

Inerciálně stabilizovaná kamerová základna pro bezpilotní letoun

Zdeněk Hurák a kol.

V článku je představen vývojový projekt gyroskopicky a vizuálně stabilizované kamerové základny pro bezpilotní letoun s automatickým sledováním pozemních cílů, který řeší tým složený převážně z pracovníků ČVUT na zakázku pro VTÚL&PVO a jím vyvíjený bezpilotní letoun Manta. Projekt právě je v již pokročilé fázi dokončování řídicího systému a zkoušek prvního funkčního vzoru. Hlavním cílem článku tudíž je seznámit odbornou veřejnost s dosaženými výsledky i s *know-how* získaným řešitelským týmem. Představit projekt je o to zajímavější, že hlavními vývojáři použitých elektronických podsystémů byli studenti katedry řídicí techniky směřující touto prací k získání titulu inženýra elektrotechniky.

1. Úvod: úloha stabilizace optické osy a projekt Mamok

1.1 Obecný popis úlohy inerciální stabilizace v systému sledování cílů

Úkolem systému inerciální stabilizace a sledování cílů je směřovat optickou osu daného zařízení (kamery, laserového dálkoměru či označovače) při co nejmenší citlivosti směru osy na pohyb základny, na kterou je zařízení připevněno (typicky jde o letoun, automobil, loď). Při použití kamery lze uvedené zadání přeformulovat následovně: „Nasměřuj kameru tak, aby se obraz objektu zájmu nacházel ve středu zorného pole, a zajisti, že tam zůstane po požadovanou dobu a nebude se v zorném poli příliš rychle pohybovat.“

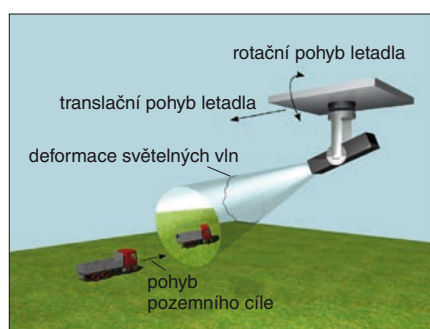
Tři základní typy vnějších rušivých vlivů, které se budou snažit daný úkol znesnadnit, jsou:

- deformace obrazu při průchodu atmosférou,
- inerciální rotace nosiče (např. po průletu oblastí turbulence),
- vzájemný pohyb nosiče a cíle (ve směru kolmém na jejich spojnici),

ukázané na obr. 1 pro případ kamery umístěné na letounu a sledující nákladní automobil na zemi.

První z uvedených typů rušení nebývá v leteckých systémech běžně kompenzován. Jeho detekce i kompenzace by vyžadovaly určitý systém adaptivní optiky, tj. obdobu systémů nyní již běžně používaných v astronomických dalekohledech.

Rušivé vlivy druhého typu lze detekovat inerciálními zařízeními, typicky gyroskopickými snímači inerciální úhlové rychlosti, připevněnými přímo ke kameře. Kompenzovány mohou být natáčením kamery při použití řídicích závěsů. S ohledem na složitost systému jsou při jeho použití v letadlech užívány běžně pouze dva závěsy, což znamená ome-



Obr. 1. Ilustrace zadání úlohy inerciální stabilizace optoelektronického zařízení a základní rušivé vlivy posouvající sledovaný cíl ze středu zorného pole kamery

zené možnosti kompenzace. Některé systémy určené k použití na zemi, např. pro mobilní komunikační antény, používají tři závěsy.

Rušení třetího typu se běžně detekuje při použití určitého systému počítačového vidění. Pohyb nosiče (letounu) sice může být systému stabilizace optické osy znám, avšak pohyb pozemního objektu nikoliv. Vzhledem k omezeným rychlostem pohybu obou objektů se lze bez problémů spolehnout na počítačovou vizuální zpětnou vazbu, a tak vytvořit řídicí smyčku nadřazenou rychlé inerciální smyčce.

1.2 Stručný přehled stavu v dané oblasti

Některé význačné články z období 70. až 90. let dvacátého století byly sesbírány v kolekci [7]. Že je téma dosud aktuální, dokládá vydání časopisu *IEEE Control Systems Magazine* z února 2008, jako celek věnované problematice inerciální stabilizace. Klíčové přehledové články [6], [4] a [1] jsou tak v současnosti asi nejaktuálnějším popisem situace v dané oblasti i seznamem odkazů na další důležitou literaturu.

Modely dynamiky systému byly odvozeny již na přelomu 60. a 70. let minulého století ([9], [10]). K získání náhledu lze využít i novější články [4] a [6], které ale buď nepřihlížejí k pohybu základny, nebo berou v úvahu pouze jednu osu, či se zaměřují pouze na kinematiku.

Detailní a čtivý rozbor teoretických aspektů stabilizace systému přináší [8] v letošním srpnovém vydání již zmíněného časopisu. Ukazuje se, že nelinearita systému, daná jeho geometrií, vede při použití jednoduchých lineárních regulátorů ke ztrátě stability.

1.3 Historie projektu

V rámci projektu Mamok, sponzorovaného MPO ČR a koordinovaného Vojenským technickým ústavem letectva a protivzdušné obrany (VTÚL&PVO), jehož cílem je především vyvinout nový vojenský bezpilotní letoun Manta (obr. 2) coby následovníka úspěšného letounu Sojka (obr. 3), je pro nový letoun vyvíjena inerciálně stabilizovaná kamerová platforma s možností automaticky sledovat objekt prostřednictvím systému počítačového vidění. Požadavkem je vybavit letoun kamerou pro denní vidění, infračervenou kamerou pro noční vidění a laserovým dálkoměrem.



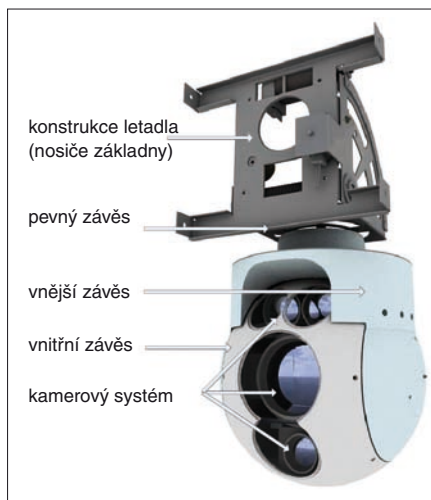
Obr. 2. Nový bezpilotní letoun Manta



Obr. 3. Bepilotní letoun Sojka při vzletu z mobilní vypouštěcí plošiny

Vývoj jako celek byl v létě 2006 v rámci komerční zakázky svěřen týmu pracovníků z Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze (FEL ČVUT), vedenému prof. V. Hlaváčem. Malý tým se skládá ze specialistů na řídicí systémy (katedra řídicí techniky) a specialis-

tů na počítačové vidění (Centrum strojového vnímání), pozván do týmu byl i konstruktér-strojář Ing. Milan Bartoš, CSc., z pražské firmy Opten. Tým byl průběžně doplňován velmi šikovnými studenty FEL ČVUT, pracujícími na těchto pracovištích na svých di-



Obr. 4. Pohled na prostorový model hlavičky základny

plomových pracích. Jejich zapojení v daném projektu bylo naprosto konkrétní a výsledky doslova hmatatelné – celý elektronický systém inerciální stabilizace vznikl v rámci špičkových diplomových prací [11] a [13].

Práce na inerciálně stabilizované kamerové základně směřuje k zakončení a předání zadavateli na konci roku 2008. V současnosti je již dokončen jak samotný systém inerciální stabilizace, tak i systém zpracování obrazu (vizuální rozpoznání cíle) a v nadcházejících měsících zbývá tyto dva systémy propojit a rozšířit stabilizace o automatické nasměrování a sledování cíle. Podrobnější technické informace o projektu jsou na jeho webové stránce (<http://dce.felk.cvut.cz/mamok>).

2. Mechanické uspořádání

Pro zadaný režim používání systému byla nakonec vybrána běžná konfigurace se dvěma osami rotace: okolo svislé (azimutální) osy z se otáčí vnější závěs, tím je unášen i závěs vnitřní, který se vzhledem k vnějšímu závěsu otáčí okolo vodorovné osy y (elevační, viz dále obr. 7). Použité uspořádání má velmi špatné vlastnosti, jestliže by mělo být používáno pro sledování pozemních objektů přímo pod letounem – v důsledku přítomnosti singularity se v tomto směru ztrácí jeden stupeň volnosti, a systém tak nemůže efektivně kompenzovat nežádoucí rotační pohyby letounu. Funkční vzor zařízení (obr. 4, obr. 5) vytvořil Milan Bartoš (Opten s. r. o.).

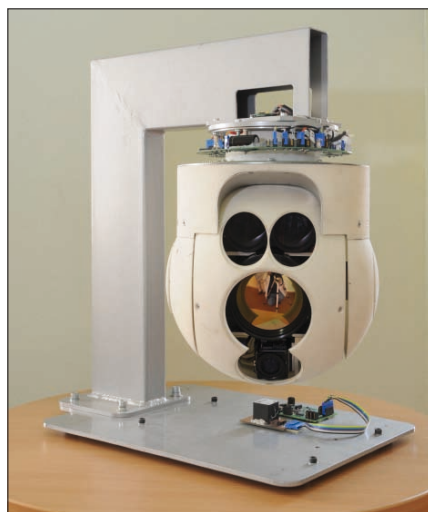
V následující kapitole jsou stručně zmíněny hlavní nakupované komponenty (subsystémy) základny. Zájemce o podrobnější údaje a popř. o zkušenosti s používáním

komponent lze odkázat na [11] a [13] či na webové stránky projektu (<http://dce.felk.cvut.cz/mamok>).

3. Hlavní nakupované komponenty základny

3.1 Motory

Zvoleny byly přímé momentové motory (angl. *direct drives*). Tato volba je pro danou úlohu naprosto zásadní, neboť absence me-



Obr. 5. Vyvinutý funkční vzor inerciálně stabilizované základny

chanického převodu odstraňuje kinematickou vazbu mezi spojovanými mechanickými částmi. V důsledku toho se např. zatáčení letounu (rotace kolem svislé osy) nepřenáší na rotaci vnějšího závěsu okolo stejné osy, a ten zůstává v inerciálním prostoru stát (přímá demonstrace druhého Newtonova zákona a princip tzv. hmotové stabilizace). Paradoxně tedy čím těžší náklad (kamery), tím snáze lze dosáhnout inerciální stabilizace hlavičky vzhledem k dané ose. Další předností motorů použitého typu je jejich velmi malá délka.

Výrobci uvedených motorů není mnoho. Zvažovány byly nabídky firem Axsys a Moog. Nakonec byly vybrány dva motory firmy Moog typu 2910B1. Výrobce v katalogu dostupném na internetu uvádí maximální kroučící moment asi $0,42 \text{ N}\cdot\text{m}$ a hodnotu motorové konstanty $0,07 \text{ N}^2\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$. Celý motor o vnitřním průměru asi 4 a vnějším asi 7 cm tvoří dva prstence, rotor a stator. Z hlediska řízení se chovají jako běžné stejnosměrné motory s permanentním magnetem.

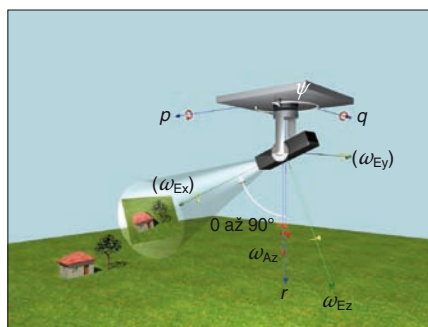
Snad jediným negativem této volby jsou administrativní úkony nutné k získání povolení k nákupu motorů vybraného typu (v USA jsou považovány za tzv. vojenskou techniku) a dodací doba v řádu měsíců.

3.2 Kluzné přenosové kroužky

Velmi užitečným zařízením, které umožňuje splnit požadavek na „nekonečné“ otáče-



Obr. 6. Užitečný náklad základny (zleva): RGB kamera FCB-IX pro denní vidění, IR kamera Miricle 110K pro noční vidění, laserový dálkoměr Vectronix LRF42

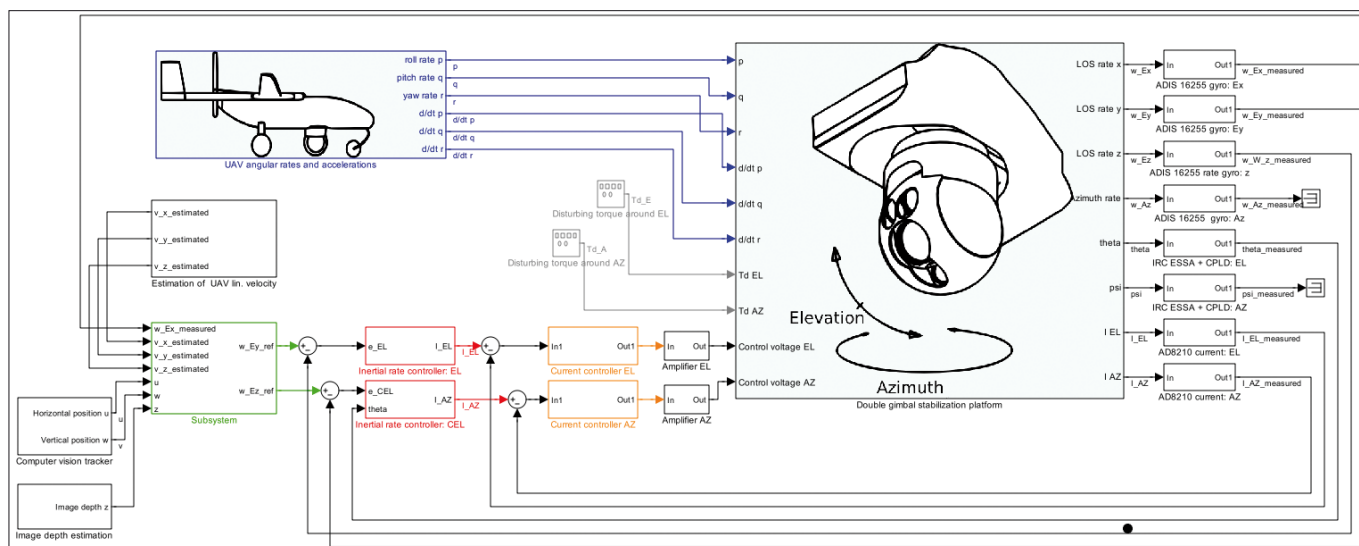


Obr. 7. Princip inerciální stabilizace kamery umístěné na letounu: změřená inerciální úhlová rychlost ω_{Ey} okolo elevační osy kamery je kompenzována elevačním motorem, změřená inerciální úhlová rychlost ω_{Ez} okolo svislé osy kamery je kompenzována azimutálním motorem

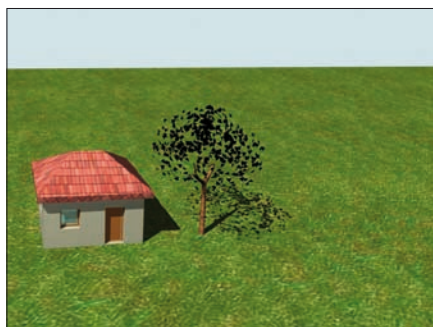
ní se vnějšího závěsu okolo svislé (azimutální) osy, jsou kluzné kroužky pro přenos elektrických signálů. Zvolený typ od firmy Moog přenáší 24 signálů při proudové zatížitelnosti jedné přenosové cesty až 2 A s garantovaným odporem $60 \text{ m}\Omega$.

3.3 Snímače

Použity jsou snímače inerciální úhlové rychlosti ADIS16255 (Analog Devices) s nastavitelným měřicím rozsahem až $\pm 320^\circ/\text{s}$, rozlišením 14 b a frekvencí vzorkování až 255 Hz (šířka pásma 50 Hz), vyrobené technikou MEMS. Tři snímače jsou umístěny na těle kamery tak, aby měřily rychlost otáčení okolo všech tří hlavních os (příčná elevační osa, elevační osa a dlouhá optická osa). Na-



Obr. 8. Blokové schéma celkového systému inerciální stabilizace a automatického sledování s využitím počítačového vidění (v prostředí Simulink)



Obr. 9. Sledovaný dům je v zorném poli přibližně nalevo a cílem je „umístit“ jej doprostřed: systém počítačového vidění detekuje regulační odchylku pouze v horizontálním směru, a tak zadá požadavek

víc je na vnější závěs připevněn čtvrtý snímač, který měří inerciální úhlovou rychlost okolo azimutální osy závěsu. Pro potřeby základní inerciální stabilizace však stačí první dva z uvedených snímačů. Pro účely manuálního ovládání jsou otáčivé osy vybaveny také inkrementálními snímači polohy firmy ESSA Praha s 50 000 pulzy na otáčku (pro vlastní úlohu inerciální stabilizace nepotřebnými).

3.4 Procesor

Zvolen byl velmi výkonný procesor LPC2119 od NXP (dříve Philips), založený na jádru ARM7. Kromě technických parametrů jako podpora CAN, SPI, UART, JTAG či PWM byla důvodem velká zkušenost s tímto typem z dřívějších projektů na katedře řídicí techniky FEL, např. projektu vývoje kráčejícího robota Spejbl, vedeného Markem Pecou (více na <http://dce.felk.cvut.cz/spejbl>), což velmi usnadnilo začátek vývojových prací.

3.5 Užitečný náklad

Užitečný náklad základny tvoří infračervená (IR) kamera Miricle 110K pro noční vidění, klasická kamera FCB-IX s rozkladem



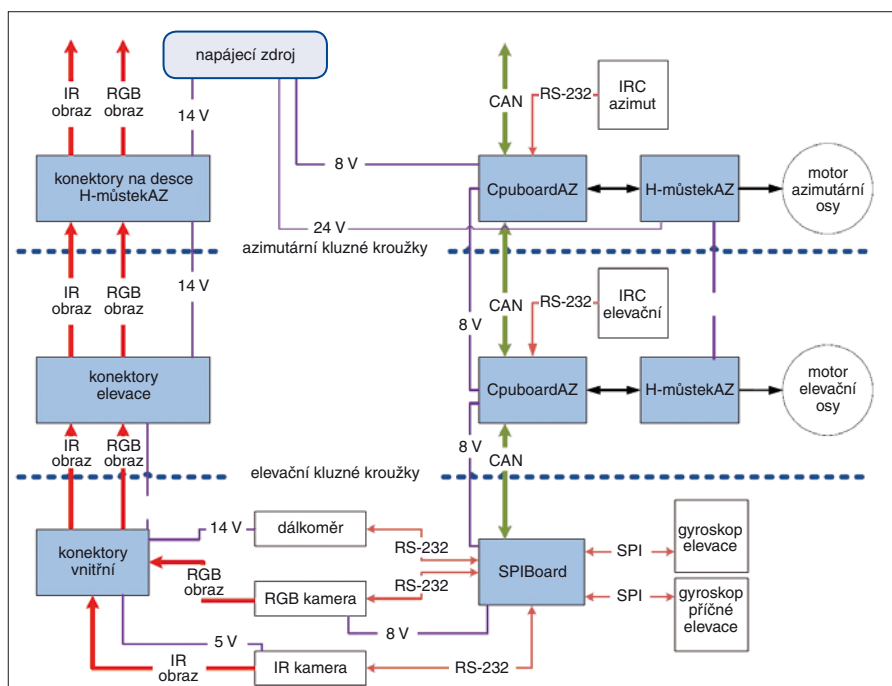
Obr. 10. Po nastavení referenční hodnoty na otáčení pouze okolo příčné elevační osy (svíslá osa kamery) je tento požadavek transformován ($1/\cos \theta$, θ – elevační úhel kamery) na otáčky azimutálního motoru: výsledkem je obraz domku při dolním okraji zorného pole a navíc natočený

RGB a laserový dálkoměr Vectronix LRF42 (obr. 6). Zájemce o detaily lze odkázat na webové stránky výrobce.

4. Struktura zpětnovazebního řídicího systému

Řídicí systém je koncipován jako běžný kaskádní servosystém se třemi úrovněmi, jak ukazuje obr. 8:

1. Nejnižší úroveň jako proudová smyčka zajišťující rychlé utlumení vlivu vnějšího rušivého kroutícího momentu, např. od aerodynamického odporu.
2. Prostřední úroveň je (inerciální) rychlostní smyčka, jejíž dva regulátory čtou úhlové rychlosti okolo dvou os samotné kamery a ovládají každý svůj motor tak, aby



Obr. 11. Schéma zapojení (modré jsou samostatné desky plošných spojů)

nančně podpořena projektem Centrum podpory talentů (Cepot, ESF CZ.04.3.07/4.2.01.1./0045, <http://www.cepot.cz>). Přece jen nevynutelným aspektem studentské práce byla nutnost teprve se naučit dané nástroje používat a teprve poté s jejich použitím odvést zadanou práci. V současnosti jsou již studenti coby graduovaní inženýři zapojeni do projektu standardními finančními mechanismy. Část finanční podpory byla poskytnuta také z prostředků projektu Centrum aplikované kybernetiky (CAK, MŠMT č. 1M0567, <http://www.c-a-k.cz>).

Literatura:

- [1] DEBRUIN, J.: *Control systems for mobile satcom antennas*. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28, s. 86–101.
- [2] HAGER, G. – BELHUMEUR, P.: *Efficient region tracking with parametric models of geometry and illumination*. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(10), s. 1025.
- [3] HENSEN, R. H. A.: *Controlled Mechanical Systems with Friction*. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2002.
- [4] HILKERT, J. M.: *Inertially stabilized platform technology: concepts and principles*. IEEE Control Systems Magazine, February 2008, 28 s. 26–46.
- [5] GRABNER, H. – GRABNER, M. – BISCHOF, H.: *Real-Time Tracking via On-line Boosting*. In: BMVC '06: Proceedings of the 17th British Machine Vision Conference, September 2006, volume I, p. 43–52, BMVA.
- [6] MASTEN, M. K.: *Inertially stabilized platforms for optical imaging systems: Tracking dynamic targets with mobile sensors*. IEEE Control Systems Magazine, February 2008, 28, s. 47–64.
- [7] MASTEN, M. K. – STOCKUM, L. A. (editors): *Selected Papers on Precision Stabilization and Tracking Systems for Acquisition, Pointing and Control Applications*. SPIE, 1996, volume MS 123 of SPIE Milestone Series.
- [8] OSBORNE, J. – HICKS, G. – FUENTES, R.: *Global analysis of the double-gimbal mechanism*. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28, s. 44–64.
- [9] RUE, A. K.: *Stabilization of precision electro-optical pointing and tracking systems*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1969, AES-5, s. 805–819.
- [10] RUE, A. K.: *Precision stabilization systems*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1974, AES-10, s. 34–42.
- [11] ŘEZÁČ, M.: *Návrh řízení pro systém stabilizace optické osy kamerového systému pro bezpilotní letoun*. [Diplomová práce.] ČVUT, 2008.
- [12] SPONG, M. W. – HUTCHINSON, S. – VIDYASAGAR, M.: *Robot Modeling and Control*. Wiley, 2006.
- [13] ŽOHA, J.: *Elektronika pro systém stabilizace optické osy kamerového systému*. [Diplomová práce.] ČVUT, 2008.

Zdeněk Hurák, Martin Hromčík,
Martin Řezáč, Jaroslav Žoha,
katedra řídicí techniky FEL ČVUT
v Praze
(z.hurak@c-a-k.cz),
Pavel Krsek, Václav Hlaváč,
Tomáš Pajdla,
Centrum strojového rozpoznávání FEL
ČVUT v Praze
Milan Bartoš,
Opten s. r. o.

Konference Technical Computing Prague 2008

Společnost Humusoft s. r. o. pořádá 11. listopadu 2008 v Kongresovém centru ČVUT v Praze mezinárodní konferenci *Technical Computing Prague 2008* (TCP 2008) – již šestnáctý ročník podzimního setkání uživatelů a příznivců výpočetních a simulačních prostředí Matlab & Simulink, Comsol Multiphysics a dSpace.

Cílem konference je seznámit účastníky s možnostmi využití programových nástrojů pro technické výpočty, analýzu dat, modelování a simulace v technice i různých přírodovědných oborech. Konference je určena pro současné uživatele a příznivce uvedených programových nástrojů i pro účastníky, kteří zatím s těmito nástroji do užšího styku nepřišli a hledají způsoby, jak rychle a efektivně řešit své úlohy. Akce si za patnáct ročníků jdoucích za sebou vybudovala důstojnou tradici a získala početnou skupinu pravidelných účastníků, k nimž se každoročně přidávají další vědeckí pracovníci, technici a pedagogové z oborů telekomunikací a energetiky, z automobilového, leteckého a jaderného průmyslu, pracovníci v oblasti chemie, lékařství, biotechnologií, životního prostředí a dalších přírodních věd. Konference TCP se stala fórem pro výměnu zkušeností mezi vývojáři, odborníky z praxe, pedagogy i výzkumníky z akademické sféry (obr. 1).

V příspěvcích připravovaných na konferenci TCP 2008 bude pojednáno o použití nástrojů Matlab & Simulink, Comsol Multiphysics a dSpace v nejrůznějších oborech

průmyslu, vědy, výzkumu a výuky. Přihlášeny jsou příspěvky z oblastí řídicí techniky, měření, zpracování signálů a obrazů, simulace systémů, návrhu algoritmů, komunikační techniky, strojírenství, chemické technologie, lékařství atd.



Obr. 1. Neformální diskuse v sále vývěškové sekce konference TCP 2007

Stejně jako v minulých letech bude konference TCP uvedena přednáškami o novinkách a trendech vývoje systémů Matlab & Simulink, Comsol Multiphysics a dSpace. Úvodní přednášky připraví firma Humusoft ve spolupráci se specialisty společnosti The MathWorks (USA), Comsol (Švédsko) a dSpace (Německo). Následovat bude série zvaných plenárních přednášek uživatelů a po přestávce bude konference pokračovat

čovat odborným jednáním ve dvou paralelních sekcích. Současně budou v učebnách v Kongresovém centru probíhat semináře zaměřené na problematiku modelování smíšených soustav, vývoj řídicích systémů a simulace typu *hardware-in-the-loop*. Semináře povedou odborníci firem Comsol a dSpace. Nedílnou součástí konference bude rozsáhlá vývěšková sekce a doprovodná výstava programových i technických prostředků. Vystaveny budou např. superpočítače HPC dodávané firmou Sprinx Systems, výkonné pracovní stanice HeavyHorse od firmy Humusoft, systémy německé společnosti dSpace atd. Pro očekávaných 200 účastníků konference TCP 2008 jsou připraveny materiály o nových produktech a sborník uživatelských přednášek i prostor pro konzultace, neformální diskuse i přátelská setkání nad sklenkou vína.

Podrobné informace o konferenci TCP 2008 lze nalézt na <http://www.humusoft.cz/akce/matlab08>. Na webových stránkách konference jsou k dispozici také elektronické verze sborníků přednášek z minulých ročníků s celkem asi 900 zajímavými články, o které je tradičně velký zájem – za posledních dvanáct měsíců je registrováno více než 100 000 stažených příspěvků!

(Humusoft s. r. o.)