

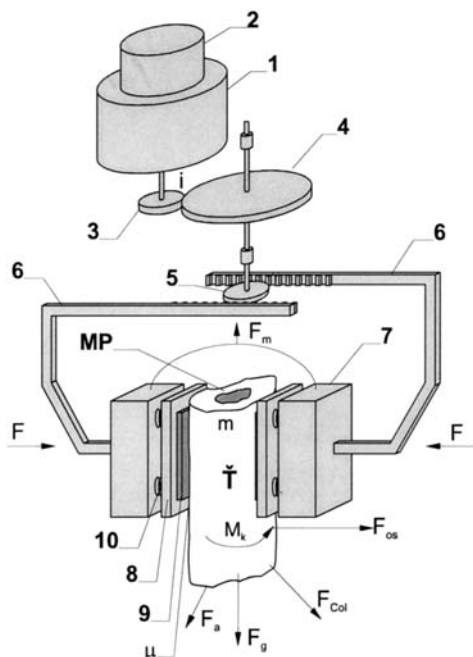
# Tridsať rokov svetovej robotiky (8)

Václav Kalaš

## Vývojové tendencie robotov v oblasti chápadiel a senzorických systémov

### 13. Vývoj chápadiel robotov

Za významný subsystém robotov možno označiť chápádlá, nazývané aj koncové efektoory robotov, uchopovacie hlavice, interakčné prvky robotov, nosiče technologických nástrojov a pod. Výskum a vývoj chápadiel robotov je veľmi razantný a speje v niektorých technologických robotizovaných procesoch k zložitým mechatronickým systémom vybaveným vlastnými pohonmi a senzorickými štruktúrami. Svedčí o tom aj skutočnosť, že napr. v 90-tych rokoch sa na trhu robotov v Nemecku ponúkalo približne 500 vyspelých typov chápadiel. So zreteľom na bezprostrednú interakciu chápadiel s manipulovanými objektmi, chápádlá robotov sú ich najvariabilnejším subsystémom a sú spravidla individuálne riešené pre jednotlivé aplikácie. Prítom pohybové systémy chápadiel sú založené na hydraulických, pneumatických, resp. elektrických servopohonoch, na sile elektromagnetov, na báze prísaviek a na iných princípoch. Chápádlá robotov musia rešpektovať vlastnosti manipulovaných objektov, resp. nástrojov – krehkosť, kvalitu povrchu, teplotu manipulovaného predmetu, chemickú agresivitu, výbušnosť, úpravu hrán, montážnu silu, rýchlosť montáže, počet stupňov voľnosti robota a polohovadla, spôsob napojenia koncových členov chápádlá na robot a ďalšie faktory. Určitým vzorom pre mechanické chápádlá je ľudská ruka s 27 kosťami, 5-prstovými článkami, ktoré majú celkovo 22 stupňov voľnosti. Ak sa uchopovacie schopnosti 5-prstových technických chápadiel berú za základ 100 %, 4-prstové chá-



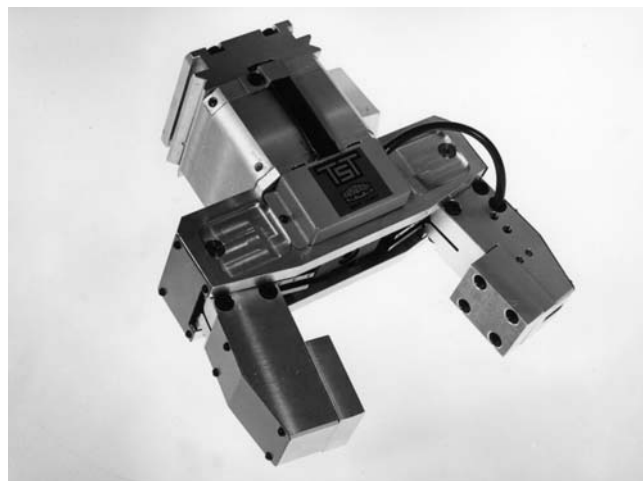
1 – servopohon s inkrementálnym snímačom polohy 2, 3, 4 – reduktor, 5 – ozubený pastorok, 6 – ozubené hrebené, 7 – čeluste chápádlá, 8 – prítlačné doštičky čelustí s trecím obloženie 9, 10 – pružné členy na extrémne mäkké uchopovanie manipulovaného predmetu MP s hmotnosťou  $m$  a s ťažiskom  $\check{T}$

Obr.44 Zjednodušená kinematická štruktúra laboratórneho dvojčelustového chápádlá s translačným pohybom čelustí

padlá, ak ide o ich schopnosti, majú 99 %, 3-prstové 90 % a 2-prstové 40 %. Už samotné štandardné chápádlá robotov môžu disponovať rôznymi kinematickými štruktúrami [47].

V chápádlá robota pôsobí rad síl, krútiacich momentov a tribologických procesov. Na ilustráciu je na obr. 44 uvedená možná štruktúra dvojčelustového laboratórneho chápádlá podľa našej práce [48]. Na teleso MP pôsobí gravitačná sila  $F_g$ , prítlačné sily  $F$ , sila od dynamických procesov  $F_a$ , motorická sila  $F_m$  vyvolaná pohybmi zápastia robota, Coriolisova sila  $F_{col}$ , odstredivá sila  $F_{os}$ , trecie, resp. frikčné a šmykové sily s koeficientom trenia  $\mu$ . Okrem toho pôsobia na chápádlá v obraze nevyznačené tangenciálne sily, ako aj sily odporu prostredia pri pohybe chápádlá a pod. Na teleso MP môže pôsobiť i rad krútiacich a klopných momentov, napr. moment  $M_k$  od ovality telesa, nesymetrického rozloženia hmoty atď.

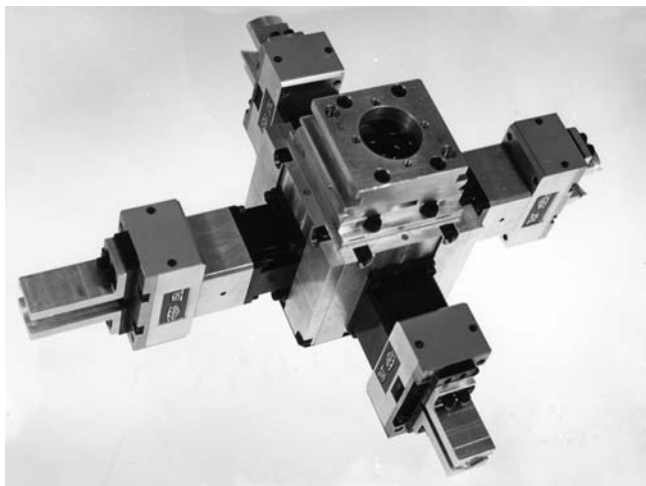
V bývalom Československu mal gesciu za výskum a vývoj chápadiel robotov Výskumný ústav náradia (VÚNAR) Nové Zámky. Tento ústav navrhol a vyvinul rad štandardných priemyselných pneumatických a elektrických chápadiel robotov vrátane ich programovacích prostriedkov na báze reprezentácie 2D a 3D objektov manipulačno-montážnych komplexov formou hierarchických dátových štruktúr s aplikáciou matematického aparátu kvadrantových a oktantových stromov [49].



Obr.45 Štandardné pneumatické dvojčelustové chápádlá robota s upínacou silou 1000 N – VÚNAR (r. 1986)

Na ilustráciu je z produkcie VÚNAR-u na obr. 45 uvedená štandardné pneumatické pákové dvojčelustové chápádlá zo zliatin Al, typ ŠCH 2.0.10-P, kde v hranolovej hornej časti je pneumatický dvojčinný servovalec s piestom. Pod ním sa nachádza teleso pákového upínacieho mechanizmu s čelustami. Chápádlá disponuje signalizačnými a kontrolnými prvkami so snímaním prítomnosti uchopeného predmetu a koncového stavu čelustí. Parametre chápádlá boli: upínacia sila pri tlaku 0,5 MPa 1000 N, hmotnosť chápádlá 3,9 kg a prestavenie čelustí do 60 mm.

Na rýchle, najmä montážne robotizované procesy bola vo VÚNAR-e vyvinutá otočná 4-polohová revolverová hlava RH 4-0.10-P, ktorá slúži ako nosič rôznych chápadiel, resp. nástrojov (obr. 46), ktorá disponuje signalizačnými a kontrolnými prvkami.

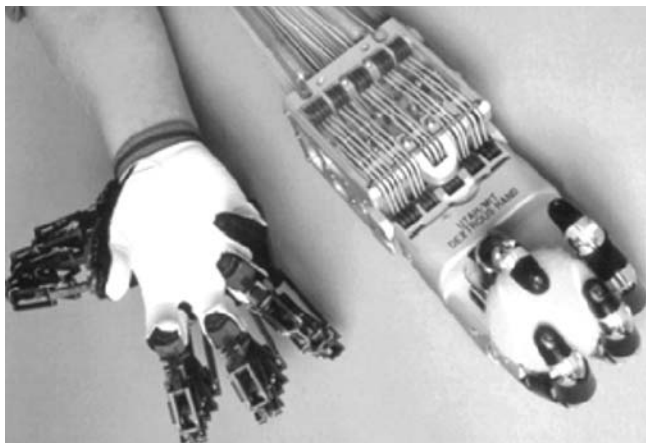


**Obr.46 Otočná robotická revolverová 4-polohová hlava RH 4-0.10-P pre rôzne chápádlá a špeciálne nástroje – VÚNAR (r. 1986)**

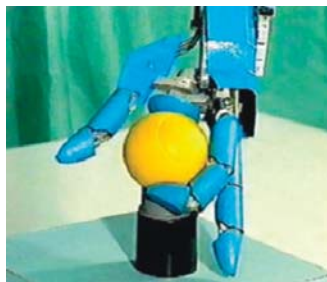
Na otáčanie a polohovanie sa využíva rotácia zápästia robota. V nosnom telese hlavy je pneumatický rozvod na všetky ramená a tiež zabezpečený prenos elektronických signálov.

Okrem toho boli na uvedenom pracovisku vyvinuté i zásobníky na automatickú výmenu chápadiel, resp. špeciálnych nástrojov, ako aj systém variabilných chápádlových jednotiek FLEXUS, resp. skrutkovacie systémy pre montážne roboty s československými DC motormi HSM, harmonickými reduktormi a nastaviteľnými momentovými spojkami na presné ťahovanie skrutkových spojov [50], [51]. Prispôsobivosť a flexibilita chápadiel robotov totiž ovplyvňuje do značnej miery flexibilitu celého robotizovaného komplexu.

Úkony, ktoré sa kladú na chápádlá robotov, vytvárajú tendencie smerujúce k používaniu univerzálnych sofistikovaných chápadiel, realizovaných obvykle s viac ako dvoma čeľuťami, resp. prstami, ktoré sú vybavené vlastnými senzorickými systémami, ako sú poloha prstov, senzory prítlačných síl, sklzu, vzdialenosti chápadla od manipulovaného predmetu a pod. O enormnom rozmachu a vysokej úrovni problematiky chápadiel robotov svedčia aj materiály [52], [53], [54], v ktorých sa uvádzajú špičkové chápádlá robotov z 80-tych a 90-tych rokov, napr. The Salisbury Hand - 3-prstové chápadlo schopné manipulovať aj s tvarovo veľmi rozdielnymi predmetmi, používajúce biomechanické princípy, princípy synergetiky, umelého riadenia reflexov, vnímania tvaru uchopovaného predmetu na báze taktilných, t. j. dotkových snímačov, princíпов učenia a expertných systémov, princíпов neurónových sietí a pod.; The Utah/MIT Hand – 4-prstové flexibilné antropomorfné chápadlo schopné strihať klasickými nožnicami papier (obr. 47); The Heap Hand – Eye Arm at Penn – 3-prstové



**Obr.47 Štvorprstové flexibilné antropomorfné chápadlo UTAH/MIT Hand (Jacobsen 1986)**



**Obr.48 Chápadlo UB Robot Hand II s polohovými a silovými senzorickými systémami**



**Obr.49 Štvorprstové chápadlo USA – MIT na báze umelých svalov s priemerom prstov 12 mm, otáčajúce skrutkou**

chápadlo, ktorého prsty a dlaň majú plošné senzory FSR; The UB Robot Hand II (obr. 48) s polohovým a silovým senzorickým systémom; The University of Bologna Robot Hand Project aplikujúci v prstoch miniatúrne silovo-momentové snímače; The Belgraden USC Robot Hand s reflexom a citlivosťou ľudskej ruky vychádzajúce z jej biomechanických modelov a ďalšie.

Za pozoruhodné možno v oblasti chápadiel (ale aj celých minirobotov) označiť chápádlá na báze umelých svalov. Na obr. 49 je uvedené USA MIT 4-prstové, mimoriadne flexibilné chápadlo, riadené pomocou pneumatických, resp. hydraulických tlakových médií [53]. Chápadlo má v každom prste tri pozdĺžne segmentové komory, rovnobežné s axiálnou osou prstov, v ktorých možno riadiť tlak médií. Prsty sú zo špeciálnej gumy, ktorá je spevnená vláknami proti radiálnej deformácii. Prsty chápadla sa môžu ohnúť do všetkých možných smerov. Môžu mať priemer od 1 do 20 mm. Prsty sa dokážu v určitom rozsahu otáčať okolo svojej axiálnej osi. Spojením elementov typu prstov do pozdĺžnych kaskád možno realizovať hadovité pohyby. Uvedené chápadlo má 12 stupňov voľnosti, pričom všetky 4 prsty sú v tomto prípade riadené paralelne. Na uchopenie objektu treba iba hrubé nastavenie polohy a orientácie, lebo chápadlo má veľmi dobré adaptívne vlastnosti na konfiguráciu manipulovaných predmetov. S niektorými ďalšími aspektmi chápadiel robotov sa ešte stretneme v ďalších častiach nášho seriálu, pričom o chápádlách robotov na báze tvarovej pamäte sme sa už zmienili v kapitole (5).

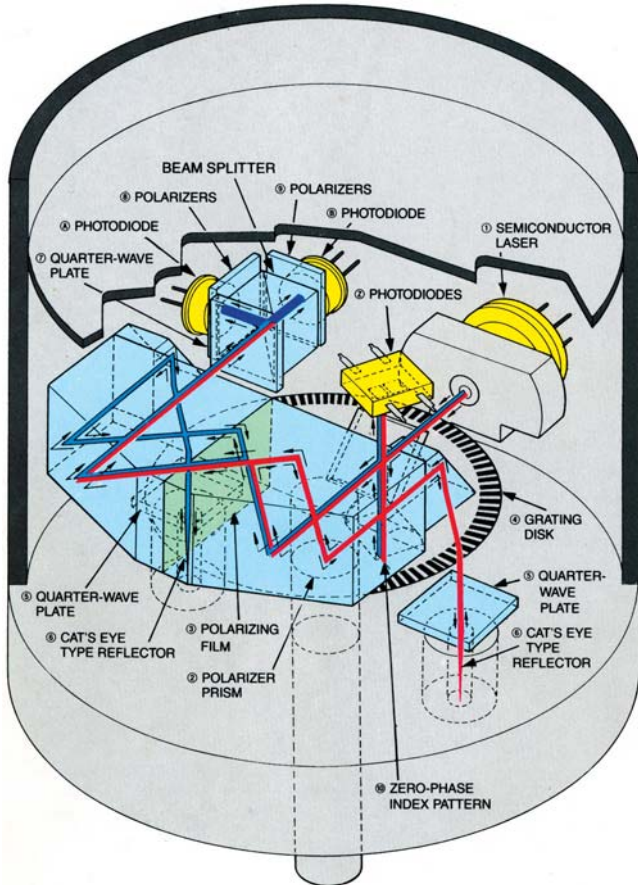
## 14. Vývoj senzorických systémov robotov

Senzorické systémy robotov možno rozdeliť do dvoch hlavných tried, a to na tzv. vnútorné senzorické systémy, ktoré súvisia so samotným robotom, napr. získavanie informácií s galvanickým oddelením o veličinách typu napätie, prúd, frekvencia, výkon, poloha ramien, rýchlosti, zrýchlenia, momentu, resp. ťažnej sily a pod. V tejto oblasti sú tendencie dopracovať sa k niektorým signálom (napr. momentu motora) podľa možnosti bez bezprostredných snímačov a získať vyžadované informácie z ľahšie merateľných stavových premenných systému, napr. na báze tzv. pozorovateľov [55], [56].

Druhú triedu tzv. vonkajších senzorických systémov robotov prezentujú systémy, ktoré funkčne súvisia s technologickými procesmi. Táto trieda senzorických systémov je nesmierne široká, je v nej búrlivý pokrok, a to najmä v oblasti mikroelektronických, optoelektronických, laserových, indukčných, kapacitných, ultrazvukových, tenzometrických, magnetostrikčných, vizuálnych a iných systémov [57] až [61]. Pritom pod senzorickými systémami rozumieme vlastný snímač na vstupe systému spolu s elektronickou časťou na príslušné spracovanie signálov, ktoré sa ďalej využívajú pri riadení procesu.

### 14.1 Senzorické systémy robotov prvej triedy

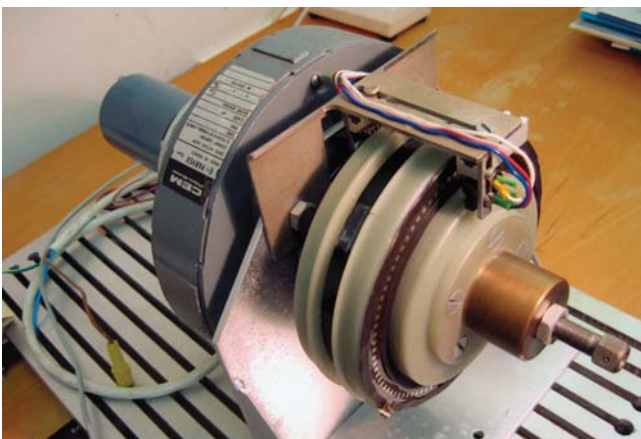
Jeden zo základných senzorických systémov prvej triedy je rotačný inkrementálny opticko-elektronický, dnes už tradičný senzorický systém polohy a rýchlosti IRC, z ktorého celkový počet



Obr.50 Inkrementálny rotačný laserový senzorický systém polohy firmy CANON USA

impulzov dáva informáciu o polohe a frekvencia impulzov informáciu o rýchlosti servopohonu. Hranice týchto systémov bez elektronického rozmnožovania impulzov sú približne 6000 impulzov na otáčku. V 80-tych rokoch nastalo v tejto oblasti skvalitnenie, a to vznikom inkrementálnych snímačov na báze polovodičových laserov a CD technológií. Tieto systémy umožňujú zvýšiť rozlišovaciu schopnosť aj o niekoľko rádov. Jednou z priekopníckych firiem v tejto oblasti bola firma CANON USA, ktorá dala na trh rad systémov na tomto princípe. Na obr. 50 je uvedený fyzikálny princíp uvažovaného systému, pričom tieto senzorické systémy majú vynikajúce mechanické i elektrické parametre [62].

Zo senzorických systémov prvej triedy, ktoré úzko súvisia s pohybovými parametrami robotov, uvedme ešte aspoň pôvodný integrovaný senzorický systém rotačného zrýchlenia, rýchlosti, polohy a momentu motora [63], ktorý vznikol na KAR FEI STU v Bratislave (obr. 51 vpravo). Pomocou tohto bezkontaktného

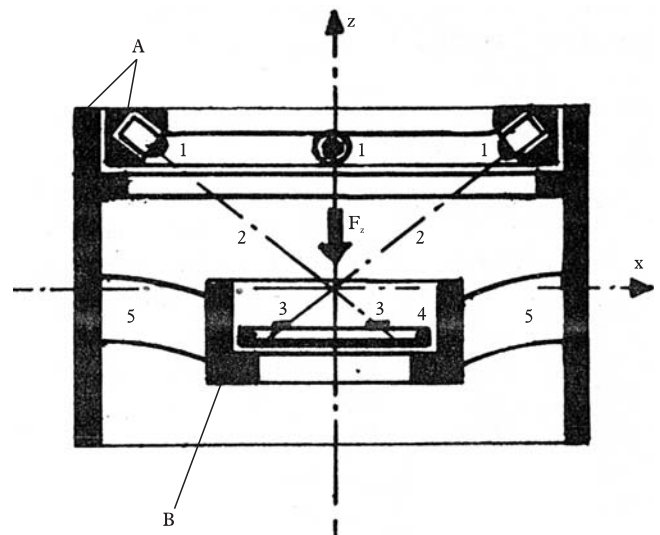


Obr.51 Integrovaný rotačný senzorický systém KAR FEI STU v Bratislave na získavanie signálov zrýchlenia, rýchlosti a polohy servopohonu (r. 1998)

senzorického systému možno okrem iného na báze teórie parametrickej invariantnosti získať štruktúry servopohonov robotov odolné voči zmenám momentu zotrvačnosti, zaťaženia a trení, čím sa získajú servopohony prakticky s referenčnými responziami, resp. tak možno riešiť prípadnú problematiku torzných kmitov v mechatronických systémoch. Aplikácia týchto riadiacich štruktúr uvedených v [64] umožňuje v robotike zvyšovanie rýchlosti polohovania a rozširovanie oblasti parametrickej stability systému. Tento systém je založený na báze pevného a pružného rotačného disku s ich vzájomnou magnetickou väzbou. Iné typy rotačných akcelerometrov sú uvedené napr. v [65], [66].

#### 14.2 Senzorické systémy robotov druhej triedy

Zo širokej palety týchto systémov uvedieme aspoň významné 6-zložkové silovo-momentové senzorické systémy, ktoré v historickom vývoji robotiky zohrali významnú rolu, napr. v adaptívnych zvraciacich procesoch s elektrickým oblúkom. Neskôr prenikli do montážnych procesov, kde umožňujú riešiť i problematiku presnej montáže s nie celkom presnými robotmi. Ide o senzorické systémy založené na elastickej miniatúrnej deformácii mechanických pružných členov. V týchto systémoch možno pri pôsobení všeobecnej sily na tzv. vstupnú prírubu na výstupe získať zložky vektorového rozkladu tejto sily  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  do súradnicového systému  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , ktorý je pevne zviazaný s pevnou prírubou, spojenou so zápästím robota. Okrem toho tento systém poskytuje na výstupe ďalšiu trojicu informácií  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  o momentoch vyvolaných všeobecnou silou. Pomocou tejto šiestice informácií možno zabezpečiť adaptívne montážne činnosti robotizovaných pracovísk. Tieto materiálové aj technologicky náročné senzorické systémy prešli významným vývojom, pričom v súčasnosti používajú najmodernejšie elektronické prvky. V bývalom Československu sa výskumne a vývojovo 6-zložkovým silovo-momentovým senzorickým systémom venovala jednak VÚMA Nové Mesto nad Váhom, orientovaná na tzv. krížové tenzometrické systémy, jednak Ústav technickej kybernetiky SAV (ÚTK), ktorý sa orientoval na 6-zložkové silovo-momentové tenzometrické systémy tzv. škatuľového typu.



Obr.52 Principiálne usporiadanie 6-zložkového silovo-momentového senzorického systému s laserovými diódami a CCD maticovým snímačom

Na obr. 52 je uvedený CCD maticový 6-zložkový silovo-momentový snímač, kde A je vonkajšia valcová prírubu spojená so zápästím robota, na ktorej sú umiestnené v intervaloch  $90^\circ$  štyri laserové diódy 1 s fokusacnou optikou; B je vnútorná vstupná prírubu spojená s chápadlom robota, na ktorej je umiestnený štvorcový maticový CCD snímač 4. Medzi oboma prírubami sa nachádzajú deformáčne členy 5. Laserové lúče 2 dopadajú na CCD snímač 4 a vytvárajú svetelné stopy 3. Pri pôsobení sily  $F_z$  (v osi  $z$ ) repre-

zentujú tieto štyri stopy na matici vrcholy štvorca. Koordináty vrcholov štvorca sa menia lineárne s veľkosťou sily  $F_z$ . Ak by na prírubu B pôsobila napr. sila v osi x, štvorec stôp vrcholov štvorca by sa posunul v smere osi x. Ak na prírubu B by pôsobil moment v rovine x-y, tak by sa vrcholy štvorca pootočili. Pri pôsobení všeobecnej sily na prírubu B nastane deformácia štvorca na všeobecný posunutý, príp. pootočený štvoruholník. Z vrcholových koordinát štvoruholníka na CCD matici určuje vyhodnocovacia elektronika zložky sily a momentov vzhľadom na súradnicový systém x, y, z [67], [68]. Systém má štyri deformačné členy. Z matematického hľadiska by ako deformačné členy stačili tri laserové diódy rozmiestnené po obvode po 120°. Pri aplikácii štvorbodového systému sa však podstatne zjednoduší algoritmus výpočtu jednotlivých komponentov síl a momentov. Navyše získaná redundancia systému je vhodná aj z hľadiska spoľahlivosti zariadenia.

Vyhodnocovacia elektronika týchto systémov, zabudovaná priamo v telese systému, je tiež mimoriadne náročná, pretože musí riešiť aj interakcie signálov, najmä potlačenie interakcie jednotlivých výstupných kanálov prostredníctvom tzv. kalibračnej matice. Treba zabezpečiť aj kompenzáciu ťaže chápadla a postupnú únavu a hysteréziu deformačných členov [67]. Tieto systémy môžu pri vhodnej modifikácii v robotickom systéme zabezpečovať aj funkciu tzv. bezpečnostnej konzoly, t. j. ochranu pri prípadnej mechanickej kolízii. Tieto senzorické systémy dosahujú z hľadiska rozlišovacej schopnosti hodnoty 0,1 N, resp. 0,1 Nm a lepšiu. Postupne sa v náročných robotických systémoch spojili uvažované senzory s vizuálnymi systémami, čo výrazne zdvihlo úroveň najmä montážnych robotických komplexov. Rad mimoriadne vyspelých senzorických systémov rôznych typov pre inteligentné robotizované procesy je napr. v [52], [53]. Medzi ďalšie významné senzorické systémy robotov druhej triedy patria vizuálne systémy, s ktorými sa stretneme v ďalších kapitolách nášho seriálu.

## Literatúra

- [47] MATIČKA, R., TALÁČKO, J.: Mechanizmy manipulátorů a průmyslových robotů. SNTL Praha, 1990.
- [48] KALAŠ, V., GERS, E.: The Slipless Robot Gripper Systems Using Fuzzy Logic, Proceedings No. 12th Conference Process Control '99, Volume 1, s. 356 – 359, Slovak University of Technology, Bratislava, 1999.
- [49] VÖRÖS, J. a kol.: Špecializované náradie a chápadlá pre robotizované technologické pracoviská. Výskumná správa, VÚNAR, Nové Zámky, 1987.
- [50] Firemné katalógy bývalého VÚNAR, Nové Zámky.
- [51] VALENČÍK, Š.: Integrované multifunkčné chápadlá priemyselných robotov. In.: AT&P journal, 2001, č. 2, s. 62 – 64.
- [52] That Machines Think – The Age of Intelligent Machines. The MIT Press Video Proceedings, Massachusetts, USA.
- [53] International Conference on Robotics and Automation '91, Video Proceedings, IEEE-USA, 1991.
- [54] STEINMETZ, J.: Artificial Hands – Assembly Strategies and Nondholomic Motion Planning. These No 1243, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1994.
- [55] JOVANKOVIČ, J., ŽALMAN, M.: Virtuálne senzory magnetického toku asynchrónnych motorov. In.: AT&P journal, 2003, č. 2, s. 87 – 89.
- [56] JOVANKOVIČ, J., ŽALMAN, M.: Pozorovanie uhlovej rýchlosti asynchrónneho motora pomocou dopredných neurónových sietí. In.: AT&P journal, 2002, č. 2, s. 71 – 73
- [57] HENDERSON, T.: Traditional and Non-Traditional Robotic Sensors. Springer Verlag GmbH, 1990
- [58] NICHOLS, H. a kol.: Advanced Tactile Sensing for Robotics. World Scientific, Singapore, New Jersey, London, 1992.
- [59] ŠTURCEL, J.: Snímače a převodníky. STU Bratislava, 2002.
- [60] KLEIN, A.: Sensors and Data Fusion Concepts and Applications. SPIE Bellingham, Washington, 1993.
- [61] GÖBELL, W., HESSE, J., ZEMEL, J.: Sensors, A Comprehensive Survey. In.: 8 Volumes, Weinheim, Verlag GmbH, 1989 – 1994.
- [62] Firemné katalógy firmy Canon USA Inc. Components Division – Laser Rotary Encoder
- [63] KUŽMA, O., KALAŠ, V.: A Novel Integrated Angular Acceleration, Velocity and Position Sensor. In.: Electrical Journal, 2001, No. 1 – 2, s. 12 – 18.
- [64] KALAŠ, V.: Komplexná invariantnosť ako prostriedok robustifikácie mechatronických systémov. In.: AT&P journal, 2000, č. 2, s. 66 – 68.
- [65] GODLER, I. a kol.: A Novel Rotary Acceleration Sensor. In.: IEEE Control Systems, February, s. 56 – 60.
- [66] SKALA, B. a kol.: Rotační akcelerometr – cesta k měření rychlých kmitů a točivého momentu pohonu. In.: Elektro, 2004, č. 2, s. 4 – 7.
- [67] SÁSIK, J.: Testovanie a kalibrácia viackomponentných snímačov síl a momentov pre roboty. In.: Strojirenství, 1988, č. 1, s. 56 – 66.
- [68] KVASNICA, M.: Six-Component Force – Torque Sensing by Means of One CCD or PSD. In.: Proceedings of the Second International Symposium on Measurement and Control In Robotics ISMCR '92, AIST Tsukuba, 1992.

*Pokračovanie v budúcom čísle.*

**prof. Ing. Václav Kalaš, DrSc.**

25

**Slovenská technická univerzita  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava  
e-mail: vaclav.kalas@stuba.sk**