

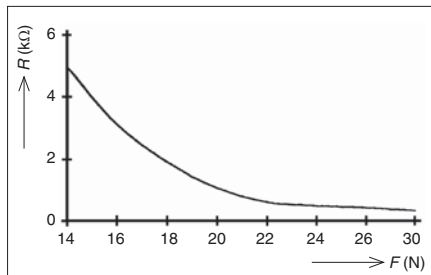
# Taktilní senzory pro automatizaci

Jaromír Volf

Článek informuje o základních kategoriích, konstrukčních principech, vlastnostech, příkladech řešení a použití taktilních senzorů a snímačů, nacházejících uplatnění jak v robotice a montážní a manipulační technice v průmyslu, tak zčásti i mimo průmyslové obory.

## 1. Úvod

Taktilní senzory a snímače umožňují získat specifickou informaci, kterou nelze obstarat jiným způsobem a jejíž znalost je nutná při interakci mezi různými předměty. Umožňuje chránit robot, měkce uchopit předmět, realizovat pohyb při kinematických omezeních, působit silou nebo momentem v daném směru, přesně měřit souřadnice předmětu v pro-



Obr. 1. Typická závislost odporu  $R$  taktilního snímače s vodivým polymerem na působící síle  $F$

storu apod. Patří k nim velké množství různých senzorů od mikrosplínačů indikujících dotyk, přes senzory měřící úchopnou sílu nebo prokluzování uchopeného předmětu až po složité snímače nahrazující lidský hmat.

## 2. Základní pojmy, vlastnosti a kategorie

*Taktilní senzor* je prvek schopný snímat informaci o dotyku s prvkem vnějšího prostředí a převádět ji na elektrický signál. *Taktilním snímačem* je obvykle míněno maticově nebo jinak uspořádané seskupení taktilních senzorů.

V průmyslu se nyní příkládá značný význam systémům pro získání a zpracování obrazové informace. Taktilní systémy mají oproti vizuálním četné výhodné vlastnosti, zejména:

- malá a lehká zařízení s možností být součástí úchopné hlavičky,
- možnost měnit pracovní prostor senzoru (snímače) přesunem úchopné hlavičky,
- paralelní sběr a rychlý paralelní přenos údajů,
- značná míra nezávislosti na okolních vlivech v porovnání s vizuálními systémy, kde dopadající stíny mohou vést k chybám,
- snadné pořízení výstupního signálu v číslicové formě,

- levná realizace, a to včetně celého rozpoznávacího systému,
- možnost řídit robot v reálném čase.

K nevýhodám taktilních systémů v porovnání s vizuálními patří:

- omezená rozlišovací schopnost v důsledku mechanických nedokonalostí konstrukce,
- nutná minimální úchopná síla,
- nutnost sledovat opotřebení.

Z hlediska účelu lze taktilní snímače rozdělit do čtyř kategorií:

1. Taktilní snímače určené k rozpoznání tvaru a rozměru předmětů:
  - a) taktilní snímač vhodně umístěný na aktivní úchopné hlavičce robotu: taktilní informace se získává z primárních nebo ze sekundárních taktilních senzorů taktilního snímače při uchopení (sevření) předmětu úchopnou hlavičkou; tímto se získá informace o globálních vlastnostech objektu,
  - b) taktilní snímač umístěný na zařízení, které postupně aktivně ohmatává rozpoznávaný předmět tak, že postupuje po jeho povrchu; získává tedy taktilní informaci o lokálních vlastnostech povrchu objektu v relativně malé oblasti, v níž se objektu dotýká.
2. Jednoduché taktilní snímače nebo senzory umístěné na aktivní úchopné hlavičce, jejichž cílem je zjistit, zda byl předem známý předmět správně uchopen; generují jen dotykovou informaci a lze je použít i k vyhodnocení síly stisku čelistí úchopné hlavičky.
3. Taktilní senzory umístěné na exponovaných místech ramena robotu, kdy cílem je plnit bezpečnostní funkce (např. dají signál k zastavení pohybu ramena, jestliže toto narazí na neočekávaný objekt).
4. Taktilní senzory a snímače generující informaci využívanou k řízení pohybu robotů či jiných automatických mechanismů a k usnadnění jejich orientace v prostoru.

Taktilní snímače a senzory se podle použitého fyzikálního principu dělí na zařízení:

- s elastomery,
- s tenzometry,
- kapacitní,
- s piezoelektrickými materiály,
- s optickými vlákny.

## 3. Taktilní snímače s elastomery

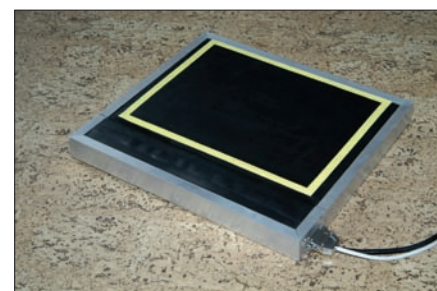
### 3.1 Taktilní snímače s vodivým elastomerem

Jako převodník síly na elektrický signál je u tohoto typu použit vodivý elastomer měnící svůj elektrický odpor v závislosti na působící síle. V principu jde o silikonovou pryž syčenou grafitem nebo železným prachem. Se stlačováním a relaxací poddajného materiálu se mění výsledný odpor senzoru. Snímač s vodivým elastomerem informuje nejen o prostém

kontaktní síle, ale může poskytnout i kvantitativní a kvalitativní informaci o předmětu, s jehož povrchem přicházejí senzory snímače do kontaktu. Senzory zhotovené s použitím vodivého elastomeru CS 57-7 RSC [1] umožňují spojitě měřit velikost tlaku.

Na pracovišti autora byla vyvinuta řada taktilních senzorů a snímačů bez mechanicky pohyblivých prvků k použití v robotice a biomechanice. Na obr. 1 je typická závislost odporu na tlakové síle, která je nelineární v celém rozsahu. V praxi je z hlediska stability vhodné používat druhou část charakteristiky od 20 do 22 N. První část má sice podstatně větší citlivost, ovšem při značných problémech s reprodukovatelností měření. Výstupní elektrický signál lze linearizovat rezistorem nebo softwarově v počítači.

Jednotlivé konstrukce snímačů se liší umístěním elektrod a elastického materiálu, který leží mezi snímacími elektrodami nebo je umístěn na dvojici speciálně tvarovaných elektrod. Snímač může obsahovat různé vrstvy, které nastavují měřicí rozsah a popř. chrání vodivý elastomer před poškozením při velkém rázovém přetížení.



Obr. 2. Snímač Plantograf V05

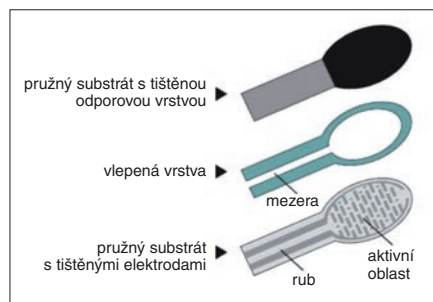
Pro měření rozložení statických a dynamických tlaků byl na pracovišti autora vyvinut snímač Plantograf V05 [2] k analýze chůze člověka, rozložení tlaků na plošce chodidla, sedu a k indikaci stavu velkých kloubů. Snímač existuje v podobě pevné desky (obr. 2) i elastické pleny, obě varianty jsou chráněny patenty. Obsahuje 7 500 senzorů o rozměrech 2 × 2 mm, rozmístěných rovnoměrně na ploše 300 × 400 mm. Použitý vodivý elastomer CZ 57-7 RSC [1] má tloušťku 0,5 mm a je stabilní při teplotě od -40 do +100 °C. Snímková frekvence je 300 Hz, vzorkovací frekvence 2,5 MHz a rozlišení na výstupu osm bitů (256 úrovní).

V jiném taktilním senzoru se využívá tepelně vodivý materiál citlivý na tlak [3]. Taktilní informace se v tomto případě skládá z informace o kontaktní síle a o teplotě. Výsledkem je multifunkční taktilní senzor. Senzor obsahuje prvek z elastomeru o ploše 30 mm<sup>2</sup> a tloušťce 0,5 mm, jenž je fixován

v substrátu pokrytém izolační vrstvou brání chemické kontaminaci a izolující elektrody. Substrát je ohříván na teplotu lidského těla.

### 3.2 Senzory typu FSR

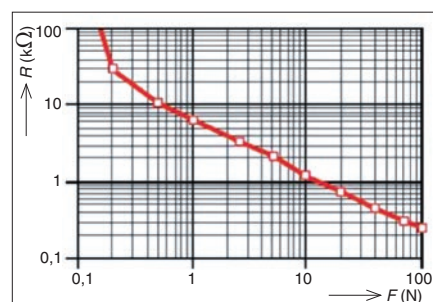
Senzory s citlivým polymerním materiálem (*Force Sensitive Resistor – FSR*) [4], jsou odporové senzory využívající závislost elek-



Obr. 3. Uspořádání senzoru FSR od firmy Interlink Electronics

trického odporu polymerové vrstvy (*Resistive Film, FSR Polymer Ink*) na působící síle. Používají se v konstrukci dotykových klávesnic různých zařízení, popř. ke zjišťování polohy předmětů. Lineární část převodní charakteristiky lze využít k měření zatížení. Lze vyrobit senzory různých tvarů i snímače složené z jednotlivých senzorů (obr. 3).

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.



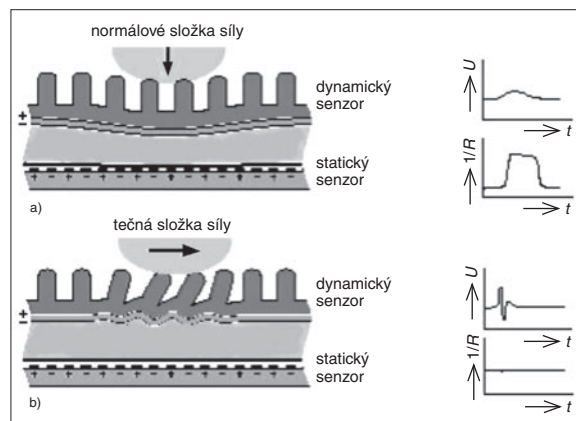
Obr. 4. Typická závislost odporu R senzoru FSR na působící síle F

Senzor FSR lze typicky zatížit silou do 10 N, maximálně až do 100 N, při typické změně odporu v rozmezí od 2 MΩ do 2 kΩ (obr. 4). Maximální tlak, při němž senzor ještě funguje, se pohybuje v rozmezí 100 až 200 Pa. Rozlišovací schopnost jednoho senzoru je lepší než 0,5 %. Použití senzorů FSR pro přesné měření však brání tolerance převodní charakteristiky mezi jednotlivými senzory, která činí 15 až 25 %.

Senzor FSR je použit např. v konstrukci prstu tříprsté ruky vyvinuté v německém leteckém ústavu DLR (*Deutsche Forschungsanstalt für Luft-Und Raumfahrt*), jak ukazuje obr. 5 [5].

### 3.3 Senzory s odporovou vrstvou

Senzor popsaný v [6] reaguje nejen na normálovou, ale i na tečnou složku síly (obr. 6). V podstatě jde o dva spojené vrstevné senzory. První je tvořen klky na odporové vrstvě a vytváří tzv. dynamický senzor, citlivý na dynamickou změnu polohy klků působením tečné složky síly (obr. 6b), na kterou spodní odporová vrstva nereaguje. Statická tlaková síla se naopak projeví především ve spodní vrstvě snímače, reagující změnou odporu (obr. 6a).



Obr. 6. Princip senzoru normálové a smykové složky síly

### 3.4 Detekční fólie Pressurex

Detekční fólie Pressurex® od firmy Sensor Product Inc. je velmi tenká (tloušťka 0,01 až 0,05 mm), vnějším vlivům odolávající pružná fólie umožňující stanovit rozložení tlaku mezi dvěma dotýkajícími se povrchy objektů, i zakřivených. Obsahuje tenkou vrstvu mikrokapsulí, umístěnou vespod přenosové polyesterové fólie, které se působením síly protřnou a jejich obsah zapůsobí na barevnou vývojovou vrstvu, na vyvíjecí fólii. Fólie Pressurex se poté vyjme z místa měření a z výsledného zabarvení se určí působící síla, popř. tlak (obr. 7). U některých typů fólie se velikost tlaku nemusí projevit jen intenzitou zabarvení, ale též změnou barvy.

### 4. Senzory a snímače s tenzometry

Senzory s tenzometry jsou založeny na měření deformace prvků robotu aktivní silou např. při uchopení předmětu. Jako převodník síly na elektrický signál se použije drátkový, fóliový nebo polovodičový tenzometr nalepený na sledovaný namáhaný díl, popř. se použijí senzory síly běžné produkce. Takto lze vytvořit senzor síly působící v daném místě nebo detekovat celkovou působící sílu.

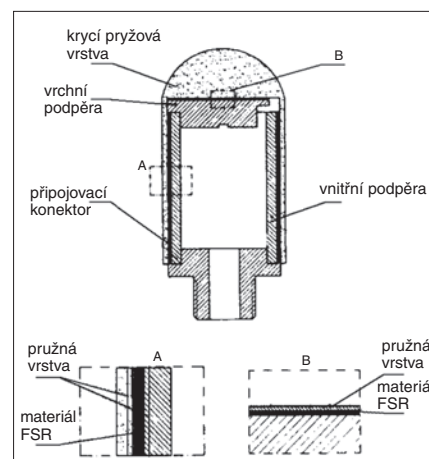
Příkladem snímače používaného v robotice k současnému měření úchopné normálové a smykové síly je dvousložkový snímač typu DOTS (*Double Octagon Tactile Sensor*, [7], obr. 8). Snímačem typu DOTS lze měřit i velké síly s velkou citlivostí, a to při lineární závislosti mezi působící silou a výstupem ze snímače.

### 5. Kapacitní senzory

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.

### 6. Senzory s piezoelektrickými materiály

Pro převod síly na elektrický signál lze použít také piezoelektrický jev. Jako piezoelektrický materiál se nejprve používal křemen. Nověji se používají i další materiály s podobnými vlastnostmi, a to piezoelektrická keramika ( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{PbTiO}_3$ ,  $\text{PbZrO}_3$  a niobáty) nebo polyvinylidenfluorid ( $\text{PVDF}^2$ ) apod.



Obr. 5. Konstrukce prstu umělé ruky DLR se senzorem FSR

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). Na pracovišti autora byly vyvinuty snímače schopné měřit statickou sílu bez nábojového zesilovače [8] a nejnovější konstrukce jsou popsány v [9]. Rezonátorem ve snímačích podle [8] je piezokeramický prvek s rozměry  $2 \times 2 \times 1 \text{ mm}$  z materiálu PZK 850. Rezonátor je řídicím členem Colpittsova oscilátoru. Využívá se zde změna činitele jakosti. Zavedená síla vyvolá pokles amplitudy rezonančních kmitů piezorezonátoru. Vyhodnocovat lze také změnu rezonanční frekvence, neboť se zatížením se mění kapacita

rezonátoru. Převodní charakteristika snímače je v měřicím rozsahu 0 až 50 N blízka lineární při odpovídající změně napětí z asi 710 na 680 mV (citlivost  $-0,68 \text{ mV} \cdot \text{N}^{-1}$ ), popř. změně frekvence z 825 na 880 kHz.

Jinou konstrukcí je piezoelektrický senzor pro konečky prstů robotu podle [10], tvořený hliníkovou elektrodou opatřenou z obou stran vrstvou polymeru o tloušťce 6  $\mu\text{m}$  s piezoelektrickými vlastnostmi, krytou odporovou vrstvou se dvěma paralelními elektrodami. Odpor mezi elektrodami je 845  $\Omega$ . Střední hliníková

V taktilních senzorech se nejčastěji využívá změna amplitudy procházejícího světla. Tu lze ovlivnit několika způsoby:

- změnou okrajových podmínek šíření světla v optickém prostředí (např. mikroohyb),
- změnou vzájemné optické vazby,
- změnou tlumení,
- změnou přechodu a odrazu světla.

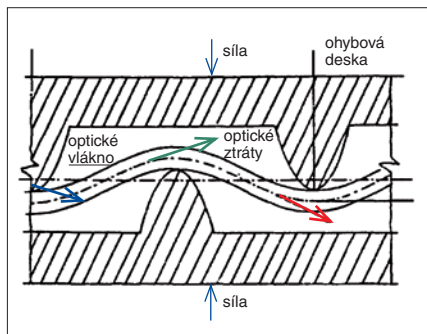
Podrobnější informace o taktilních senzorech a snímačích s optickými vlákny lze nalézt v [11].

## 7.2 Senzory s mikroohybem vlákna

U senzorů s mikroohybem se využívá porušení podmínky úplného vnitřního odrazu, např. na rozhraní mezi jádrem a pláštěm optického vlákna. Porušení lze dosáhnout buď změnou geometrie (zakřivení) vlákna nebo změnou poměrů indexů lomu.

Při ohýbání optického vlákna pod kritický poloměr

nastává porušení podmínky pro vidy vyšších řádů a dochází k průniku světla do pláště optického vlákna. Tyto vidy se mohou dále šířit podél optického vlákna jako plášťové vidy nebo mohou uniknout do okolního prostředí (obr. 9). Tím klesá intenzita světla šířícího se jádrem optického vlákna.



Obr. 9. Princip optického vláknového taktilního senzoru s mikroohybem

Uspořádání maticového taktilního snímače složeného ze senzorů s mikroohybem optického vlákna ukazuje obr. 10. Nedostatkem snímače je potřeba velkého počtu zdrojů a zejména detektorů světla, neboť každé vlákno musí mít svůj vlastní zdroj a detektor, které navíc musí být multiplexovány. Vždy smí svítit jen jeden zdroj a snímat jen jeden detektor (smí být aktivován jen jeden řádek a jen jeden sloupec).

## 7.3 Senzory s optickými vlákny se vzájemnou optickou vazbou

U senzoru využívajícího vzájemnou optickou vazbu je na obou jeho vláknech v místě dotyku odstraněn plášť, a tím jsou odhalena

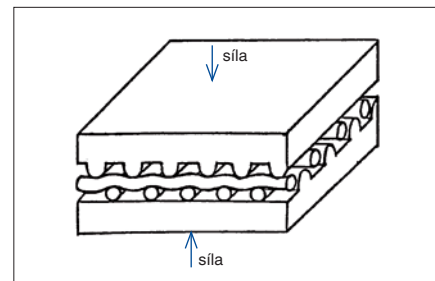
jádra, která přicházejí do vzájemného kontaktu. Při vhodně navržených parametrech (délka styčné plochy vláken, úhel jejich křížení) ovlivňovaných působící silou, tedy těsnosti vzájemné vazby, přechází úměrná část energie z prvního vlákna do druhého. Ke zdroji světla je připojeno první optické vlákno a k detektoru druhé.

## 7.4 Senzory se změnou útlumu

Senzory využívající změnu útlumu obsahují průsvitný člen vřazený do optického vlákna, který vlivem vnějšího prostředí mění své optické vlastnosti. Optické vlákno zde samo ovlivňováno není a je určeno jen k vedení světelné energie. Nejčastěji se senzory tohoto typu používají k měření teploty, kdy optické vlastnosti průsvitného členu jsou závislé na teplotě. Pro taktilní čidla se pro citlivý člen volí materiál s optickými vlastnostmi závislými na působící síle (obr. 11).

## 7.5 Senzory se změnou přechodu a odrazu světla

U senzorů se změnou přechodu a odrazu světla se využívá změna energie odražené od reflexní vrstvy do snímáčího vlákna s detektorem. Síla působí na část s reflexní vrstvou a mechanické vlastnosti senzoru jsou dány mechanickými vlastnostmi deformovaného materiálu, např. pružinové oceli.



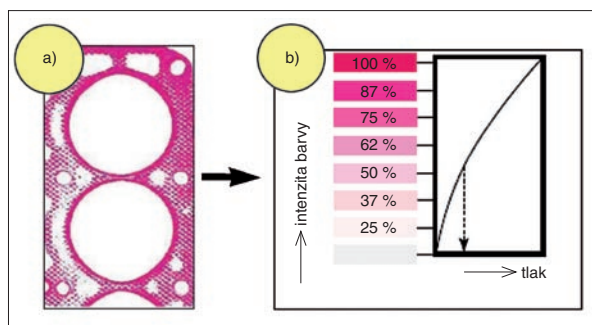
Obr. 10. Uspořádání maticového taktilního snímače s optickými vláknovými senzory s mikroohybem

Obdobně lze uspořádat reflexní senzor tak, že zdrojová i snímáčí vlákna jsou umístěna paralelně pod průsvitným elastomerem. Pokud bude tento elastomer měnit své optické vlastnosti, lze senzor přiřadit též do skupiny senzorů se změnou útlumu.

## 8. Využití taktilních zařízení v robotice

V průmyslu se s taktilní informací pracuje nejdéle a nejčastěji právě v robotice. Zpočátku byly taktilní snímače používány jen k indikaci uchopení předmětu úchopnou hlavici, později k řízení úchopu, měření prokluzu a popř. k přesnému nastavování polohy objektů.

V blízké budoucnosti se očekává výrazné rozšíření servisních robotů, které mají po-



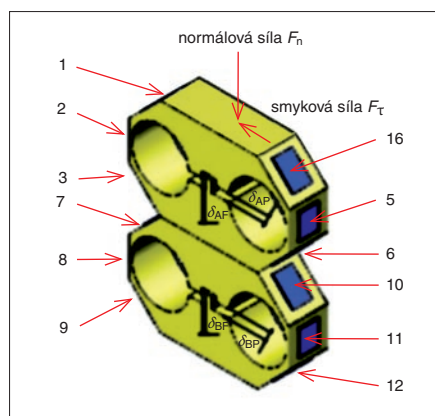
Obr. 7. Použití fólie Pressurex: a) fólie po zatížení, b) převod intenzity zabarvení na působící tlak

elektroda je spojena s nulovým potenciálem a elektrody na horní a dolní straně senzoru jsou připojeny k nábojovým zesilovačům.

## 7. Senzory s optickými vlákny

### 7.1 Principy

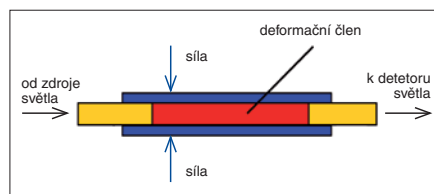
Optický vláknový senzor je tvořen optickým vláknem, v němž vnější vlivy modulují procházející světlo. Lze měnit jeho amplitudu, fázi, polarizaci nebo spektrální vlastnosti. Optický senzor je napájen zdrojem světla (laser, laserová dioda, LED). Velikost změny způsobené měřenou veličinou je analyzována detektorem. Optické vláknové senzory nejsou citlivé na vnější elektromagnetická pole a umožňují přenášet informaci mezi objekty s rozdílnými elektrickými potenciály v širokém pásmu kmitočtů a na velké vzdálenosti.



Obr. 8. Uspořádání snímače typu DOTS (Double Octagon Tactile Sensor; 1 až 12 – tenzometry)



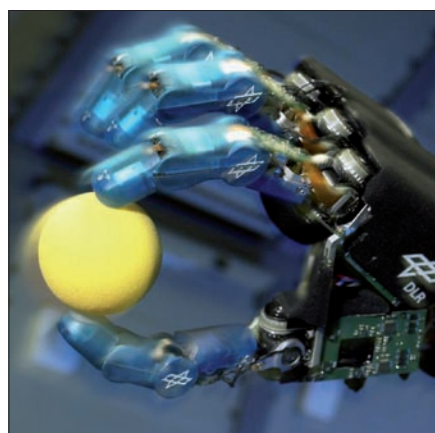
skytovat všestrannou pomoc a podporu lidem v nejrůznějších oblastech, např. v nebezpečných prostorech (chemicky či radioaktivně zamořených nebo jinak životu nebezpečných prostředích), v krizových a různých havarijních situacích, při péči o nemocné a handicapované osoby, při rehabilitacích, popř. jako



Obr. 11. Uspořádání optického taktilního senzoru se změnou útlumu (senzor s deformačním členem)

pomocníci v domácnosti. Aby se roboty mohly pohybovat v přirozeném prostředí vytvořeném pro člověka, musí být vybaveny dostatečně výkonným řídicím systémem s využitím umělé inteligence. V mnoha případech je nezbytná univerzální antropomorfní úchopná hlavice. Hlavice mohou být tříprsté až pětiprsté, vybavené různými typy senzorů.

Tříprstá antropomorfní úchopná hlavice (ruka) se senzory typu DLR vhodná k použití v průmyslu je popsána na <http://www.dactyl.com/scratchpad/pps/tactileArraySensor.html>.



Obr. 12. Antropomorfní čtyřprstá úchopná hlavice se senzory DLR v akci s míčkem

Dále je na <http://robotics.eecs.berkeley.edu> uveden popis čtyřprsté antropomorfní hlavice, jejíž poslední články jsou opět osazeny taktilními senzory DLR a každý kloub je opatřen senzorem momentu. Do ruky jsou spolu se senzory kompletně integrovány pohony a výkonová a komunikační elektronika. Ruka je tudíž aktivně ohebná a schopna činnosti v neznámém prostředí, včetně navazování kontaktu s lidmi. Při zkouškách se v praxi osvědčila robustní, stabilní a rychlá inteligentní úchopná hlavice, která dokáže nejen přenést šálek kávy nebo čaje, ale i spolehlivě chytit hozený míček (obr. 12).

Vrchol využití umělé inteligence v robotice představuje měkký interaktivní lidský robot RI-MAN, vyvinutý v Rikenu, Bio-

-Mimetic Control Research Centru v Japonsku (<http://www.technovelgy.com>, obr. 13). Robot má schopnost uvědomit si lidskou péči a plnit sociální úkoly a může se stát neocitelným partnerským robotem. Komunikuje lidským hlasem, je opatřen čichovým orgánem a dvěma kamerami snímá okolní scénu, v níž se dokáže orientovat v reálném čase, reaguje na povely, jejichž význam si uvědomuje a analyzuje a podle nichž přizpůsobuje svou činnost. Povrch robota je měkký, příjemný na dotyk. Robot je rovněž vybaven taktilními senzory pro biologickou zpětnou vazbu. Je určen pro práci v nemocnicích, sociálních zařízeních, při manipulaci s pacienty a při jejich ošetřování a obsluze.

## 9. Taktilní údaje jako dodatečný zdroj informace

U zdravotně postižených lidí lze taktilní údaje využívat jako dodatečný zdroj informace. Například existuje vibrační opasek pro zrakově postižené, popsáný na <http://www.mobiquitous.com/active-belt-e.html>. Opasek je spojen s modulem GPS, na němž si uživatel nastaví polohu místa, kam směřuje. Směr, kterým se má ubírat, je určen vibracemi příslušného motoru z vibračních motorů umístěných na opasku.

Je známo i mnoho dalších možností, jak využít taktilní informaci. Zde uvedme jen letmo např. speciální oblek pro piloty vojenských letadel informující pilota těž prostřednictvím vibrací (<http://www.namrl.navy.mil/TSAS/DEFAULT.HTM> 93) nebo aerodynamická měření různých objektů, např. letadel nebo postojů lyžařů či cyklistů, kdy proudící vzduch vytváří tlak na povrch objektů, jenž je snímán právě taktilními snímači (<http://www.dactyl.com>, <http://www.pressureprofile.com>). Podobně představují příležitost pro taktilní senzory a snímače tzv. inteligentní (smart) textilie [12].

## 10. Závěr

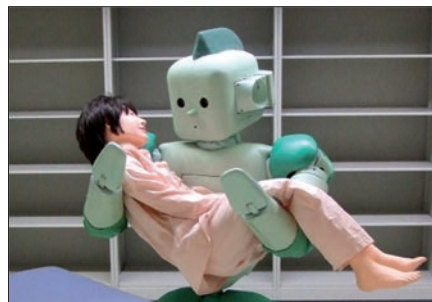
V článku jsou popsány principy a konstrukce taktilních senzorů. Mnohé z nich jsou vhodné jen pro úchopné hlavice robotů, některé lze použít též jako náhradu lidského hmatu. Tímto směrem se v současnosti upírá největší zájem. Zdaleka však není uspokojivě vyřešen problém v oblasti smykových senzorů, a to jak pro roboty, tak především pro náhradu hmatu. Zde navíc ještě přibývá problém s připojením k nervovému systému člověka. Vzhledem k omezenému místu v časopise a šíři a neustálému vývoji daného oboru nelze mít zde uvedený přehled za úplný.

### Literatura:

- [1] *Technical documentation of the conductive composite elastomer CS 57-7 RSC*. Yokohama Rubber Co. Ltd., 1980.
- [2] VOLF, J. et al.: *Transducer for Pressure Distribution Measurement and its Practical Tests*.

In.: The 5<sup>th</sup> World Multi-Conference on Systems, Cybernetics and Informatics SCI 2001, Orlando, 2001, p. 575, ISBN 980-07-7555-2.

- [3] YUJI, J. I. – SHIDA, K.: *A discriminating method of three mixed tactile information using pressure-temperature sensitive materials*. Trans. of Electrical Engineers of Japan, 1999, Part E, vol. 119-E, No. 4.
- [4] Interlink electronics: *Force Sensing Resistors Integration Guide and Evaluation Parts Catalog*, 2006.



Obr. 13. Interaktivní lidský robot RI-MAN v činnosti s figurínou pacienta

- [5] LIU, H. – MEUSEL, P. – HIRZINGER, G.: *A Tactile sensing for the DLR Three-Finger Robot Hand*. In: ISMCR 2004, Houston, 2004.
- [6] JOCKUSH, J. – WALTER, J. – RITTER, H.: *Tactile Sensor System for a Three-Fingered Robot Manipulator*. Department of Computer Science, University of Bielefeld, 1997.
- [7] MATSUMIYA, T. et al.: *Intelligent control method for robot hand based on tactile information by double-octagon tactile sensor*. In: 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 99CH37028), vol. 2. IEEE, Piscataway, 2001.
- [8] VOLF, J. – VLČEK, J.: *New Piezoelectric Tactile Sensors*. In: XV. IMEKO World Kongres., Osaka, 1999, pp. 35–40.
- [9] VOLF, J. – VLČEK, J. – SEMNICKÝ, T.: *The piezoelectric tactile sensor for static force measurement*. In: XVIII IMEKO World Congress, Rio de Janeiro, 2006.
- [10] NAKAMURA, Y. – HANAFUSA, H. – UENO, N.: *A piezoelectric film sensor with uniformly expanded surface to detect tactile information for robotic end-effectors*. In: Proceedings of '85 International Conference on Advanced Robotics, Japan Ind. Robot Assoc., 1985.
- [11] TURÁN, J. – PETRÍK, S.: *Optické vláknové senzory*. ALFA, Bratislava, 1990, ISBN 80-05-00655-1.
- [12] MST News: International newsletter on micro-nano integration, No. 2/05.

### Odkazy na internet:

<http://www.interlinkelec.com>  
<http://www.sensorprod.com>

doc. Ing. Jaromír Volf, DrSc.,  
 ústav přístrojové a řídicí techniky,  
 Fakulta strojní ČVUT v Praze  
 (jaromir.volf@fs.cvut.cz)