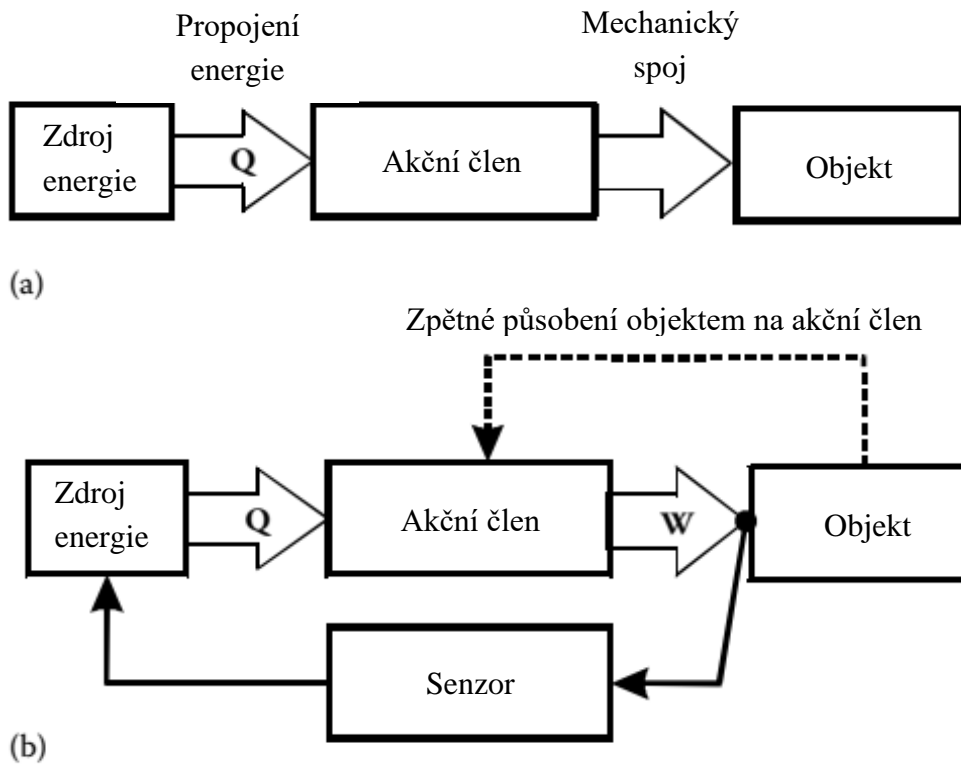
Akční členy (tj. aktuátory) jsou definovány jako zařízení, které přeměňují vstupní energii na mechanickou práci. V robotice se jako akční členy nejčastěji používají elektromotory.

Tahle kapitola si klade za úkol čtenáře seznámit s principy na kterých akční členy vhodné pro miniaturizaci pracují. Pak jsou uvedeny metody, jak tento princip je využíván v praxi pro vykonávání mechanické práce.

Je řada metody, kterými akční členy přeměňují vstupní energii na mechanickou práci. Pro efektivní použití v mikrorobotice, musí akční členy efektivně přeměňovat vstupní energii v mechanickou práci.

Princip, který přeměňuje vstupní energii na mechanickou práci, musí být schopen realizace v praxi. Jeho výroba a montáž musí být možná, a také musíme brát na vědomí jeho pracovní prostředí.

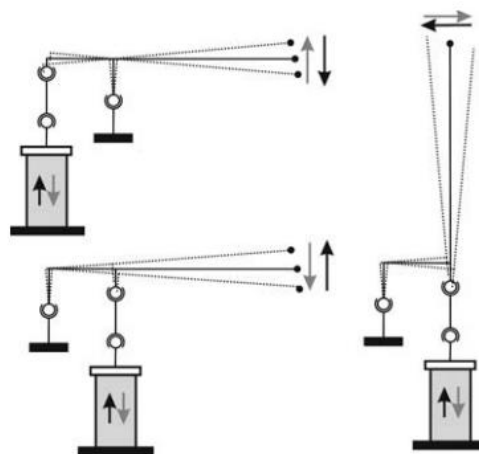
A naposledy musíme být schopní kontrolovat přeměnu vstupní energie na mechanickou práci. Pro stejné vstupní požadavky musí následovat identické výstupní reakce během jeho života (v ideálním případě).



Obr. 5.1 : Teoretické rozložení soustavy s akčním členem: (a) otevřený systém (b) uzavřený systém [1]

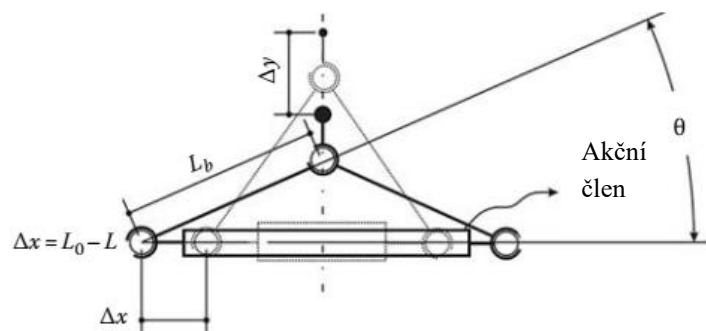
5.1 zesílení pohybu akčních členů

Některé akční členy mají velmi omezený rozsah pohybu. Tohle může být způsobeno jak konstrukcí nebo principem, na kterém aktuátor pracuje. Existují však jednoduché a intuitivní řešení jak pohyb zesílit, zvětšit nebo změnit.



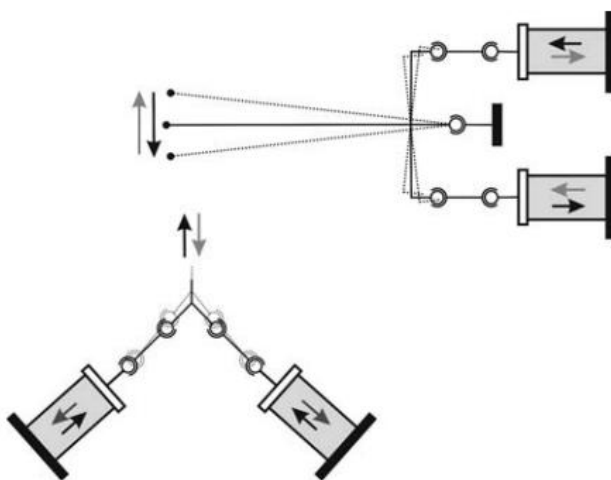
Obr. 5.2: Příklady pákových mechanismů [1]

Pravděpodobně starý jak samo lidstvo, pákový mechanismus dokáže pohyb zvětšit nebo zesílit. U velkého zvětšení pohybu musíme brát na vědomí, že výstupní pohyb páky je rotační.



Obr. 5.3: Dvouprutový systém [1]

Pokud celková délka akčního členu změní, nastane dislokace ramen na něm napojených v kolmém směru.



Obr. 5.4: Tah-Tlak uspořádání [1]

Kombinace několika uspořádaných akčních členů. Oba akční členy pracují zaráz buď proti sobě nebo v tandemu pro zesílení pohybu.

5.2 Elektrostatické akční členy

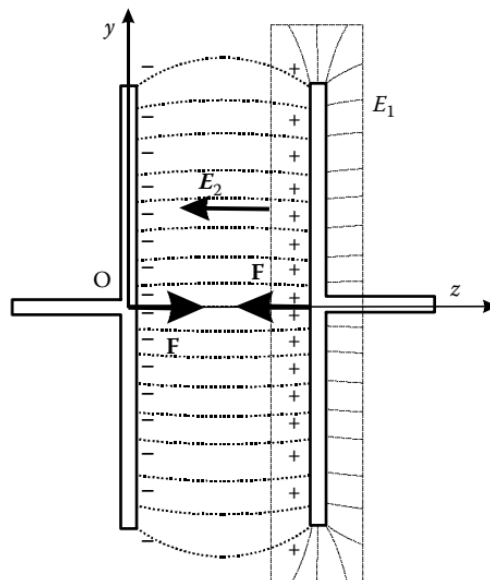
Elektrostatické akční členy využívají sílu vznikající z rozdílu elektrického potenciálu.

Dvě desky nabité opačnými náboji na sebe navzájem působí určitou silou.

Tato síla závisí na velikosti plochy desek, velikosti napětí v plátech a na jejich vzdálenosti od sebe.

Požadavky na tyto akční členy jsou:

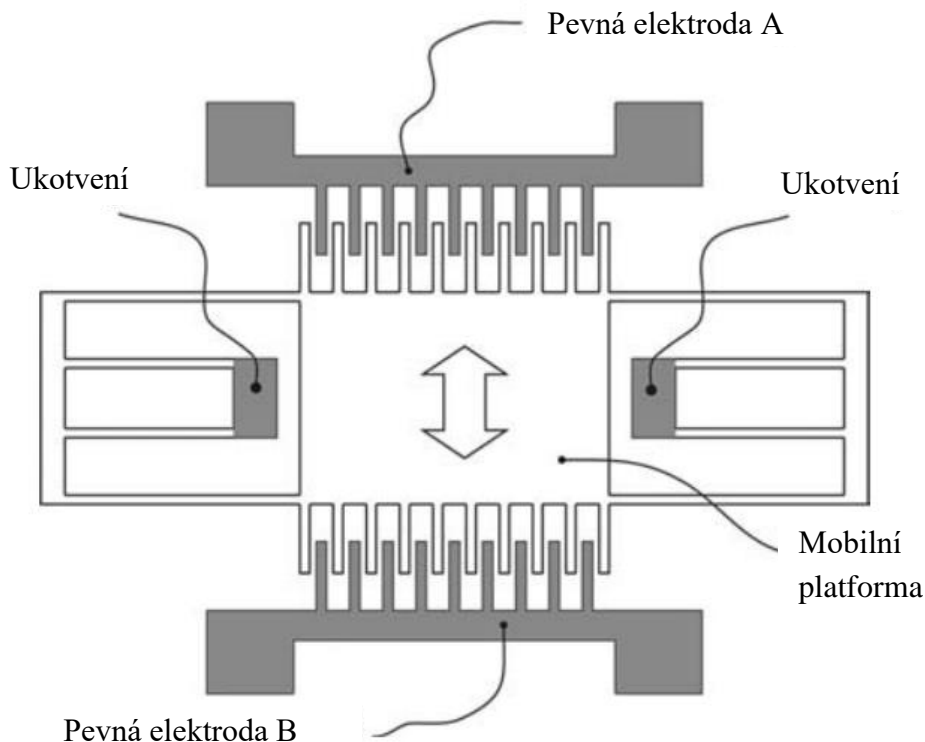
- velikost nabitých ploch musí být dost velká aby vzniklá síla byla znatelná
- desky musí být dost tuhé aby se nezohnuly pod napětím
- rekční síla musí bránit před dotykem ploch
- napětí musí zůstat pod dielektrickým rozpadem média mezi kapacitními deskami



Obr. 5.5: Ilustrace principu elektrostatických aktuátorů [1]

Ilustrace síly vznikající z přítomnosti dvou opačně nabitých desek. Elektrostatické pole E_1 je pole, když se uvažuje jedna deska. Elektrostatické pole E_2 je pole, když se uvažují obě desky.

Pro zvětšení elektrostatické síly se elektrody vyrábí ve tvaru hřebenů. Tímto způsobem se maximalizuje plocha a při tom se nezvětší velikost zařízení.

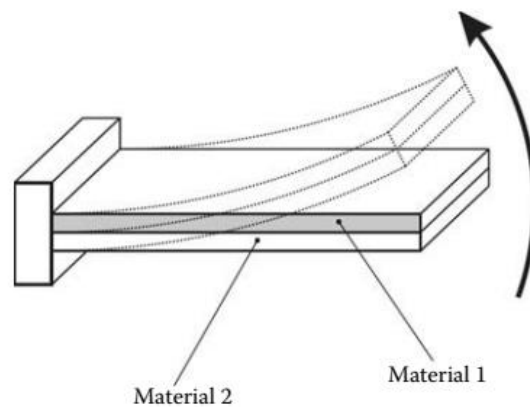


Obr. 5.6: Zjednodušené schéma elektrostatického aktuátoru se hřebenovými elektrodami [1]

Pevné elektrody vyvolávají kolmou sílu vyvolávající pohyb mobilní platformy. Směr pohybu je veden pomocí listové pružiny ve směru šipek.

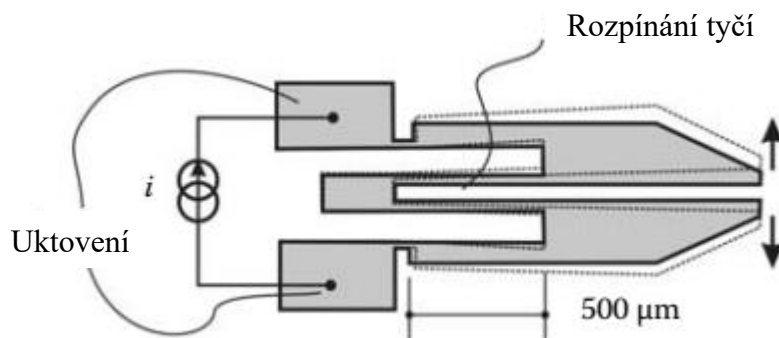
5.3 Termické akční členy

Tyto aktuátory využívají vlastnosti materiálu zvětšovat svoji velikost při jeho zahřívání. Zvětšení rozměru je však i pro měřítko mikrosvěta minimální. Vezmeme-li například 1mm dlouhý hliníkový cylindr a zvýšíme jeho teplotu o 100 K, neprodlouží se o víc jak 1 μm . Je tedy zapotřebí tento pohyb zvětšit. Ke zvětšení pohybu můžeme použít metody uvedené v 3.1.1 nebo pomocí bimorfního uspořádání.



Obr. 5.7: Bimorfní (Dvouvrstvé) uspořádání [1]

Dva různé materiály s jinými vlastnostmi. Reagují jinak na změny prostředí a způsobují vychýlení mimo osu. Při zahřátí se prut nejenom prodlouží, ale zvětší se i jeho vychýlení a tedy zvětší se jeho celkový pohyb.

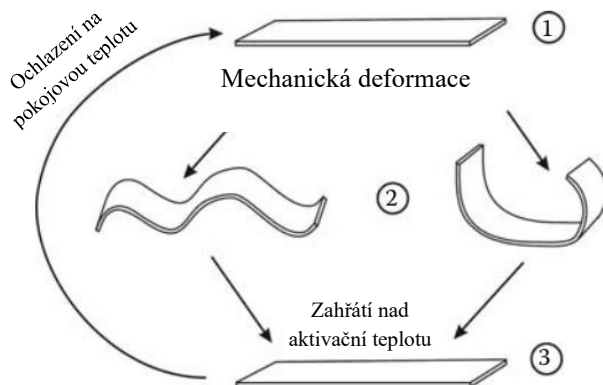


Obr. 5.8: Mikro-chytač[1]

Proud dostatečně vysoký procházející chytačem způsobí, že se delší pruhy rozšíří více než ty kratší. Vnější ramena se používají jako závěsy k vedení pohybu čelistí.

5.4 Slitiny s tvarovou pamětí

Slitina s tvarovou pamětí je druh slitiny se schopností samovolně změnit svůj tvar pokud ji zahřejeme na teplotu v určitém rozsahu.



Obr. 5.9: Ilustrace efektu tvarové paměti [1]

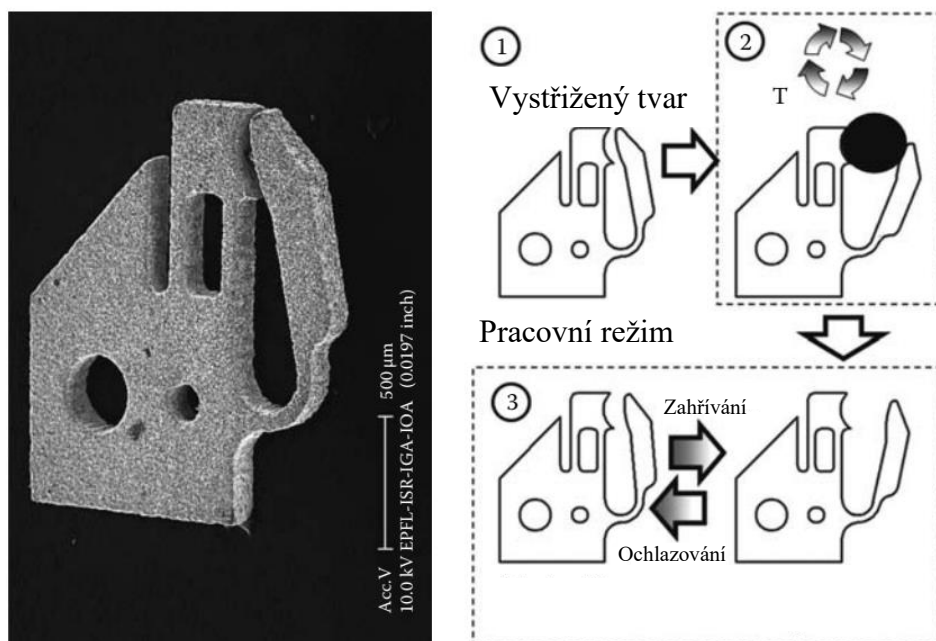
Obrázek výše ukazuje princip, na kterém slitiny s tvarovou pamětí pracují. Ve stavu 1 je původní tvar slitiny, který byl ve stavu 2 mechanicky deformován. Po zahřátí nad určitou teplotu získá svůj původní tvar, v tomto případě deska.

Z mechanického hlediska se materiál chová velmi podobně jako tvárný materiál, který se plasticky deformuje. Při zahřívání se materiál nemění dokud teplota nedosáhne určité hranice, kdy materiál začne získávat svůj původní tvar neohledně na to jak moc byl plasticky deformován. Při jeho ochlazení se nic zvláštního nestane a materiál si ponechává svůj původní tvar. Nitinol, nejčastěji používaná paměťová slitina, má rozsah teplot přeměny na původní tvar mezi -50°C do 110°C záleží na jejich poměru.

Materiálová únava paměťových slitin nastává především u chlazení akčního členu, který je stále pod zátěží. Je to z toho důvodu že se krystaly přeskupí tak, aby deformační napětí bylo minimální. To vede k tomu že zahřátý materiál z paměťové slitiny má jiný tvar než ochlazený.

Aby se prodloužila životnost akčních členů, tak se pomocí pružiny nebo závaží dosáhne toho, aby byly neustále pod napětím. Při jejich ochlazování se tedy vrátí do stavu aby deformační napětí pružiny, nebo závaží, bylo co nejmenší. Tímto způsobem můžeme tedy ovládat do jakého tvaru se vrátí.

Můžeme taky využít těchto deformací a toho že materiál má 2 tvary, každý při jiné teplotě. Pokud chceme tohoto docílit, musíme cyklicky ochlazovat a ohřívat materiál pod napětím. Tento proces je nazýván “trénovací proces”.



Obr. 5.10: Monolitický chytač z paměťové slitiny [1]

1. Zde je znázorněn laserem vyřezaný tvar
2. Trénovací proces pod napětím
3. Ukázka dvou stavů aktuátoru za různých teplot

[1],[2]

5.5 Piezoelektrické akční členy

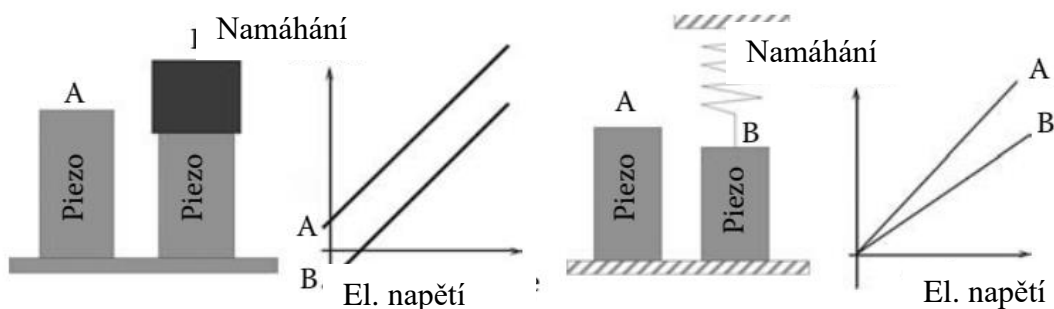
Tyto akční členy fungují na principu piezoelektrického jevu. Při deformaci určitých krystalů uvnitř nich vzniká elektrický proud, jehož velikost je přímo úměrná deformaci krystalu. Tomuto se říká přímý piezoelektrický jev.

Pokud na krystal s piezoelektrickými vlastnostmi začne působit elektrické pole, jeho vlastnosti a tvar se změní. Tento jev je známý jako “konverzní piezoelektrický jev“. I když tato změna je malá, je znatelná a můžeme ji využít.

Piezoelektrické materiály mají své limity. Olovo-zirconiium-titaničitan (PZT) je nejčastěji používaný materiál s piezoelektrickým jevem kvůli své dostupnosti a vlastnostem. Pracovní podmínky PZT jsou:

- Elektrické pole o intenzitě 100-500 V/mm
- Typické zatížení 2,5- 35 MPa
- A pracovní teploty mezi 80 – 150 °C

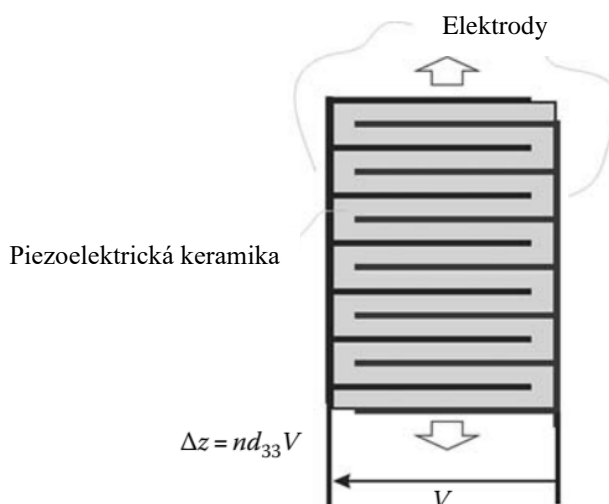
Pohyb těchto akčních členů je navíc omezen. Materiály s piezoelektrickými vlastnostmi jsou obvykle keramiky (PZT) a materiálu strukturně podobných křemenným krystalům. Pro zvětšení efektivity jsou často tyto aktuátory uměle zatíženy výrobcem proti směru jejich pracovnímu pohybu.



Obr. 5.11: Umělé zatěžování piezoelektrických akčních člen; [1]

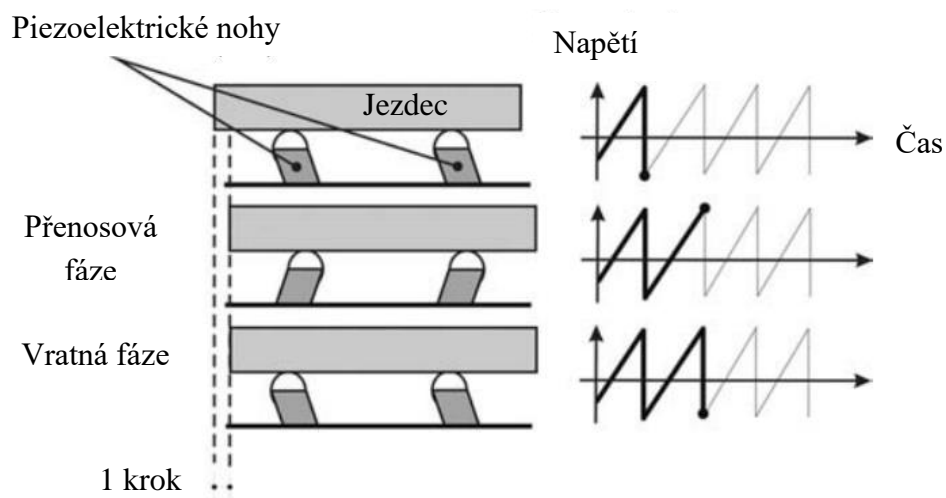
Pomocí umělého zatěžování jsme schopni zmenšit intenzitu elektrického pole potřebného k vykonání mechanické práce, snížit namáhání akčního členu a zvýšit pohyb.

Dalším způsobem jak zvýšit pohyb je skládání několika vrstev akuatorů na sebe. Tímto způsobem se celkový pohyb vynásobí počtem na sebe naskládaných vrstev. Běžnou konfigurací je struktura vzájemně propojených elektrod znázorněných na obr. :x.



Obr. 5.12: Piezoelektrický štosový aktuátor [1]

[1]



Obr. 5.13: Piezoelektrický klouzavý aktuátor [1]

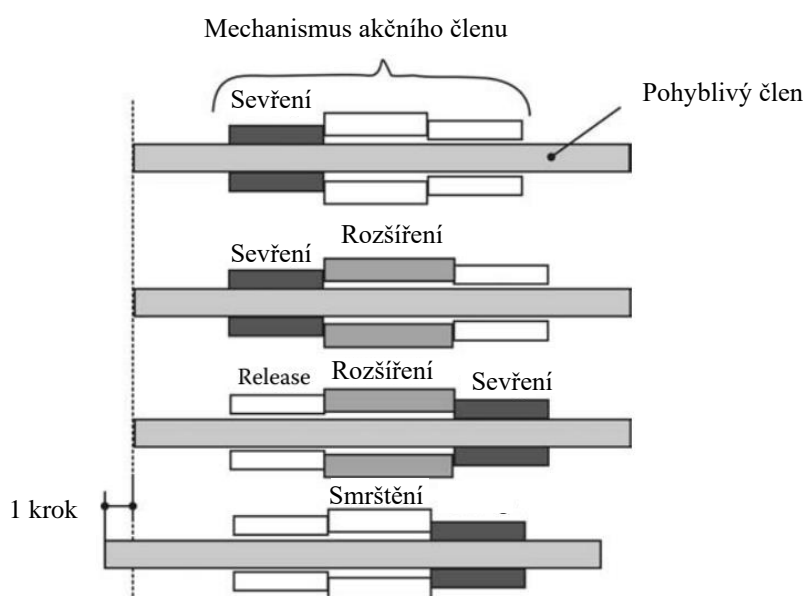
Klouzavý akčního členu závisí na momentu setrvačnosti a tření. Jeho princip spočívá v dvou pohybech, přenosové fázi a vratné fázi.

Přenosová fáze se skládá s pomalého navyšování napětí a tak pomalého pohybu nohou, aby přenášený objekt nesklouzl.

Vratná fáze spočívá v rychlé změny napětí, kdy přenášení objekt sklouzne po nohách díky svému momentu setrvačnosti.

Skládáním těchto pohybů za sebou jsme schopni tímto způsobem posunovat předměty po rovné ploše jakýmkoliv směrem nebo předměty rotovat. Toto by ale vyžadoval komplikovanější systém než je znázorněn na obr. :x.

Další konstrukce piezoelektrického akčního členu je inspirována pohybem housenek.



Obr. 5.14: Pracovní princip housenkového akčního členu [1]

Toto řešení se skládá ze dvou trubek. Dvě trubky, na obr. x trubky vlevo a vpravo, mají úkol svorek. Prostřední trubka dokáže zvětšit svoji délku podél mobilního prvku, který je v tomto případě tyč. Kombinací svírání krajních trubek a rozšiřování prostřední, můžeme manipulovat tyč procházející skrz ně.

[1],[7]

6 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

Hlavní důvod pro velký zájem o mikrotechnologie byly výrobní procesy integrovaných obvodů. S pomocí těchto výrobních procesů vznikla technologie MEMS (Mikro-elektro-mechanické systémy), což je procesní technologie používána k vyrábění drobných součástí s velikostmi od několik mikrometrů do milimetrů. Pomocí těchto procesů jsme schopni vyrábět rychle, efektivně a levně mikro-součástky ve velkých množstvích. Tato vyrobená zařízení (nebo systémy) mají schopnost snímat, ovládat a uvádět do pohybu předměty v mikro měřítku a generovat efekty v makro měřítku.

[2]

6.1 Materiály vhodné pro mikroobrábění

Křemík - Nejběžněji používaný materiál v mikroobrábění a technologie s ním pracující jsou nejspolehlivější. Je to velmi spolehlivý materiál protože dobře odolává opotřebení. Křemík může být také nejenom jako konstrukční materiál ale i integrovaný do integrovaných vodičů.

Polymery - Stále častěji používaný materiál. Polymery jsou levné, flexibilní a někdy i biokompatibilní.

Kovy -V dávkové výrobě obvykle nanášeny jako vrstvy pomocí rozprašovacích a litografických metod.

[7]

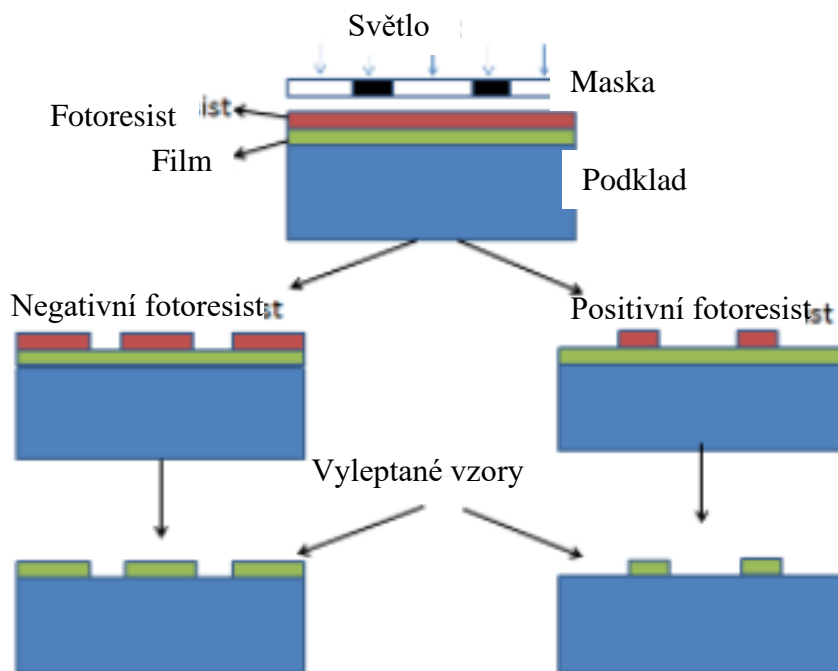
6.2 Povrchové mikroobrábění a litografické procesy

Povrchové obrábění a litografické procesy je kombinace řady technologií. Jejich princip spočívá v kombinaci nanášení vrstev materiálů na povrch a jejich strategické odebrání. Tyhle metody byly převzaty od hromadné výroby integrovaných obvodů. Nanášené materiály mohou být kovy, polovodiče, oxidy nebo polymery.

Způsoby nanášení materiálů:

- Rozprašování: Skládá se z přenosu daného materiálu obsaženého v cíleném objektu na substrát, bombardováním cíleného objektu ionty. Jedná se o poměrně pomalý proces a vrstva se nanáší pomalou rychlostí několika nanometrů za minutu.
- Vypařování: Skládá se z odpařování materiálu obsaženého v nádobě, aby se znovu uložil ve formě filmu na substrát.
- Chemické vypařování: Používá prekurzor a katalyzátor k ukládání materiálu na substrát disociací molekul.
- Elektroformování: Založeno na elektrolýze. Materiál se přenáší z elektrody na vodivý substrát elektrolytickými reakcemi.
- Oxidací: Oxidační vrstvy lze pěstovat přímo na substrátech. Některé materiály mají tendenci přirozeně oxidovat. Rychlost oxidace závisí na teplotě. Zahřátím lze přesně regulovat růst oxidační vrstvy.

[2]



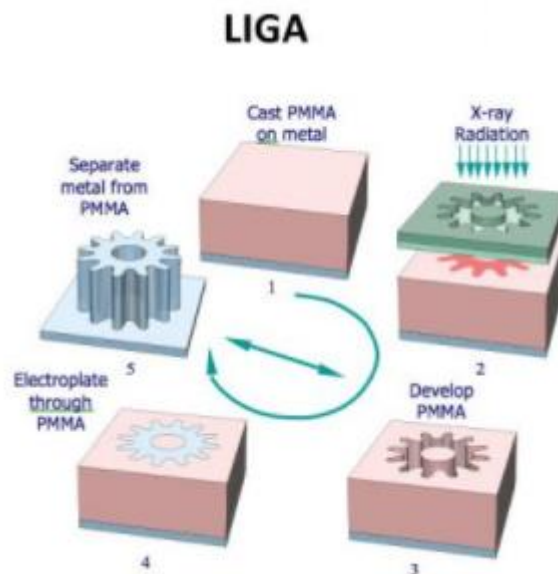
Obr. 6.2: Příklady jednoduchého vzorkovacího procesu [3]

6.3 HARM (High-Aspect Ratio Micromachining)

Vysoko poměrové mikroobrábění zahrnuje technologie povrchového mikroobrábění s kombinací s jinými technologiemi jako vstřikování nebo galvanické pokovování. Je to jedna z nejatraktivnějších technologií pro replikaci mikrostruktur ve vysokém poměru výkon / cena. HARM má poměr hloubka/tloušťka nad 10 u nejjemněji obrobených prvků.

6.3.1 LIGA (Litography, Electroplating, Molding)

Výrobní proces používá X-ray sychrotronní záření pro odhalení tlustého acrylického rezistu (PMMA) pod litografickou maskou. Odkryté oblasti jsou chemicky rozpuštěny, a v oblastech kde je materiál odstraněn dojde k galvanoplastice kovu (kov “vyroste“ z podkladu). Tímto dostaneme nástroj pro následující tvorbu odlitků. Metodou LIGA jsme schopni vytvořit jemné mikrostruktury do výšky až 1000 μm .



Obr. 6.3: Krokový postup technologie LIGA [4]

Problémy s implementací pak nastávají u montáže malých dílů do systémů. Montáž těchto malých výrobků do systému může prodražit cenu i 100 násobek ceny vyrobených součástek. Z tohoto důvodu se snažíme při návrhu systému o co největší omezení velkého počtu součástí. [2]

6.3.2 Laserové mikroobrábění

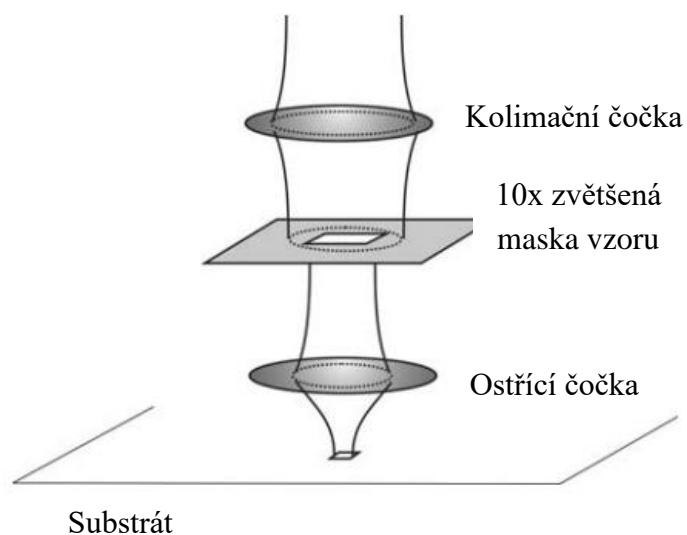
Principem je použití zaostřeného laserového paprsku k odstranění materiálu z konkrétních míst. Jak reaguje materiál na laserový paprsek závisí na druhu materiálu a na vlastnostech paprsku. V praxi nastávají 3 případy:

1. Dojde k tání materiálu kvůli absorbovanému teplu
2. Nastane ablace, což znamená že materiál se přímo vypaří
3. Ve struktuře materiálu jsou vyvolány strukturální modifikace, které materiál dělají více citlivé na působení určitých chemikáliím

Při používání laserové obrábění využíváme velkého rozptylu tepla u malých rozměrů. Navíc máme možnost využít pulsujícího laserového paprsku pro lepší tepelný rozptyl.

Tab. 6.2: Shrnutí vlastností laserů pro mikroobrábění [1]

Typ laseru	Typické charakteristiky	Typické aplikace	Materiály
UV- laser	Použití masky, pulsní laser, malá hloubka penetrace	Ablace tenkých vrstev V organický materiálech	Polymery, organické materiály
Infráčervené a CO2 lasery	Pulsní nebo nepřetržitý	Řezání	Kovy, keramiky, sklo
Femtosekundový laser	Velmi krátké pulsy	Řezání, podpovrchové obrábění	Kovy, polymer, keramika, sklo



Obr. 6.4: Obrábění UV- laserem [1]

7 SENZORY

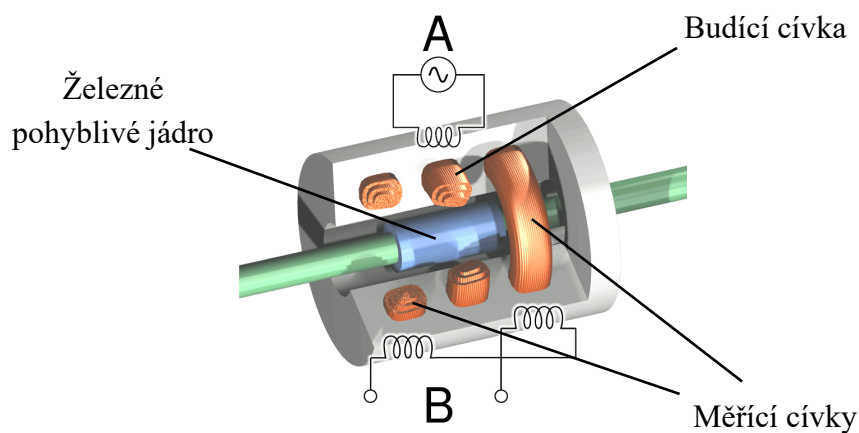
Senzor je zařízení používané k měření dané fyzické veličiny. Typicky tak provádí pomocí elektrického signálu, který je úměrný měřené fyzické veličině. Tento elektrický signál je tvořen transdukčním mechanismem. Ve zkratce by se senzor dal popsat také jako opak akčního členu. Senzory se používají k získání široké škály fyzikálních parametrů z prostředí. V mikrorobotice se primárně zajímáme o informace o poloze nebo síle.

Požadavky na tyto senzory jsou:

- Ze signálu senzoru rozpoznat co nejmenší posun nebo změnu měřené veličiny.
- Musí být co nejjednodušší senzor integrovat do systému.
- Jeho dynamická odezva, to znamená, jaké frekvence signálu jsou zjištělné.
- Jeho imunita vůči poruchám zapříčiněným prostředím. Teplota nebo vlhkost může ovlivnit jeho funkčnost.
- Vztah mezi fyzickými daty a snímacím signálem. Měřená fyzická veličina může být jednoduše nebo komplexně zpracována pro získání snímacího signálu. Tohle zpracování může také ovlivnit citlivost v celém rozsahu měření.

7.1 Elektromagnetické senzory

7.1.1 Indukční senzory



Obr. 7.1: LVDT senzor [9]

Pohyblivé jádro se pohybuje v magnetické poli. Budící cívka poskytuje budící signál a pomocí rozdílu v signálech měřících cívek dokážeme určit polohu pohyblivého jádra. [9]

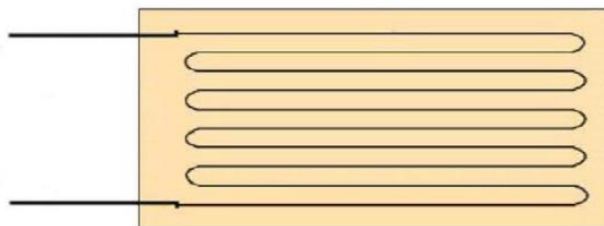
7.1.2 Kapacitní senzory

Fungují na podobném principu jako elektrostatické akční členy. Dvě opačně nabitě plochy poblíž sebe na sebe působí silami závislých na jejich vzájemné poloze. Měřením změn těchto sil jsme schopni odvodit změnu polohy těchto desek vůči sobě.

Nejjednodušší kapacitní snímač tedy spočívá v použití dvou elektrod směřujících k sobě, přičemž jedna elektroda je nehybná, a druhá je připojena k hybné části podobně jak na Obr. 5.5 v kapitole 5.

7.1.3 Odporové snímače

Namáhání vodivého materiálu změní jeho odporové vlastnosti. Tímhle způsobem jsme schopni měřit deformaci měřeného elementu. Pro lepší měření se snažíme zvětšit odpor měřeného elementu vedoucí k lepším měřicím vlastnostem. Tohoto dosáhneme v praxi skládáním vodiče pro zvětšení jeho délky Obr.7.2.



Obr. 7.2: Tenzometr [8]

7.2 Opticko-posuvné senzory

Stávají se běžněji používány díky miniaturizaci světelných zdrojů a optickým součástkám integrovaným do systémů. Existuje řada snímacích metod které mohou být zařazeny do dvou kategorií.

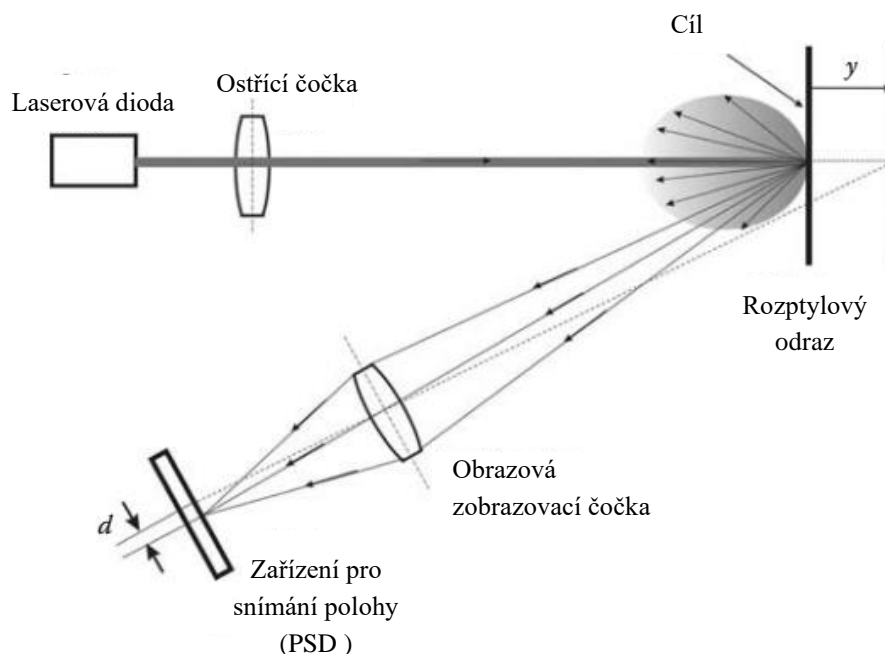
První zahrnuje opticko-posuvné senzory, které sledují posun bodu paprsku vyplývající z posunutí měřeného objektu.

Druhý je založen na modulaci intenzity stacionárního světelného paprsku buď pomocí stínovacích efektů, nebo interferencí vyplývajících z pohybu objektu.

7.2.1 Metoda sledování paprsku

Běžným prvkem v metodách sledování paprsku je použití kolimovaného světelného paprsku (například laserového paprsku), který zasáhne pohybující se cíl. Odražené světlo nebo obraz místa na cíli se poté použije k posouzení toho, jak se cíl pohybuje. Druhý krok

vyžaduje použití zařízení pro snímání polohy (PSD), která dokážou určit, kterým směrem se bod nebo jeho obraz pohybuje. Odraz světla může být rozptylový nebo přímý.

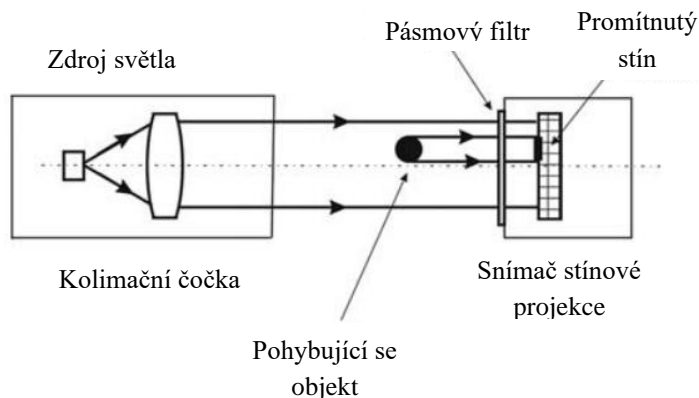


Obr.7.3: Uspořádání laserové triangulace s rozptylovým odrazem[1]

Zaostřený laserový paprsek dopadá na měřený pohyblivý cíl. Paprsek se po odrazu rozptýlí. Pomocí obrazové zobrazovací čočky se obraz promítne na PSD. Pokud měřený cíl změní polohu jsme schopni změřit vzdálenost a směr.

7.2.2 Senzory založené na stínové projekci

Zdroj laserového světla je kolimován tak, že na obrazový snímač je promítán téměř rovnoběžný paprsek. Jakmile objekt přeruší paprsek, vytvoří na obrazu CCD stín. Sledování stínu poskytuje měření posunutí měřeného objektu. Tento jednoduchý princip lze miniaturizovat například pomocí integrované optické technologie a miniaturizovaných fotodetektorů. Tento princip je na Obr. 7.3.



Obr.7.4: Princip funkce senzorů založené na stínové projekci [1]

7.3 Sledování pohybu pomocí mikroskopů

Asi nejvíc intuitivním způsobem měření polohy robotů je s pomocí obrazu a ne z naměřených dat ze senzorů. Tento způsob sledování pohybu nám dovoluje v reálném čase sledovat objekt a jeho interakce z okolím. Zpracování obrazu a konkrétněji metody rozpoznávání vzorů se poté používají k lokalizaci a sledování pohybu objektů zachycených zobrazovacím zařízením.

Mezi výhody této metody patří:

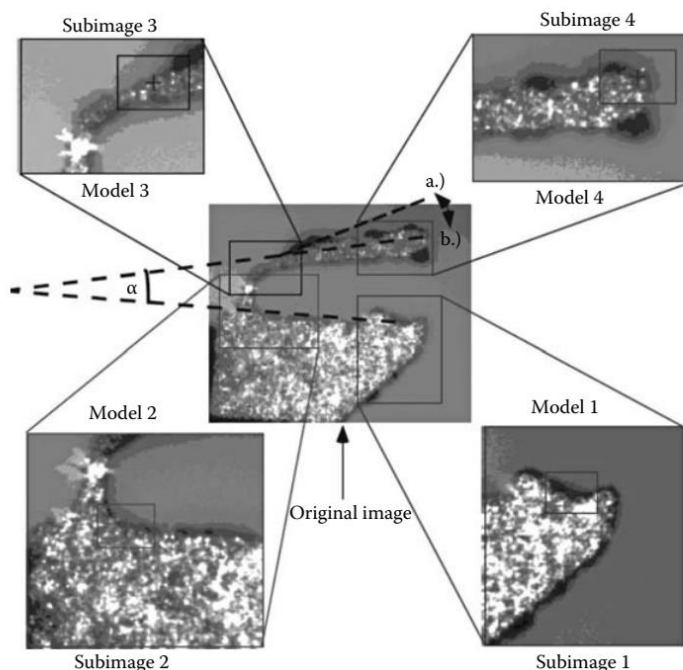
- Tahle metoda může být použita pro řadu pohybujících objektů
- Zařízení monitorující pohyb není součástí pohyblivého zařízení
- Může být měřeno více parametrů zároveň jako pozice a orientace
- Můžeme sledovat několik objektů současně
- Možnost změny sledování objektů jako například při montáži

[1]

7.3.1 Techniky rozpoznávání vzorů

Sledování pohybu objektů pod mikroskopem závisí na technikách zpracování obrazu abychom byly schopni identifikovat sledovaný objekt v zachyceném snímku. Snímky jsou v podstatě matice pixelů s informacemi o intenzitě světla dopadajícího na čočku. Pokud chceme tedy sledovat specifický objekt musíme ho nějak vybrat.

Jedna z metod jsou "oblasti zájmu" (ROI), kdy uživatel vybere jaké oblasti chce sledovat. Software pak bude s pomocí algoritmů vědět jaké oblasti zaostřit a sledovat.



Obr.7.5: Ilustrace konceptu ROI (Regions of interest) [1]

8 ZÁVĚR

V kapitole 2 jsme byly seznámeny s pojmy mikrosvět, mikrorobot a co zahrnuje návrh systémů v mikrosvětě. V kapitole 3 byla přiblížena miniaturizace a co obnáší a poté byly představeny s řadou technologií a jejich různorodostí.

Mikrorobotika je ale v ranné fázi. Současné konstrukce mikrorobotů se soustředí na zjednodušení akčních členů, senzorů a kinematiky. Díky efektu změny měřítka, není prostor pro komplikované systémy. Jakýkoliv rotační člen nepřípadá v úvahu a zatím neexistuje vhodný zdroj energie pro mikroroboty.

Technologie představené v této práci jsou existující technologie, které zjednodušují jejich protějšky v makrosvětě. Jsou už použity v praxi a navíc se s nimi stále experimentuje a může být pro ně byt nalezeno nové využití. Ne jenom v mikrosvětě ale i v makrosvětě či nanosvětě.

Protože je mikrorobotika v ranné fázi, je těžké předvídat jakým směrem tenhle vědní obor půjde. Většinu současných prototypů mikrorobotů má podobnou strukturu k jejich velkým bratrům, robotům. Oba mají akční členy, senzory, kinematiku a zdroj energie. Je možné, že se mikrorobotika bude vyvíjet jiným směrem. Například, že zdroj energie a mechanické práce bude magnetické pole, a mikrorobot bude jen konečný efektor.

Do výzkumu mikrotechnologie a mikrorobotiky budou investovány v budoucnosti větší peníze. Jejich použití je velmi široké a aplikovatelné do jiných věd.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BELLOARD, Yves. *Microrobotics: Methods and Applications*. CRC Press; 1st edition (November 4, 2009). ISBN-13: 978-1420061956
- [2] PRIME FARADAY TECHNOLOGY WATCH [online], An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems) 2002 [cit. 21.4.2021]. ISBN: 1-84402-020-7 Dostupné z:
https://www.academia.edu/5077471/Prime_Faraday_Technology_Watch_ISBN_1_84402_020_7_An_Introduction_to_MEMS_An_Introduction_to_MEMS_Micro_electromechanical_Systems_PRIME_Faraday_Partnership_PRIME_Faraday_Partnership?auto=download
- [3] *electricaltechnology.org* [online]. 2018 [cit. 2021-05-19]. What is MEMS – Microelectromechanical Systems technology? Dostupné z:
<https://www.electricaltechnology.org/2018/01/mems-microelectromechanical-systems-technology.html>
- [4] Flexures. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 31 August 2004 , last modified on 15 January 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z :
<https://en.wikipedia.org/wiki/Flexure>
- [5] Compliant Mechanism. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 31 August 2004 , last modified on 10 May 2021 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z :
https://en.wikipedia.org/wiki/Compliant_mechanism
- [6] MENG, Qiaoling. A Design Method for Flexure-Based Compliant Mechanisms on the Basis of Stiffness and Stress Characteristics. Boloňa, 2012. Disertační práce. Boloňská univerzita. Vedoucí práce Vincenzo Parenti Castelli
- [7] PENELLA, Jordi Brufau. Smart materials for microrobotics. Motion Control and Power Harvesting. Barcelona, 2005. Disertační práce. Barcelonská univerzita. Vedoucí práce Manel Puig i Vidal
- [8] Tenzometr. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 31 August 2004 , last modified on 25 July 2020 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z :
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Tenzometr>
- [9] *omega.com* [online]. 2018 [cit. 2021-05-19]. What is Liner Variable Diferential Transformer? Dostupné z:
<https://www.omega.com/en-us/resources/lvdt-sensors>

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Stupnice velikostí organizmů a technologie [1].....	11
Obr. 2.2 Integrovaná plocha [1]	12
Obr. 4.1 Ohybový spoj [4]	15
Obr. 4.2 Rozdělení ohybů [7].....	15
Obr. 4.3 Příklady jednoduché ohybových spojů [7].....	16
Obr. 4.4 Klešťový poddajný mechanismus [7]	16
Obr. 4.5 Poddajný mechanismus vypínače [5].....	17
Obr. 5.1 Teoretické rozložení soustavy s akčním členem [1]	18
Obr. 5.2 Příklady pákových mechanismů [1].....	18
Obr. 5.3: Dvouprutový systém [1]	19
Obr. 5.4: Tah-Tlak uspořádání [1]	19
Obr. 5.5: Ilustrace principu elektrostatických aktuátorů [1]	20
Obr. 5.6 Zjednodušené schéma elektrostatického aktuátoru [1]	21
Obr. 5.7 Bimorfni (Dvouvrstvé) uspořádání [1]	22
Obr. 5.8 Mikro-chytač [1]	22
Obr. 5.9 Ilustrace efektu tvarové paměti [1]	23
Obr. 5.10 Monolitický chytač z paměťové slitiny [1].....	24
Obr. 5.11 Umělé zatěžování piezoelektrických akčních členů [1].....	25
Obr. 5.12 Piezoelektrický štosový aktuátor	25
Obr. 5.13 Piezoelektrický klouzavý aktuátor [1].....	26
Obr. 5.14 Pracovní princip housenkového akčního členu [1]	26
Obr. 6.1 Příklady jednoduchého vzorkovacího procesu [3].....	29
Obr. 6.2 Krokový postup technologie LIGA [4].....	30
Obr. 6.3 Obrábění UV- laserem [1].....	31
Obr. 7.1 LVDT senzor [9].....	32
Obr. 7.2 Tenzometr [9].....	33
Obr. 7.3 Uspořádání laserové triangulace s rozptylovým odrazem [1].....	34
Obr. 7.4 Princip funkce senzorů založené na stínové projekci [1].....	34
Obr. 7.5 Ilustrace konceptu ROI (Regions of interest) [1].....	35

SEZNAM TABULEK

Obr. 2.1 Měřítkové faktory [1]	13
Obr. 6.1 Vlastnosti laserů pro mikroobrábění [1]	23

SEZNAM SYMBOLŮ

<i>v</i> ...	geometricky závislé parametry	[/]
<i>w</i> ...	bezrozměrné parametry	[/]
<i>k</i> ...	měřítkový faktor	[/]
<i>L</i> ...	změna měřítka	[/]
<i>s</i> ...	efekt změny měřítka	[/]