



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

REŠERŠNÍ STUDIE ZAMĚŘENÁ NA MĚŘENÍ A ŘÍZENÍ PŘÍTLAČNÉ SÍLY ROBOTICKÝCH KONCOVÝCH ČLENŮ

LITERATURE RETRIEVAL OF ROBOTIC GRIPING SYSTEM FORCE CONTROL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN FOUSEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR KREJČÍ, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Fousek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

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:

Rešeršní studie zaměřená na měření a řízení přítláčné síly robotických koncových členů

v anglickém jazyce:

Literature Retrieval of Robotic Gripping System Force Kontrol

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řízení přítláčné síly je z hlediska bezpečného uchopení objektu nezbytné. Proto je tedy nutné na základě informací ze senzoru kontaktní síly řídit přítlak robotického koncového členu tak, aby nedošlo k poškození uchopeného objektu.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešeršní studii v oblasti řízení přítlaku robotických chapadel.

Seznam odborné literatury:

- [1] Prof.Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc. , Prof.Ing. Jaromír Slavík, CSc.: Mechanika Těles-dynamika, PC-DIR, skriptum VUT Brno (1997)
- [2] Doc.Ing. Michal Valášek, DrSc. a kolektiv: Mechatronika, Vydavatelství CVUT (1995)
- [3] Prof.Ing. Přemysl Janíček,DrSc., Prof.Ing. Emanuel Ondráček, CSc.: Řešení problému modelováním, skriptum VUT Brno (1998)

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Krejčí, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21.11.2011

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr.h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je zhotovení rešerše na měření a přítlačné síly robotických koncových členů. Velká část práce je zaměřena na přehled používaných senzorů pro snímání působící síly. Druhá část se zabývá návrhem konstrukce senzoru konečku prstů pro robotickou ruku.

Abstract

The aim of this work is making research on the measurement and control of downforce of robotic members. Much of the work is focused on an overview of the sensors for sensing the applied force. The second part deals with the design for fingertip sensor robotic hand.

Klíčová slova

Taktilní snímač, dotykový senzor, působící síla, elastomer, FSR, optické vlákno, tenzometr

Keywords

Tactile sensor, touch sensor, applied force, elastomer, FSR, optical fiber, strain gauge

Bibliografická citace

FOUSEK, J. *Rešeršní studie zaměřená na měření a řízení přítláčné síly robotických koncových členů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 42s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Krejčí, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářského práce s použitím literatury a dalších uvedených zdrojů na konci práce.

Jan Fousek, Brno, 2012

.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Krejčímu, Ph.D za cenné připomínky a rady v průběhu vypracovávání této práce.

Obsah

1	Úvod	12
2	Základní rozdělení robotických čidel tlaku (síly)	13
2.1	Mechanická čidla	13
2.2	Senzor s elastomery	13
2.2.1	S vodivým elastomerem.....	13
2.2.2	Senzor typu FSR	14
2.3	Kapacitní senzor	17
2.3.1	Senzor se změnou účinné plochy kondenzátorů	17
2.3.2	Senzor se změnou vzdálenosti mezi deskami	18
2.4	Magnetický senzor	18
2.5	Optický senzor	19
2.5.1	Senzor s mikroohybem vlákna.....	20
2.5.2	Senzory s optickými vlákny se vzájemnou optickou vazbou	21
2.5.3	Senzory se změnou útlumu	22
2.5.4	Senzory se změnou přechodu a odrazu světla	22
2.5.5	Optický senzor s Braggovou mřížkou.	23
2.6	Senzory z tenzometry.....	25
2.6.1	Odporový tenzometr	25
2.6.2	Polovodičový tenzometr	26
2.6.3	Zapojení tenzometrů	28
2.6.4	Rozdělení tenzometrů podle měřené deformace.....	28
2.7	Piezoelektrický senzor	29
2.7.1	Senzor s PZK 850	29
3	Konstrukční návrh.....	31
3.1	Cíl a uvedení do problematiky.....	31
3.2	Rozbor.....	31
3.3	Konstrukce prstu	31
3.4	Princip funkce	32
3.5	Zjištění velikosti a směru působící síly.....	32
3.6	Vlastnosti elastomerického senzoru.....	32

3.7	Kontrola funkce	33
4	Závěr	36
5	Seznam použité literatury	37
6	Seznam použitých zkratek a symbolů	40
7	Seznam obrázků	41
8	Seznam příloh.....	42

1 Úvod

Jeden ze základních lidských smyslů je hmat. Hmat není jen o vnímání tlaku, ale i o vnímání tepla, chladu, bolesti a dalších informací. Základem a asi nejdůležitějším faktorem je vnímání tlaku, proto se vývoj zaměřuje na snímání tlaku. V robotice je snaha dosáhnout co nejlepšího hmatového senzoru, který by dokázal nahradit lidský prst. Hmatové senzory mají velkou škálu využití. Robotická chapadla se používají v různých odvětvích průmyslu (např. montážní linky).

Dále jsou nedílnou součástí robotů, které se čím dál více podobají lidem. Velký rozvoj nastal díky hmatovým sensorům v protézách rukou. Firma BeBonic vyrábí nejmodernější protézy, pomocí kterých se postižený člověk může vrátit do normálního života. Na klavír pacienti zatím nedokážou hrát, ale i toto je jen otázkou času. Pomocí naprogramování se nastaví rychlost a výkon protézy a tím bez problému může pacient uchopit vejce, ale i rozmáčknout plechovku [3]. Ještě dál ale došel švédský tým, který dokázal na základě 40 senzorů na protéze, propojených s lidskými nervy, vrátit částečně člověku hmat. Takže pacient nejenže vysílá signály pro řízení protézy, ale dostával zpětné informace ze senzorů do mozku. Pacient v konečkách prstů cítí při uchopení předmětu kontakt. [4]

Tato bakalářská práce se zaměřuje na přehled používaných senzorů a jejich principů fungování. Problém senzorů není jen o zjištění velikosti působící síly, ale i o jejím směru působení. Proto bude část práce zaměřena na konstrukční návrh konečku prstu robotické ruky.

2 Základní rozdělení robotických čidel tlaku (síly)

2.1 Mechanická čidla

Nejjednodušší forma dotykového senzoru je takový, kde je použita síla působící na běžný mechanický mikrosplínač tvořící binární dotykový senzor. Další postupy jsou založeny na mechanickém pohybu aktivující sekundární zařízení, jako je potenciometr nebo převodník posuvu. [2]

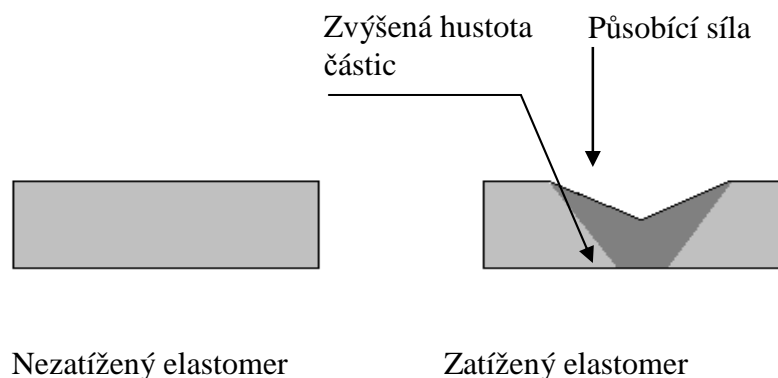
2.2 Senzor s elastomery

2.2.1 S vodivým elastomerem

Základem je vyhovující materiál s definovanou charakteristikou odporu při působení síly. Základním principem tohoto typu snímače je měření odporu vodivého elastomeru nebo pěny mezi dvěma body. Elastomer je silikonová pryž, v jejímž obsahu jsou částičky grafitu nebo železného prachu. [1]

Citováno z [1]: „Poskytují kvantitativní a kvalitativní informace o předmětu, který je v kontaktu se senzorem.“

Na obr.1 je vidět, jak vlivem působící síly se mění hustota elastomeru.



Obr.1 Vliv působící síly na elastomer. Převzato z [2].

Jestliže se měření odporu provádí mezi protilehlými povrchy elastomeru, musí být horní kontakty provedeny pomocí flexibilního tištěného obvodu umožňující pohyb podle působící síly. Měření z jedné strany lze dosáhnout pomocí teček a kroužků uspořádaných na podkladu. [2]

Senzor s použitím elastomery CS 57-7 RSC (obr.2) umožňuje spojitě měření velikosti tlaku.



Obr.2 Schéma senzoru s použitím vodivého elastomeru. Převzato z [5].

Vodivé elastomerové nebo pěnové snímače jsou relativně jednoduché, ale mají řadu chyb:

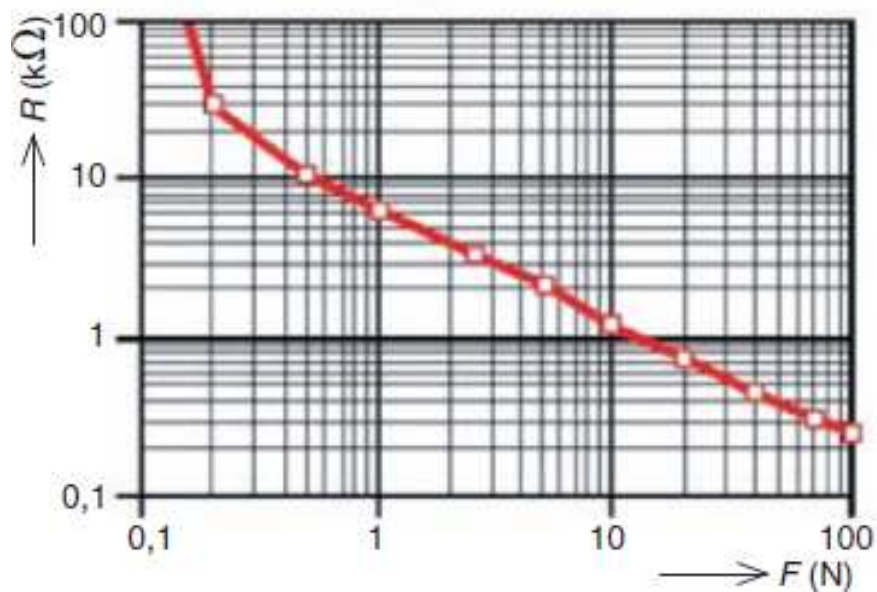
- Elastomer má dlouhou nelineární časovou konstantu. Časová konstanta se při působení síly liší od časové konstanty po sejmutí působící síly.
- Charakteristika silové odolnosti elastomerických senzorů je vysoce nelineární, a tak vyžadují použití algoritmů zpracování signálu.
- Cyklickým namáháním je elastomer trvale deformován a únava vede k trvalé deformaci senzoru.[2]

2.2.2 Senzor typu FSR

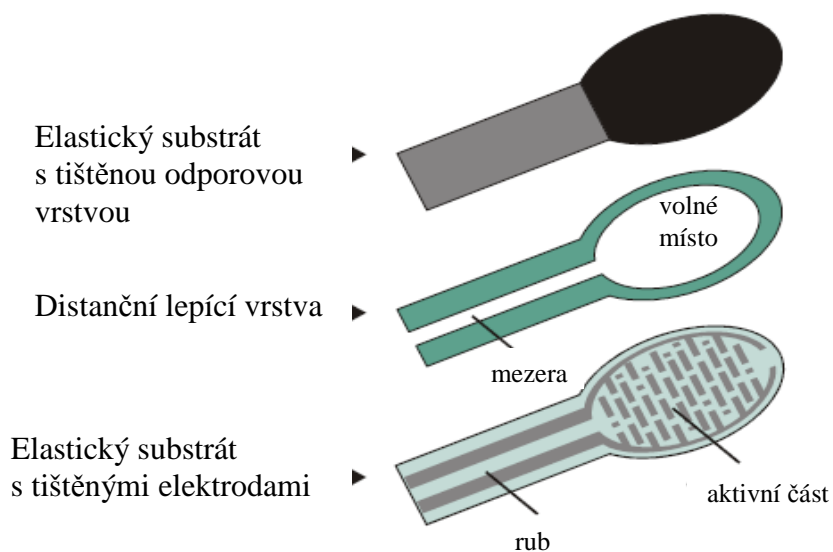
Základem FSR (Force Sensing Resistor) senzoru je polymerní materiál, který vykazuje pokles odporu při zvýšení působící síly na plochu. Senzor se skládá ze tří základních vrstev které jsou znázorněny na obr.4.[1]

Citováno z [1]: „Základem senzoru je odporová vrstva vyrobená technikou tlustých vodivých polymerových vrstev (Polymer Thick Film – PTF) a tvořená elektricky vodivými a nevodivými částicemi o velmi malých rozměrech. Při působení síly na tuto vrstvu se částice vzájemně dotýkají, a vytvářejí tak vodivé dráhy, čímž se odpor vrstvy zmenšuje.“

Závislost odporu na síle FSR senzoru je znázorněn na obr.3 , lineární část lze použít pro měření zatížení.

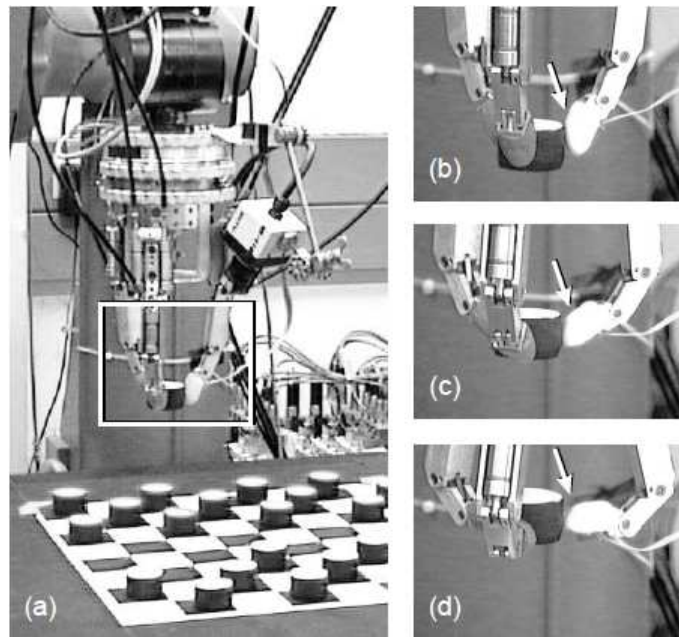


Obr.3 Graf závislosti odporu na působící na FSR senzor. Převzato z [2].

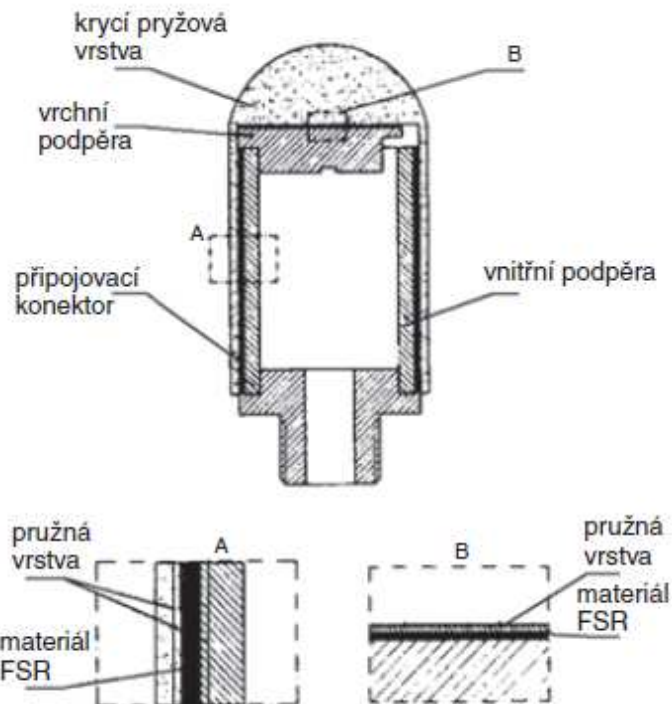


Obr.4 Konstrukce FSR senzoru. Převzato z [6].

Na obr.5 je použití FSR senzoru v praxi. Byl použit do konstrukce tříprstého robotu, vyrobeného v německém leteckém ústavu DLR [21]. Spodní část se skládá z tříprstého chapadla poháněného hydraulickým systémem. Každý prst má tři stupně volnosti. Kamera připevněná na zápěstí slouží pro plánování úchopových pohybů. Jakmile se zjistí kontakt z objektem, vizuální kontrola nestačí a je třeba provést kontrolu síly pomocí senzorů. Na obr.5 b-d jsou vidět různé kontaktní plochy při uchopování předmětu a na obr.6 je konstrukce konce prstu. [7]



Obr.5 Tříprstý robot. Převzato z [7].



Obr.6 Konstrukce FSR použitého u tříprstého robotu. Převzato z [1].

2.3 Kapacitní senzor

Kapacitní dotykový senzor závisí na použitém způsobu použití. Buď se mění vzdálenost mezi deskami nebo účinný povrch kondenzátoru. V takovém případě jsou dvě vodivé desky senzoru odděleny dielektrikem, který je použit jako elastomer. [2]

Citováno z [1]: „U kapacitních senzorů se nejčastěji využívá změna společných ploch elektrod, deskových nebo častěji ve tvaru souosých válců. Měří se vlastně deformace pružného členu se známými mechanickými vlastnostmi při působení síly. Pružný člen je obvykle vložen mezi elektrody. Jindy může být jedna elektroda fixovaná a druhá spojená s pružným členem.“

Měření změny kapacity

Je mnoho způsobů měření. Nejpoužívanější metody jsou:

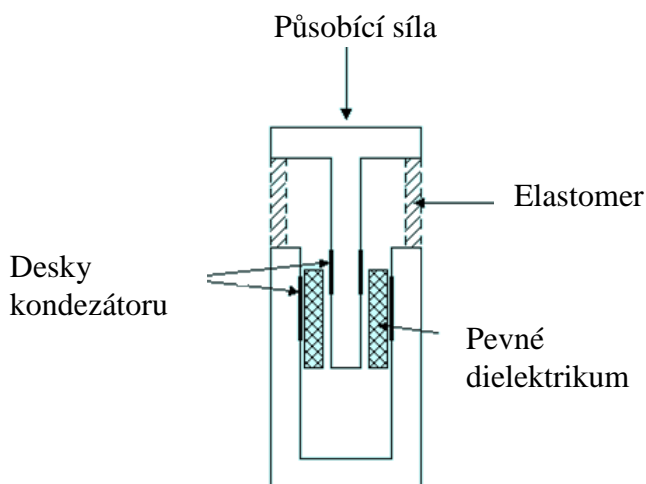
-použití přesného zdroje proudu

-princip LC obvodu, kde senzor je jeho součástí a měří se frekvence LC obvodu. Chceme-li maximalizovat změnu kapacity, je vhodnější použít vysokou dielektrickou permitivitu v koaxiálním kondenzátorovém provedení. U tohoto typu snímače je absolutní kapacita nižší, protože jejich velikost je omezena prostorovým rozlišením.[2]

Problémem s kapacitními senzory může nastat v případě, že jsou v těsné blízkosti chapadla, které jsou uzemněny, což vede k bludným proudům. To může být kompenzováno dobrým obvodovým rozvržením a mechanickou konstrukcí dotykového senzoru. Je možné vyrobit paralelní desky kondenzátoru na jednom křemíkovém plátku, to poskytuje velmi kompaktní snímací zařízení.[2]

2.3.1 Senzor se změnou účinné plochy kondenzátorů

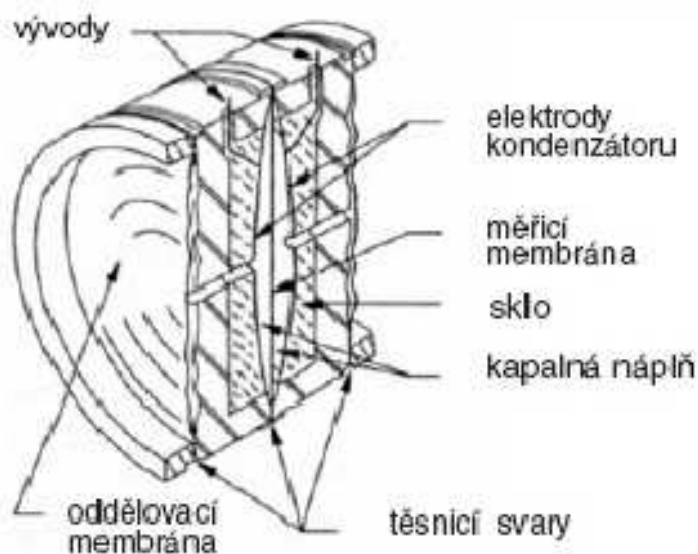
Na obr.7 ukazuje průřez kapacitního dotykového senzoru, ve kterém se pohybuje jedna deska kondenzátoru a druhá je pevná. Použitím vysoce dielektrického polymeru maximalizuje změnu kapacity. (polyvinyliden fluorid). Z hlediska použití je koaxiální konstrukce lepší, protože jeho kapacita má větší nárůst při působící síle, než paralelní desková konstrukce. [2]



Obr.7 Průřez kapacitního dotykového senzoru. Převzato z [2].

2.3.2 Senzor se změnou vzdálenosti mezi deskami

Tento typ senzoru je uveden na obr.8. Senzor se skládá ze tří elektrod. Dvě elektrody jsou pevné na stranách štěrbině a jedna pohyblivá membrána (elektroda) mezi nimi. Tím vzniknou dva snímací kondenzátory. Jako dielektrikum se používá buď vzduch nebo kapalná náplň. Při působení síly se vychýlí membrána a tím se změní vzdálenost mezi elektrodami. Při změně vzdálenosti se změní velikost dielektrika a výsledná kapacita senzoru. [8]



Obr.8 Senzor se změnou vzdálenosti desek. Převzato z [8].

2.4 Magnetický senzor

Existují více metod návrhu taktilního senzoru založeném na magnetické přenosu. První metoda je, že díky působení síly na malý magnet se změní hustota toku v místě měření. Měření toku lze provést buď za pomoci Hallova jevu nebo pomocí magnetorezistivním zařízením. [2]

Druhá metoda je založena na materiálu, který je použit v jádru transformátoru nebo induktoru. Materiál musí být magnetoelastický, který se pod tlakem deformuje a způsobuje magnetickou vazbu mezi vinutím transformátoru, a nebo cívky mění indukčnost. Magnetorezistivní nebo magnetoelastické senzor má řadu výhod:

- vysoká citlivost
- velký dynamický rozsah
- žádné měřitelné hystereze
- lineární odezva
- fyzická odolnost

Jestliže malý permanentní magnet je držen nad detekčním zařízením, tak na základě změn toku, způsobené působící silou pod magnetem, mohou být změny detekovány a měřeny. Intenzita pole, takto inverzního stavu, vede k nelineární reakci, která lze snadno linearizovat při dalším zpracování informací.[2]

Příklad snímače

Citováno z [8] „Indukčnostní diferenční snímač je uspořádán podobně jako kapacitní snímač (obr.8). Místo pevných snímacích elektrod jsou v tělese převodníku zabudovány snímací cívky. Magnetický obvod se uzavírá přes jádro cívky a vzduchovou mezeru (indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým obvodem). Měřicí membrána je zhotovena buď z feromagnetického materiálu a tvoří část magnetického obvodu, případně je ve své aktivní části opatřena kouskem feromagnetického materiálu, nebo pohybuje jádrem cívky pomocí táhla. S výchylkou membrány se mění poměr indukčností obou cívek zapojených ve střídavém mostu a tím dochází k jeho rozvážení. Používají se i konstrukce s jedinou snímací cívkou.“

2.5 Optický senzor

Hlavní částí optického senzoru je optické vlákno. Základní části optického senzoru jsou zobrazeny na obr.9. Procházející světlo přes vlákno je modulováno vnějšími vlivy.

Optické vláknové senzory rozdělujeme podle typu použitých optických vláken na :

1. Jednovidové senzory využívají jednobodového optického vlákna a koherentního zdroje záření. Jednovidové senzory využívají většinou jako snímací prvek optické vlákno. Snímaná veličina se vyhodnocuje prostřednictvím změny různých vlastností optického vlákna, např. optické dráhy, indexu lomu, rozdílu indexu lomu jádra a pláště optického vlákna, rozdílu v optické dráze dvou navzájem ortogonálně polarizovaných vidů.
2. Mnohovidové senzory využívají mnohovidového optického vlákna a nekoherentního zdroje záření. Mnohovidové senzory využívají většinou odvod části intenzity světla z optického vlákna, případně změnu tlumení optického vlákna, způsobující modulaci intenzity optického signálu.“ Citováno z [9]

Výhody optických senzorů:

- odolnost proti vnějšímu elektromagnetickému rušení
- přenos informací mezi objekty s rozdílným elektrickým potenciálem
- velká vzdálenost mezi optickým zdrojem a přijímačem
- malá hmotnost a objem

Zdrojem světla pro optické vlákna se používají laser, laserová dioda, LED.

Změny světla, vyvolané vnější působící silou na senzor, jsou měřeny detektorem. Nejčastějším detektorem je fotodioda.

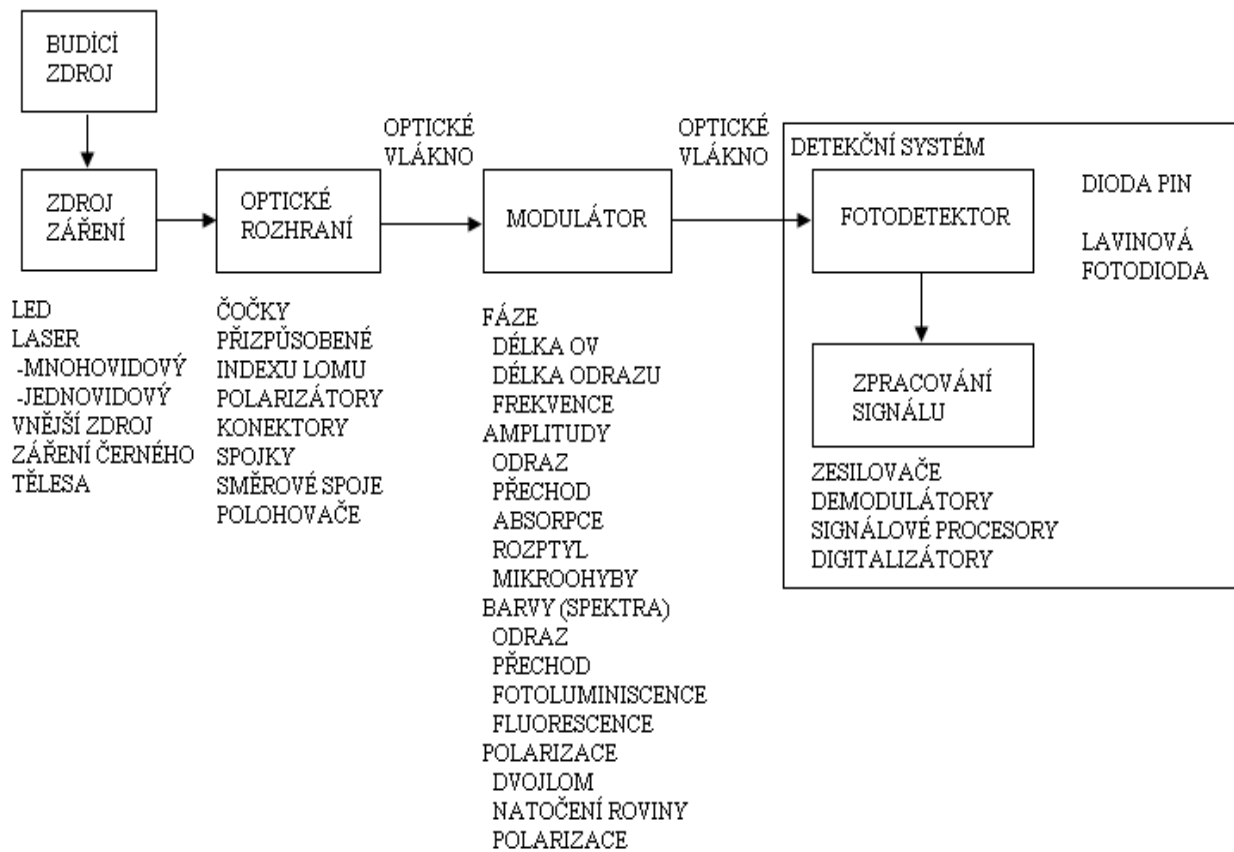
Vnějšími vlivy lze měnit u procházejícího světla :

- amplitudu
- fázi
- polarizaci
- spektrální vlastnosti světla

Nejčastěji se používá změna amplitudy procházejícího světla.

Změnu amplitudy lze dosáhnout [1] :

- změnou okrajových podmínek šířeného světla (mikroohyb)
- změnou vzájemné optické vazby
- změnou tlumení
- změnou přechodu a odrazu světla



Obr.9 Základní konstrukční prvky optického vláknového senzoru. Převzato z [9].

2.5.1 Senzor s mikroohybem vlákna

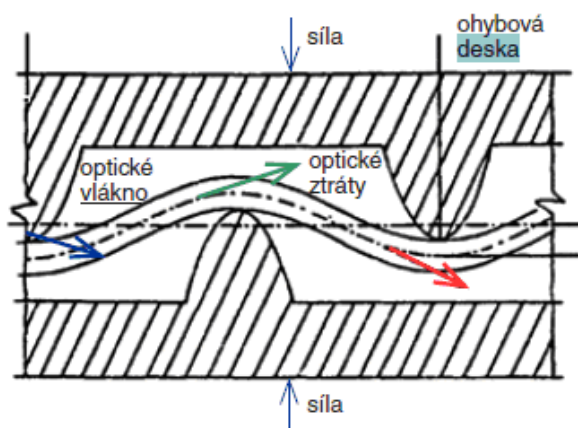
Princip, senzorů s mikroohybem vlákna, je založen na změně podmínky úplného odrazu. Změnu lze dosáhnout změnou:

- zakřivením vlákna
- poměrů indexu lomu.

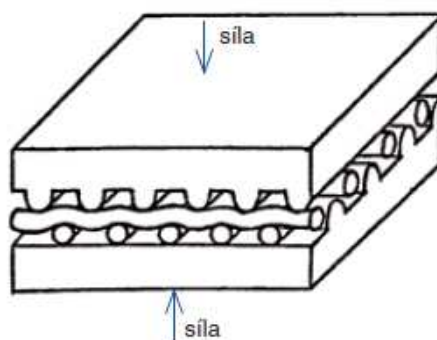
Citováno z [1]: „Při ohýbání optického vlákna pod kritický poloměr nastává porušení podmínky pro vlny vyšších řádů a dochází k průniku světla do pláště optického vlákna. Tyto vlny se mohou dále šířit podél optického vlákna jako plášťové vlny nebo mohou uniknout do okolního prostředí (obr10). Tím klesá intenzita světla šířícího se jádrem optického vlákna.”

Na obr.11 je maticový taktilní snímač uspořádaný ze senzorů s mikroohybem optického vlákna. Velkou nevýhodou tohoto snímače je, že je zapotřebí hodně zdrojů a detektorů světla.

Citováno z [1]: „Vždy smí svítit jen jeden zdroj a snímat jen jeden detektor (smí být aktivován jen jeden rádek a jen jeden sloupec).”



Obr.10 Řez optickým vláknovým senzorem s mikroohybem. Převzato z [1].



Obr.11 Maticový taktilní snímač. Převzato z [2].

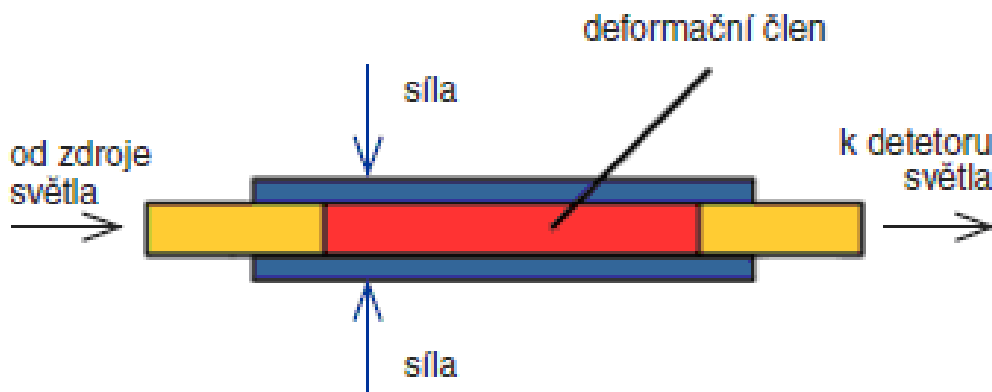
2.5.2 Senzory s optickými vlákny se vzájemnou optickou vazbou

Princip je založen na vzájemném kontaktu optických vláken. V místě styku je plášť odstraněn a zbudou jen jádra, které se při působení vnější síly ovlivňují. Při působení vnější síly se předá část energie z prvního optického vlákna do druhého. Na

první optické vlákno je připojen světelný zdroj a na druhé vlákno je připojen detektor. [1]

2.5.3 Senzory se změnou útlumu

U tohoto typu senzoru se snímá rozdíl intenzity světla mezi vstupem a výstupem optického vlákna. Při působení síly na optické vlákno se mění koeficient tlumení optického vlákna a výsledná intenzita světla je menší. Místo deformace optického vlákna se dá využít tlumení optického prostředí, které je umístěno mezi vstupním a výstupním optickým vláknem. Optické vlákno je zde jen k vedení světla. Senzor s využitím tlumení optického prostředí je zobrazen na obr.12. Nejčastěji se tento typ senzoru využívá k měření teploty, kde je optický materiál závislý na teplotě. [1,9]



Obr.12 Senzor se změnou útlumu. Převzato z [2].

2.5.4 Senzory se změnou přechodu a odrazu světla

Citováno z [9]: „Změnu intenzity světla přenášeného optickým vláknem je možno dosáhnout nejen změnou vlastního homogenního optického materiálu, ale i přerušením optického vlákna a ovlivňováním vazby mezi jeho konci. To je možné uskutečnit buď vzájemným pohybem konců vstupního nebo výstupního optického vlákna, nebo pohybem clony, optických mřížek.“

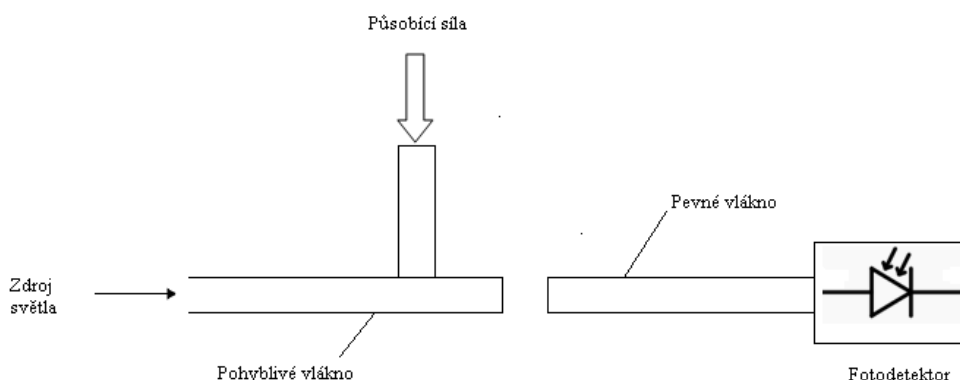
Tyto typy senzoru jsou porovnávány podle modulačního indexu Q .

$$Q = \frac{\Delta I}{I_0 p} \quad (1)$$

ΔI [W]	-změna optického výkonu
I_0 [W]	-vstupní optický výkon
p [Pa]	-působící tlak

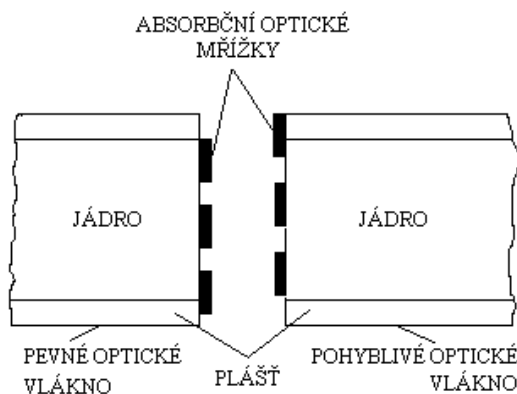
Na obr.13 je znázorněn senzor s přerušným optickým vláknem. Při působení síly se mechanicky vychýlí pohyblivé optické vlákno. Tím se zmenší množství světla,

které projde do pevného optického vlákna a do fotodetektoru. Používají se i dvě pevná přijímací vlákna s dvěma detektory zapojené diferenciálně. [9]



Obr.13 Senzor s přerušným optickým vláknem Převzato z [9].

Citováno z [9]: „Citlivost těchto senzorů lze zvýšit nanesením optických absorpčních mřížek na konci vláken (obr.14). ”



Obr.14 Konce optických vláken s absorpční mřížkou. Převzato z [9].

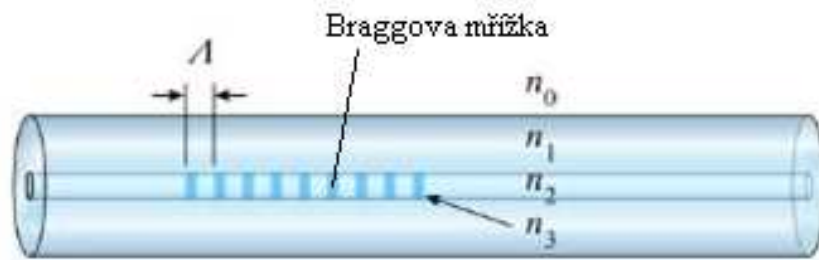
2.5.5 Optický senzor s Braggovou mřížkou.

Základem je odraz světla při změně indexu lomu. Uvnitř optického vlákna je mřížka skládající se s poruch indexu lomu jak je vidět na obr.15. Optickým vláknem prochází širokopásmové světlo a část paprsku s určitou vlnovou délkou se odrazí od Braggovy mřížky a ostatní propustí. Měří se právě ta vlnová délka té odražené části paprsku. Při deformaci (tahu,tlaku) se posouvá mřížka, což zapříčiní změnu vlnové délky odraženého světla.[22]

Vlnová délka odraženého světla je dána vztahem:

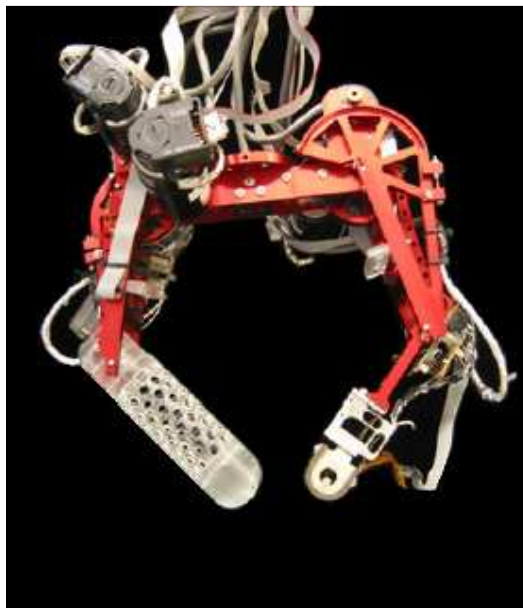
$$\lambda_b = 2n_e \Lambda \quad (2)$$

λ_b -vlnová délka odraženého světla
 n_e -index lomu světla ve vláknu
 Λ -perioda mřížky



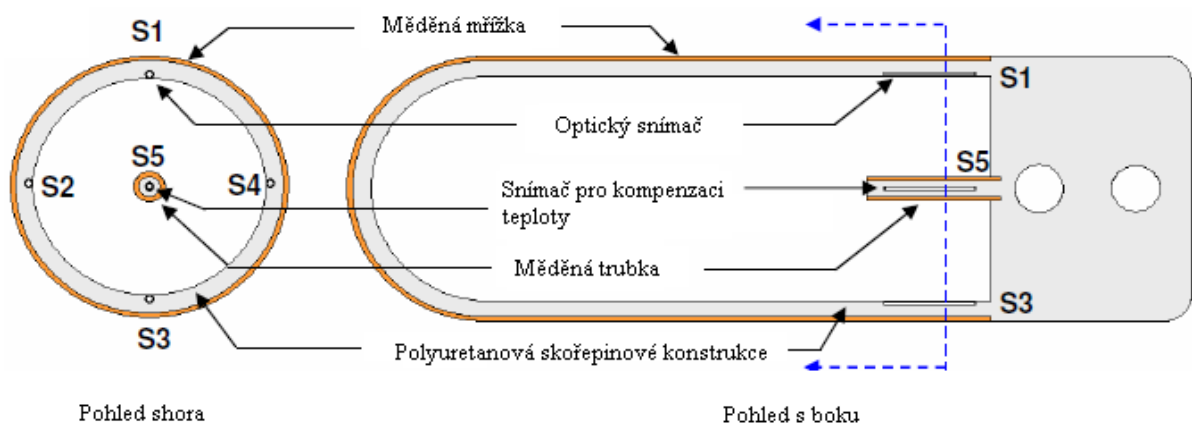
Obr.15 Optické vlákno s Braggovou mřížkou. Převzato z [22].

Tento typ snímače je použit u robotické ruky obr.16 vyrobenou Standfordskou univerzitou a firmou Intelligent Fiber Optic Systems Corporation (IFOS)[24].



Obr.16 Robotická ruka. Převzato z [23].

Prst na obr.17 se skládá ze tří základních částí-prstu, skořápky a kloubu. Do skořápky jsou vloženy čtyři senzory (S1-S4) a ještě jeden doprostřed prstu pro kompenzaci vlivu teploty (S5). [23]



Obr.17 Struktura prstu s optickými senzory. Převzato z [23].

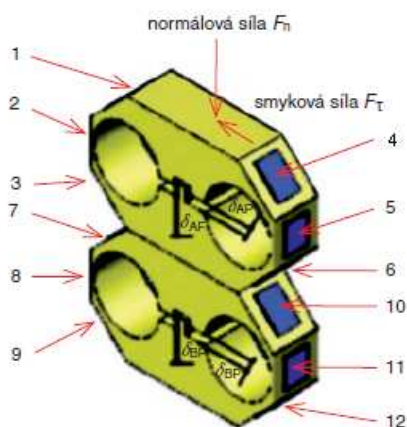
2.6 Senzory z tenzometry

Tenzometry jsou nejpoužívanějšími snímači v automatizaci. Hlavní výhody tenzometrů je přesnost, spolehlivost, životnost a malá hmotnost a velikost. Princip tenzometru je, že změna elektrického odporu je závislá na změně deformace tenzometru. Tzn.: tenzometr vlivem působící síly mění svůj elektrický odpor, takže základní veličina je elektrický odpor. Měří se ale napětí a proud a pomocí ohmova zákona se přepočítá na odpor. Tenzometr se nalepí pomocí lepidla, které moc neovlivňuje tenzometr svou teplotní roztažností, na namáhaný materiál.[10,11]

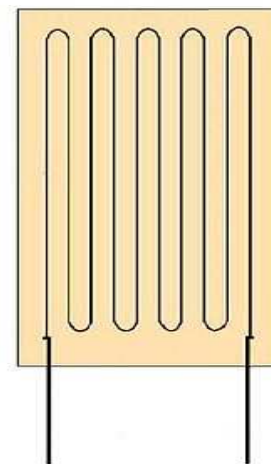
Citováno z [1]: „Příkladem snímače používaného v robotice k současnému měření úchopné normálové a smykové síly je dvousložkový snímač typu DOTS (Double Octagon Tactile Sensor, obr. 18). Snímačem typu DOTS lze měřit i velké síly s velkou citlivostí, a to při lineární závislosti mezi působící silou a výstupem ze snímače.“

Základní typy tenzometrů:

- odporový kovový tenzometr (drátkový, fóliový)
- polovodičový (germaniový, křemíkový)



Obr. 18 Dvousložkový snímač typu DOTS.
Převzato z [1].



Obr.19 Drátkový tenzometr.
Převzato z [18].

2.6.1 Odporový tenzometr

Dříve se skládal tenzometr se z tenkého drátku obr.18. Dnes se používají fóliové tenzometry. Výhoda je, že se dá vyleptat jakýkoliv tvar vodivých cest a nepotřebuje nosný papír. Pro větší odolnost se ale stejně vyztužují ochranným filmem. Díky zmenšení aktivní tloušťky se lépe odvádí teplo a proto má malý vliv na změnu teploty a může se použít větší proudové zatížení. Na obr.20 je vidět nejčastější provedení fóliového tenzometru. Aby změna odporu byla co největší, musí být délka vodivé cesty také co nejdelší. Jako odporový materiál je používám konstantan [10,11]

Základním vztahem mezi deformací a odporem je:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (3)$$

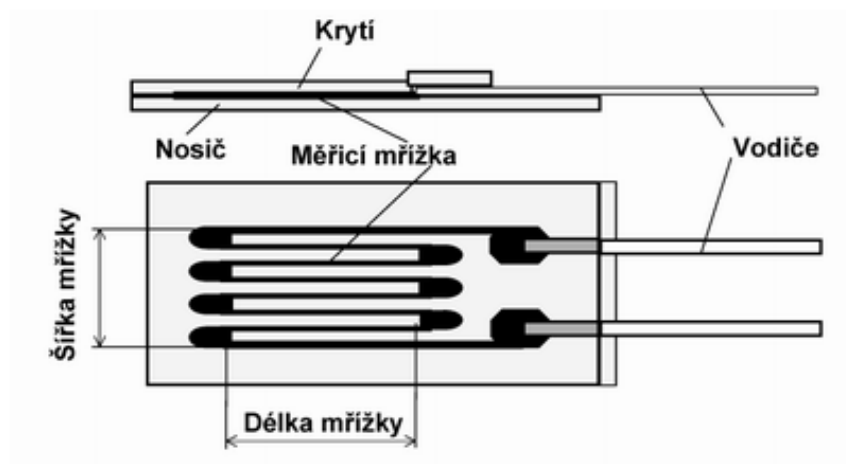
R [Ω] - odpor
 ρ [kg.m^{-1/3}] - rezistivita
 l [m] - délka vodiče

Když je tenzometr namáhán tahem, tak se zvětšuje délka, čímž roste odpor. Musíme uvažovat přetvoření $\varepsilon = \Delta l / l$, pak vztah má tvar:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = k \cdot \varepsilon \quad (4)$$

R [Ω] - odpor
 ΔR [Ω] - změna odporu
 k - koeficient deformační citlivosti
 l [m] - délka vodiče
 Δl [m] - změna délky vodiče
 ε - přetvoření
 S [m²] - průřez vodiče

Velikost *k* závisí na vlastnostech použitého materiálu a jeho rozměrech. Hodnota se určuje experimentálně pro každý materiál. [13]

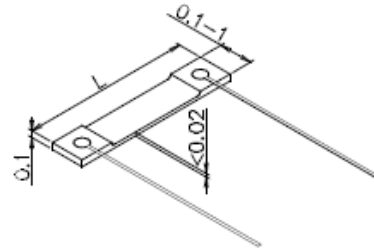
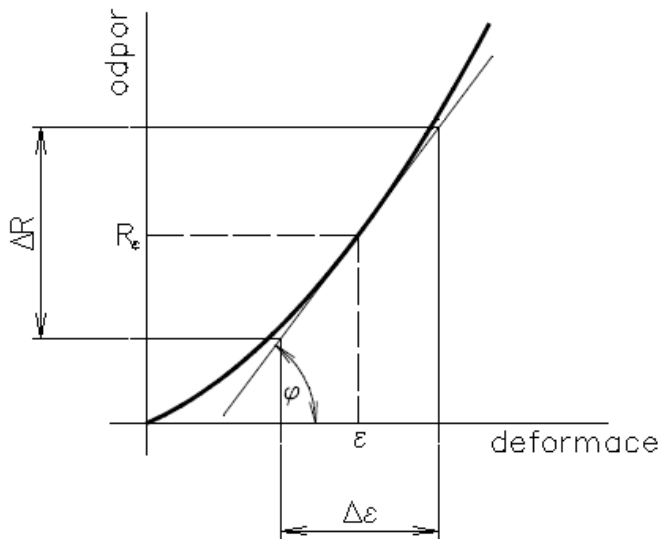


Obr.20 Fóliový tenzometr. Převzato z [10].

2.6.2 Polovodičový tenzometr

Princip funkce je stejný jako u odporových tenzometrů. Při deformaci se mění odpor tenzometru. Vyznačují se ale nelineární závislostí odporu na deformaci viz obr.21. Používaný materiál je germanium nebo křemík. V dnešní době je nejpoužívanější křemíkový tenzometr. Velká výhoda polovodičových tenzometrů je

jejich citlivost. Snímače obsahující polovodičové tenzometry jsou velice malé a lehké. Nevýhodou je větší teplotní závislost než u kovových tenzometrů. Příklad polovodičového tenzometru je na obr.22 firmy VTS Zlín. [11,14]



Obr.22 Polovodičový tenzometr. Převzato z [15].

Obr.21 Graf závislosti odporu na deformaci. Převzato z

Citováno z [14]: „Polovodičové tenzometry jsou vyráběny nejprve mechanickým oddělováním (řezáním) z patřičně dotovaného monokrystalu křemíku, dále mechanickým opracováním směřujícím k žádanému tvaru a rozměrům a nakonec chemickým opracováním. Aktivní délka polovodičových pásek mezi zlatými vývody je 2 až 10 mm, šířka 0,2 až 0,4 mm a tloušťka 0,01 až 0,03 mm. Ohmický odpor je nejčastěji 120Ω nebo 350Ω. Nároky na tmel spojující polovodičové tenzometry s měřeným objektem jsou vyšší než u kovových tenzometrů.“

Vztah závislosti odporu tenzometru na deformaci pro polovodičový tenzometr:

$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \varepsilon^2 \quad (5)$$

$$k = C_1 + C_2 \cdot \varepsilon = \operatorname{tg} \varphi \quad (6)$$

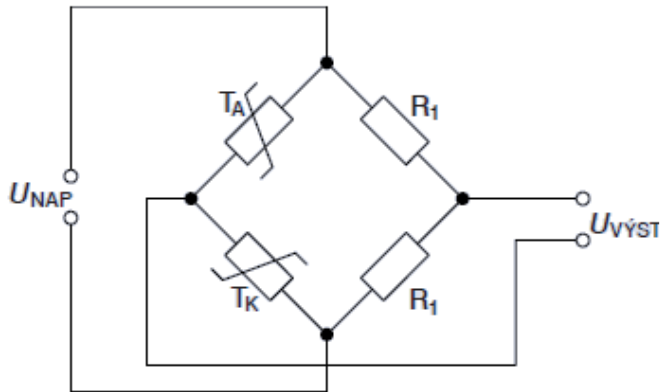
R [Ω]	-odpor
ΔR [Ω]	-změna odporu
k	-koeficient deformační citlivosti
ε	-přetvoření
C1,C2	-lineární a kvadratický koeficient deformační rovnice

Výhody polovodičového tenzometru oproti odporovému. Citováno z [14]

- „60x vyšší deformační citlivost dovoluje měřit bez zesilovačů s běžnými ohmmetry, voltmetry a osciloskopy
- 60x vyšší prahová citlivost umožňuje změřit deformaci kovů již od miliontiny milimetru na délkovém metru“

2.6.3 Zapojení tenzometrů

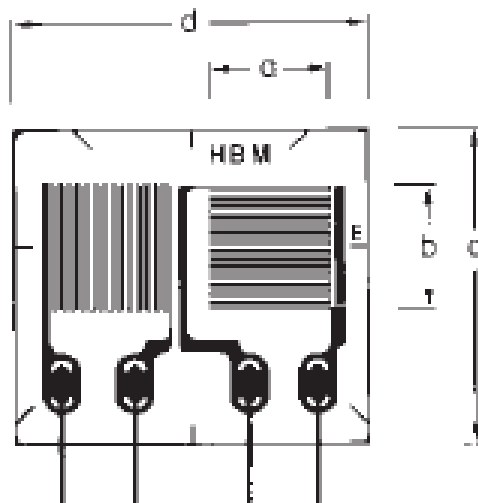
Přesnost všech tenzometrů je ovlivněna několika faktory například teplota a množství procházejícího proudu. Proto se nejčastěji zapojují tenzometry do Wheatstoneova můstku. Zapojení Wheatstoneova můstku pro kompenzaci teploty je obr.23. Skládá se z kompenzačního tenzometru T_K , měřícího tenzometru T_A a pasivními odpory R_1 a R_2 [11]



Obr.23 Můstkové zapojení tenzometrů pro kompenzaci vlivu teploty. Převzato z [11]

2.6.4 Rozdělení tenzometrů podle měřené deformace

Pro měření délkové deformace se používají jednoduché jednoosé tenzometry, který je uveden například na obr.20. Pro měření deformace ve dvou známých směrech (navzájem kolmých) se používají tenzometrické kříže. Příklad tenzometrického kříže, který se používá pro výrobu přesných snímačů od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, je na obr. 24. Skládá se dvou foliových tenzometrů pootočených od 90° . Seskupením více tenzometrů vznikají tzv. tenzometrické růžice, které jsou například složeny s tenzometry pootočenými o 45° . [16]



Obr.24 Fóliový tenzometr typu XK51E. Převzato z [16].

2.7 Piezoelektrický senzor

Senzory jsou založeny na piezoelektrickém jevu některých materiálu. Piezoelektrický jev převádí sílu na elektrický signál. Materiál se používá piezoelektrická keramika nebo polyvinylidenfluorid. Rozměry použitého materiálu jsou velmi důležité, protože mají přímý vliv na frekvenci.[1,17]

Citováno z [1]: „Piezoelektrické senzory jsou konstrukčně velmi jednoduché. Předností jsou malé rozměry senzoru, nedostatkem velký vnitřní odpor, který vyžaduje vstupní odpor vyhodnocovacích obvodů řádově $1 \cdot 10^{12} \Omega$. Piezoelektrické snímače jsou vhodné pro snímání dynamických sil (vibrací). Při snímání pomaleji se měnících sil je nutné používat speciální zesilovače s velmi velkým vstupním odporem (tzv. nábojové).”

2.7.1 Senzor s PZK 850

Pro snímání statické síly se nově používá piezokeramika PZK 850. Snímač umožňuje měřit statickou sílu do 50 N bez použití zesilovače.

Působením tlakové síly se rozkmitá rezonátor na rezonanční frekvenci. Vlastnosti rezonátoru jsou stejné jako sériového RLC obvodu, ke kterému je připojena paralelně kapacita jak je vidět na obr.25. Hodnoty rezonančního obvodu se vypočítají podle vztahů (7-10). [17]

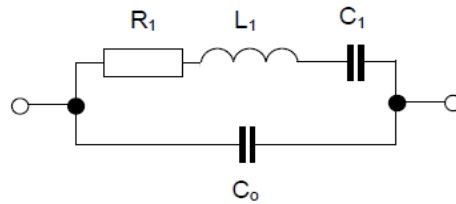
$$L = \rho \cdot \frac{a \cdot l}{8b} \cdot \frac{(s_{33}^E)^2}{d_{13}^2} \quad (7)$$

$$C = \frac{8 \cdot b \cdot l}{\pi^2 \cdot a} \cdot \frac{d_{13}^2}{s_{33}^2} \quad (8)$$

$$R = \frac{\pi^2 \cdot a}{4 \cdot b \cdot l} \cdot \frac{s_{33}^E}{d_{13}^2} \quad (9)$$

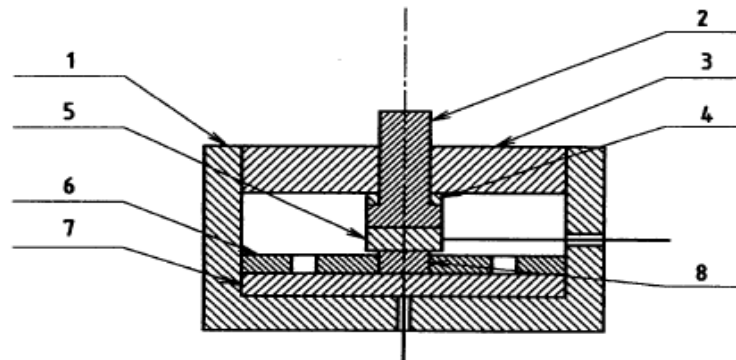
$$C_0 = \epsilon_{11}^s \cdot \frac{b \cdot l}{a} \quad (10)$$

L [H]	-indukce
C [F]	-kapacita
R [Ω]	-odpor
ϵ	-přetvoření
a,b,l [m]	-délkové rozměry
ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1/3}$]	-rezistivita
d_{13}	-piezoelektrický koeficient
ϵ_{11}^S	-složka tenzoru permitivity konstantní deformace
s_{33}^E	-složka pružného potenciálního tenzoru podle E=konst



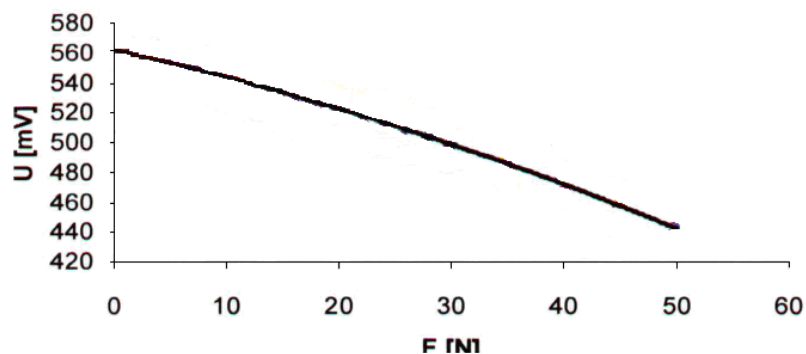
Obr.25 Rezonátor. Převzato z [17].

PZK 850 (o rozměrech 2x2x1 mm) byl použit ve snímači PZTC-1 na obr.26. Piezokeramika 8 je horizontálně umístěn mezi dvě mosazné elektrody 5 a 7 a ve středu PE elastického spoje 6. Síla působí ze shora na čep 2. Tato síla se přenáší na mosaznou elektrodu 5. Piezokeramika 8 je též pod tlakem mezi elektrodami. Současně drží tlak v ose čepu 6, který má čtyři kontaktní místa v pružném spojení. Každé kontaktní místo je v postraním středu, což je kolmo na plochy mosazných elektrod 5 a 7. Tyto elektrody jsou spojeny měděnými drátky na oscilátor. Do pouzdra 1 je vložený kryt 3. Pod tímto krytem je distanční kroužek 4 z cigaretového papíru. Pouzdro, kryt a čep jsou vyrobeny z novoduru a pružný spoj je z PE.[17]



Obr.26 Snímač PZTC-1. Převzato z [17].

Na obr.27 je vidět závislost výstupního napětí z oscilátoru na zatížení snímače PZTC-1. Charakteristika není zcela lineární. Lineární charakteristiku má až novější typ snímače PZTC-3. Výstupní napětí PZTC-3 je o něco vyšší. Při nezatíženém stavu je výstupní napětí přibližně 708 mV a při zatížení 50 N je výstup roven 674 mV. Konstrukce tohoto snímače je velmi podobná. Základní rozdíl je, že měděné drátky, které jsou spojené z oscilátorem, jsou upevněny přímo na piezokeramickém rezonátoru.[17]



Obr.27 Graf závislosti napětí na zatížení. Převzato z [17].

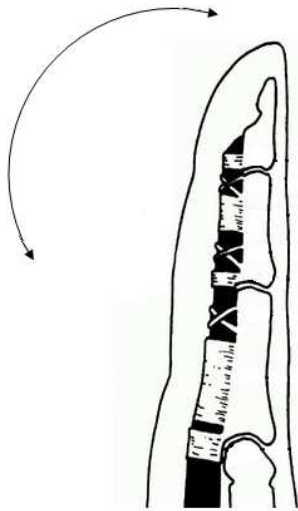
3 Konstrukční návrh

3.1 Cíl a uvedení do problematiky

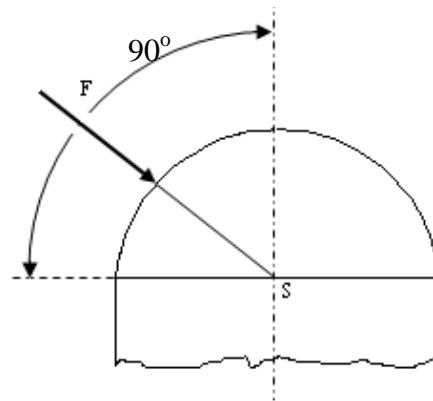
Cílem je navrhnout konstrukce konečku prstu u robotické ruky. Konec prstu by měl nejen snímat velikost působící síly na prst, ale i směr působení. Jedná se o správné vybrání typů snímačů a jejich umístění na konec prstu.

3.2 Rozbor

Prst se pohybuje jen jak je naznačeno na obr.28, proto je brán prst jako 2D úloha a síly působící na bok prstu nejsou snímány. Při působení síly na koneček prstu je uvažováno, že působící síla je kolmá na působící povrch, tedy v případě působení síly na zaoblení směřuje působící síla do středu viz obr.29. Při uchopování předmětu je nejčastěji využívána jen část v rozmezí 90° .



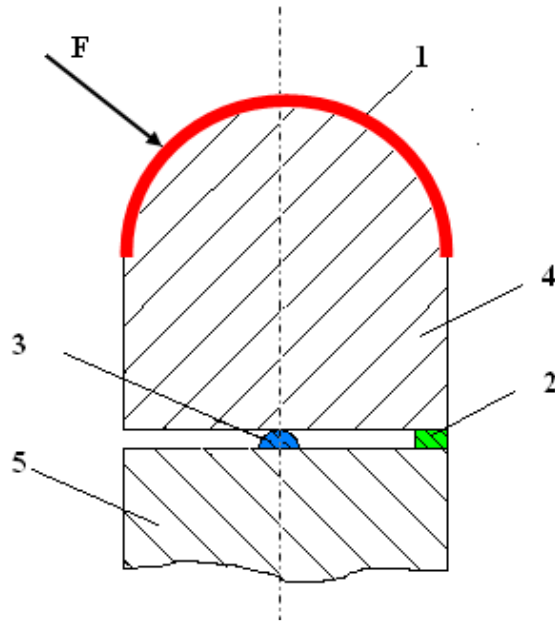
Obr.28 Pohyb prstu. Převzato z [20].



Obr.29 Působící síla na zaoblení

3.3 Konstrukce prstu

Na obr.30 je průřez posledního článku prstu. Článek prstu je rozdělen na dvě části 4 a 5. Na kupolovitou plochu části 4 je nalepen elastomerický senzor 1. Části 4 a 5 jsou společně spojeny rotační vazbou 3. Mezi částmi 4 a 5 je ještě jeden elastomerický senzor 2.



Obr.30 Konstrukce části posledního konečku prstu

3.4 Princip funkce

Při uchopení předmětu působí předmět na elastomerický senzor 1 silou F . Elastomerický senzor 1 snímá celkovou normálovou sílu F . Tato síla také částečně způsobí, pomocí rotační vazby 3, silové působení na senzor 2.

3.5 Zjištění velikosti a směru působící síly

Velikost působící síly je určen přímo z elastomerického senzoru 1. Směr se určí pomocí síly F_2 , kterou snímá senzor 2. Při různých úhlech působení zůstává hodnota síly F ze senzoru 1 stejná. Mění se ale hodnota síly F_2 ze senzoru 2. Pomocí experimentálního měření by se ke každému úhlu (0° - 90°) přiřadila procentuální hodnota určená vztahem

$$podíl_\alpha = \frac{F_2}{F} \cdot 100 \quad (11)$$

Hodnota udává procentuální přenos na senzor 2. Pro každý úhel je typická právě jedna hodnota. V praxi se tedy při uchopení předmětu získají hodnoty z obou senzorů a jejím podílem se získá hodnota, která bude odpovídat právě jedné hodnotě určené z experimentálního měření pro daný úhel. Nejmenší hodnota $podíl_\alpha$ je při působení síly F pod úhlem 90° , protože všechnu sílu pohltní rotační vazba 3.

3.6 Vlastnosti elastomerického senzoru

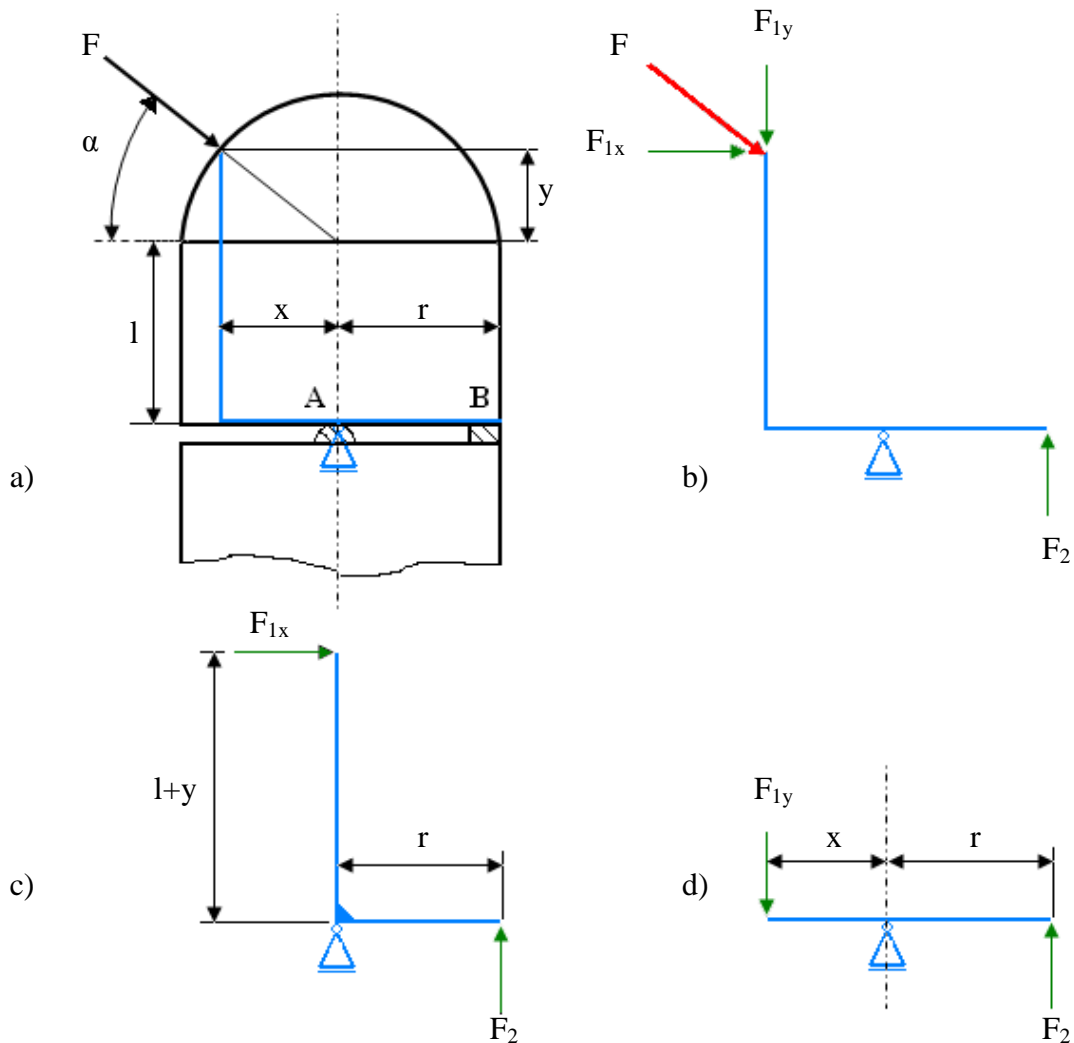
V konstrukci je použit senzor elastomerického typu. Jeho struktura je znázorněna v kapitole 2.2.1 obr.2. Jako elastomerický materiál je použit CS 57-7 RSC.

-tloušťka senzoru	3,6mm
-tloušťka eleastomeru	0,5mm
-teplotní stabilita	od -40C° do +100C°
-snímkovaná frekvence	300Hz
-vzorkovací frekvence	25MHz [1]

Pro zmenšení tloušťky senzoru by se dala použít slabší krycí a antistatická vrstva. Tím se by dalo dosáhnout tloušťky třeba 1,5mm.

3.7 Kontrola funkce

Jak bylo uvedeno výše viz. 3.5, tak pro každý úhel při stejné působící síle bude velikost snímané síly F_2 jiná. Pro kontrolu musíme převést koneček prstu na zalomenou páku dle obr.31a Páka je tuhá a tak nevznikají žádné deformace (ohyb). Dále musíme převést působící sílu F na složkové síly F_{1x} a F_{1y} obr.31b Pro lepší představu rozložíme zalomenou páku na dvě jednoduché dle obr.31c,d.



Obr.31 Zjednodušení prstu

Znamé parametry prstu jsou: r , l , F , F_2 . Síly jsou zjištěny senzory 1 a 2. Z obr.31a získáme potřebné rovnice:

$$x = r \cdot \cos \alpha \quad (12)$$

$$y = r \cdot \sin \alpha \quad (13)$$

$$F_{1x} = F \cdot \cos \alpha \quad (14)$$

$$F_{1y} = F \cdot \sin \alpha \quad (15)$$

Základem páky je, že moment na levé straně se musí rovnat momentu na pravé straně. Pro nás platí tedy vztah:

$$M_{1x} - M_{1y} = M_2 \quad (16)$$

Samotné momenty vypočítáme dle vztahů:

$$M_{1x} = F_{1x} \cdot (y + l) = F_{1x} \cdot y + F_{1x} \cdot l \quad (17)$$

$$M_{1y} = F_{1y} \cdot x \quad (18)$$

$$M_2 = F_2 \cdot r \quad (19)$$

Dosazením těchto rovnic (17-19) do vztahu (16) vznikne rovnice:

$$F_2 \cdot r = F_{1x} \cdot y + F_{1x} \cdot l - F_{1y} \cdot x \quad (20)$$

Dále dosadíme rovnice (12-15) do vztahu (20) a získáme rovnici:

$$F_2 \cdot r = F \cdot \cos \alpha \cdot r \cdot \sin \alpha + F \cdot \cos \alpha \cdot l - F \cdot \sin \alpha \cdot r \cdot \cos \alpha \quad (21)$$

Matematické řešení rovnice (21):

$$F_2 \cdot r = F \cdot \cos \alpha \cdot l \quad (22)$$

$$\frac{F_2 \cdot r}{F \cdot l} = \cos \alpha \quad (23)$$

Výsledný vztah pro výpočet úhlu:

$$\cos^{-1}\left(\frac{F_2 \cdot r}{F \cdot l}\right) = \alpha \quad (24)$$

Při parametrech $l=r$ bude vztah úhlu roven:

$$\cos^{-1}\left(\frac{F_2}{F}\right) = \alpha \quad (25)$$

F, F_2 [N]	-síla ze senzorů
r, l, x, y [mm]	-rozměry dle obrázku
F_{1x}, F_{1y} [N]	-složkové síly
M_{1x}, M_{1y}, M_2 [Nm]	-momenty

Zpětná kontrola

Největší hodnota síly F_2 by měla být pod úhlem $\alpha=0^\circ$ a nejmenší při $\alpha=90^\circ$. Zároveň platí že $l=r$. Úpravou vztahu (22) dostaneme rovnici:

$$F_2 = F \cdot \cos \alpha \quad (26)$$

Při $\alpha=0^\circ$ bude $\cos\alpha=1$, proto bude síla $F = F_2$.

Při $\alpha=90^\circ$ bude $\cos\alpha=0$, proto i výsledná síla $F_2=0$.

Při $\alpha=60^\circ$ bude $\cos\alpha=0,5$, proto $F_2= 0,5F$.

Kontrola ukázala, že úvaha byla správná.

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vypracování rešerše na snímání přítláčné síly koncových členů. Práce je hlavně zaměřena na typy snímačů pro snímání tlaku, které se dají použít pro robotická chapadla. Dalším bodem této práce bylo navrhnutí konstrukce konečku prstu pro robotickou ruku. Bylo potřeba rozhodnout, které snímače použít a jejich umístění na konci prstu.

Z této práce je dobře vidět kolik druhů snímačů lze použít. Snímače jsou založeny na různých principech za pomoci různých fyzikálních jevů, např. piezoelektrický jev, magnetická indukce a další. Každý snímač má typické vlastnosti a proto jsou používány v různých odvětvích. Velké nároky jsou právě kladeny na snímače použitých například v robotických protézách. Snímač musí být dostatečně citlivý, aby při uchopení nebyl předmět poškozen nepřiměřenou přítláčnou silou a musí být dostatečně malý aby se dal vůbec zabudovat do konstrukce prstu.

Při konstrukčním návrhu bylo nejdříve zapotřebí rozboru pohybu prstu a jeho chování při uchopení předmětu. Požadavek pro koneček prstu bylo, aby dokázal snímat nejen velikost přítláčné síly, ale i směr působení. Základem konstrukce jsou dva elastomerické senzory a rotační vazba. Jeden senzor je určen pro měření velikosti síly. Směr síly se určuje pomocí podílu zjištěných údajů z obou senzorů. Podíl se pak porovná s předem experimentálně zjištěnými hodnotami. Funkce snímání směru je zkontrolována pomocí zjednodušeného modelu a příslušných matematických vztahů.

Díky rychle rozvíjející se technologii budou časem taktilní snímače tak propracované, že plnohodnotně nahradí, možná i předčí, lidský hmat. V dnešní době jsou vyráběny protézy, které jsou propojeny s nervovým systémem, který zajišťuje řízení pohybu protézy. Rozvíjí se i výzkum zpětné odezvy, kdy je pomocí senzorů zjištěna hodnota o dotyku a zpětně vyslána do mozku, který tuto informaci zpracuje podobně jako u zdravého člověka. Zraněnému člověku tedy budeme moci časem navrátit další jeden ze základních smyslů vnímání okolí.

5 Seznam použité literatury

- [1] VOLF, J., Taktilní senzory pro automatizaci .*Automa* [online]. 2008, č. 7 [cit. 2012-05-04]. Dostupný na WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37544.pdf>
- [2] CROWDER, R. M. *Automation and robotics* [online]. 1998 [cit. 2012-04-09]. Dostupné z: <http://www.southampton.ac.uk/~rme1/robotics/artactile.htm>
- [3] *BeBionic* [online]. [cit. 2012-03-12]. Dostupné z: <http://bebionic.com/>
- [4] SCIENCEDAILY. Applause For The SmartHand: Human-Machine Interface Is Essential Link In Groundbreaking Prosthetic Hand. [online]. roč. 2009 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedaily.com/releases/2009/11/091104132708.htm>
- [5] OTÁHAL, J., NOVÁK, P., CHALUPOVÁ, M., OTÁHAL, S., VOLF, J., RESL, O. *Diagnostické zařízení pro diagnostiku kontaktních sil* [online]. Praha [cit. 2012-05-02]. Katedra anatomie a biomechaniky FTVS Univerzity Karlovy, Ústav přístrojové a řídicí techniky, Fakulta strojní ČVUT. Dostupný na WWW: http://biomech.ftvs.cuni.cz/kab/archiv/olomouc_slapadlo.ppt#268,6,Schéma senzoru
- [6] Force Sensing Resistor Integration Guide and Evaluation Parts Catalog. In: [online]. [cit. 2012-05-1]. Interlinkl electronics . Dostupné z: <http://resenv.media.mit.edu/classes/MAS836/Readings/fsrguide.pdf>
- [7] JOCKUSH, J., WALTER, J., RITER, H., Tactile Sensor System for a Three-Fingered Robot Manipulátor [online]. *Department of Computer Science, University of Bielefeld*, 1997 [cit. 2012-03-12]. Dostupný na WWW: <http://www.techfak.uni-bielefeld.de/~walter/pub/JockuschWalterRitter97-icra.pdf>
- [8] BEJČEK, L., VACULÍK, J., Snímače tlaku – přehled trhu .*Automatizace* [online]. 2006, roc. 49, č. 1 [cit. 2012-03-12]. Dostupný na WWW: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=1025>
- [9] TURÁN, J., PETRÍK, S. *Optické vláknové senzory* . ALFA, Bratislava, 1991, ISBN 80-05-00655-1.
- [10] VOJÁČEK, A., Fóliové tenzometry - princip, provedení, použití, historie . [online]. 2005, listopad [cit. 2012-02-06]. Dostupný na WWW: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005111201>

- [11] HRUBANT, L. , HRUBANT, J., Odporové tenzometry z pohledu využití v automatizovaných soustavách .*Automa* [online]. 2004, c. 7 [cit. 2012-02-04]. Dostupný na WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070427.pdf>
- [12] KUNDERA, R. Tenzometry v automatizaci. [online]. 2011, říjen [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.proautomatizaci.cz/cidla-elektrickych-neelektrickych-velicin/202-tenzometry-v-automatizaci>
- [13] KADLEC, K., KMÍNEK, M. MĚŘICÍ A ŘÍDICÍ TECHNIKA [Dokument HTML]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k42-tlak.htm#k424>
- [14] VOJÁČEK, A., Polovodičové tenzometry - princip, provedení, použití, historie. [online]. 2006, listopad [cit. 2012-02-06]. Dostupný na WWW: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006111601>
- [15] VTS ZLÍN [online] <http://www.vtsz.cz/files/sortiment.pdf> (9.2.2012)
- [16] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH [online] http://www.hbm.cz/index_top.htm?http://www.hbm.cz/foliove-tenzometry-a-prislusentvi-pro-aplikaci.htm (9.2.2012)
- [17] VOLF, J. , VLČEK, J., SEMNICKÝ, T., The piezoelectric tactile sensor for static force measurement. In: XVIII IMEKO World Congress, Rio de Janeiro, 2006. [cit. 2012-03-06]. Dostupný na WWW: <http://www.imeko.org/publications/wc-2006/PWC-2006-TC17-002u.pdf>
- [18] Tenzometr. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-01-10]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tenzometr>
- [19] VTS ZLÍN [online] <http://www.vtsz.cz/files/zakladni-rovnice.pdf> (9.2.2012)
- [20] ONDRA. Zranění prstů. [online]. 2009 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://casnacaj.blogspot.com/2009/05/zraneni-prstu.html>
- [21] DLR. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.dlr.de>
- [22] Optická vlákna s braggovskými mřížkami (FBG). *Opte.imatte* [online]. 2011, 2012-03-04 [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://opte.imatte.cz/index.php/articles/fbg-mrizky/10-fbg-mrizky>

- [23] LAE PARK, Yong, Kelvin CHAU, Richard BLACK a Mark CUTKOSKY. Force Sensing Robot Fingers using Embedded Fiber Bragg Grating Sensors. [online]. [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: http://bdml.stanford.edu/twiki/pub/Haptics/PhotonicRobots/PhotonicRobot_ICR_A07_final.pdf
- [24] IFOS. [online]. [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: <http://www.ifos.com>

6 Seznam použitých zkratk a symbolů

a,b	rozměry piezokeramiky	[m]
α	úhel	[°]
C1	lineární koeficient deformační rovnice	
C2	kvadratický koeficient deformační rovnice	
C	kapacita	[F]
DOTS	Double Octagon Tactile Sensor	
d_{13}	piezoelektrický koeficient	
ε	přetvoření	
ε_{11}^S	složka tenzoru permitivity konstantní deformace	
F, F ₂ , F _{1x} , F _{1y}	síla	[N]
FSR	Force Sensing Rezistore	
I _o	vstupní optický výkon	[W]
ΔI	změna optického výkonu	[W]
k	koeficient deformační citlivosti	
L	indukčnost	[H]
l	délka	[m]
M _{1x} , M _{1y} , M ₂	moment	[Nm]
p	působící tlak	[Pa]
podíl _{α}	hodnota pro určení směru síly	
Q	modulační index	
ρ	rezistivita	[kg.m ^{-1/3}]
R	odpor	[Ω]
S	průřez	[m ²]
s_{33}^E	složka pružného potenciálního tenzoru podle E=konst	

7 Seznam obrázků

Obr.1 Vliv působící síly na elastomer	13
Obr.2 Schéma senzoru s použitím vodivého elastomeru	14
Obr.3 Graf závislosti odporu na působící na FSR senzor	15
Obr.4 Konstrukce FSR senzoru	15
Obr.5 Tříprstý	16
Obr.6 Konstrukce FSR použitého u tříprstého robotu	16
Obr.7 Průřez kapacitního dotykového senzoru	17
Obr.8 Senzor se směnou vzdálenosti desek	18
Obr.9 Základní konstrukční prvky optického vláknového senzoru	20
Obr.10 Řez optickým vláknovým senzorem s mikroohybem	21
Obr.11 Maticový taktilní snímač	21
Obr.12 Senzor se změnou útlumu	22
Obr.13 Senzor s přerušným optickým vláknem	23
Obr.14 Konce optických vláken s absorpční mřížkou	23
Obr.15 Optické vlákno s Braggovou mřížkou.	24
Obr.16 Robotická ruka	24
Obr.17 Struktura prstu s optickými senzory	24
Obr.18 Dvousložkový snímač typu DOTS	25
Obr.19 Drátkový tenzometr	25
Obr.20 Fóliový tenzometr	26
Obr.21 Graf závislosti odporu na deformaci	27
Obr.22 Polovodičový tenzometr	27
Obr.23 Můstkové zapojení tenzometrů pro kompenzaci vlivu teploty.	28
Obr.24 Fóliový tenzometr typu XK51E	28
Obr.25 Rezonátor	30
Obr.26 Snímač PZTC-1	30
Obr.27 Graf závislosti napětí na zatížení	30
Obr.28 Pohyb prstu	31
Obr.29 Působící síla na zaoblení	31
Obr.30 Konstrukce části posledního konečku prstu	32
Obr.31 Zjednodušení prstu	33

8 Seznam příloh

1. Příložený CD disk s textem bakalářské práce ve formátu PDF