

STAROVĚK, STŘEDOVĚK A NOVOVĚK V ANALÝZE SIGNÁLŮ A OBRAZŮ NA ÚBMI VUT V BRNĚ

(zvaná přednáška)

Jiří Jan ¹

¹Ústav biomedicínského inženýrství, FEKT, VUT v Brně

ABSTRAKT

Vyžádaná přednáška se zabývala zpracováním a analýzou signálů a obrazových dat v celé historii ústavu, od založení původní Katedry lékařské elektroniky v pravěku ústavu přes starověký a středověký vývoj, následně pak přes konverzi na moderní Ústav biomedicínského inženýrství v roce 1990, až po výtoky posledních let. Jde ovšem o výsledek archeologického výzkumu, jenž prezentuje jak některé náhodně nalezené vykopávky, jež – jak autor doufá – vzbudí spíše úsměv, tak i pozdější artefakty které snad mohou být ještě zajímavé i odborně. Náhodně nalezené výsledky aktivit lze ukázat i po velké redukci jen v rychlém sledu; článek tak neobsahuje teoretické rozborů, ba ani rovnice či vzorce a může tak zasloužit výtku nevědeckosti. Podařilo-li se nalézt některé **minulé trendy** vývoje a ukázat poněkud netradičně, že aspoň část z nich uspěla, a stala se tak podkladem pro trendy budoucí, je zamýšleného účelu dosaženo.

KLÍČOVÁ SLOVA

ÚBMI, někdejší trendy, budoucí trendy, zpracování signálů, analýza obrazů, Brno, granty, GAČR, Evropská komise, IEEE-EMBS, EURASIP

ÚVOD

Pozvání iniciátorky TRENDŮ doc. Kolářové ke zvané přednášce jsem zprvu odmítl, jsa přesvědčen, že aktuální stav a výhledy do budoucna by lépe vystihli kolegové až o dvě generace mladší. Opakovanému pozvání jsem však již neodolal; nicméně s ohledem na svrhu zmíněné jsem se rozhodl pohlížet spíše do minulosti, hledaje tam náznaky trendů, jež by mohly být považovány za východiska současného stavu. Taková minulost je ovšem zahalena do značné míry temnotou zapomnění a též chaosu, díky často opakovanému – a vždy již posledního – stěhování ústavu.

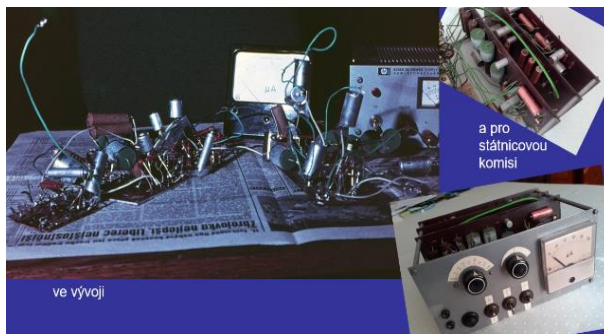
Historie se počíná v počátku času L.P. 1967, kdy *prof. Vratislav Vrána* založil katedru lékařské elektroniky; je rozdělena zhruba na poloviny revolucí v roce 1989, a pokračuje až k současnosti. Budeme ji dělit podle technologie, jež určovala v našem regionu výzkum v oblasti BMI, zhruba takto (sloupce *technol.* a *výp.t.*): →

	technologie	výpoč.tech.	anal.signálů	anal.obrazů
Pravěk				
cca do 1970	elektronky a tranzistory	jen sálové počítače	analog. filtrace a detekce	
Starověk				
cca do 1985	oper.zesilovače digit. IC nízké integrace	hybridní metody +sál. poč.	analýzy průběhů a parametrů 1-D signálů, bodové procesy	
Středověk				
cca do 2000	(LSIC a VLSIC) malé granty	první 8-bit minipočítače a prosté PC	- „ -	experim. syst. PIPS restaur. a analýza uzv.tomogramů
Novověk				
cca od 2000	větší státní a mezinár. granty a spolupráce	silné PC grafické karty, velké paměti (+ superpočítače)	- „ -	anal. a rekonstrukce: - oftalmologie - uzv. CT - CT a SCT - MRI - fMRI
			EEG +	

MATERIÁLY, METODY A VÝSLEDKY

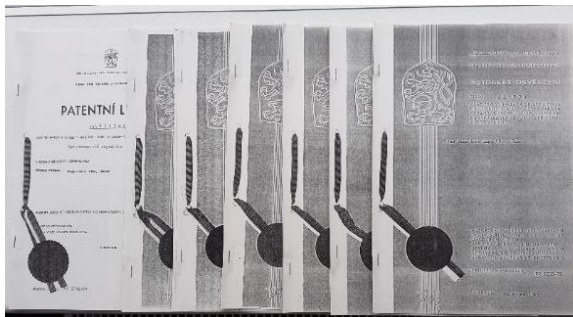
DOBA PRAVĚKÁ, 1967 AŽ CCA 1970

Mytologické příběhy z této doby podávané generacemi v ústním podání mají většinou spíše jen hrubě informativní charakter. Aktuálně tak bylo k dispozici jen několik vykopávek, týkajících se výzkumu v oblasti zpracování signálů: např. snímky diplomky, řešící pro IKEM Praha vyzvednutí signálu hluboce ponořeného v šumu tehdy novou koherenční detekcí – ovšem analogově, → dále první patent z oblasti signálů a také teoretický nápad na nelineární zobecnění přizpůsobeného filtru, použitý o dvacet let později také digitálně pro obrazy. Lékařská elektronika ovšem z valné části zpracovává signály a katedra se tomu tehdy přirozeně věnovala. Po jejím zřízení jsem byl prvním asistentem prof. Vrány a brzy k nám přibyli kolegové A. Drastich, M. Chmelař, K. Jehlička a J. Rozman, kteří se všichni přirozeně zabývali také zpracováním signálů; tehdy ovšem výhradně analogově.



DOBA STAROVĚKÁ, CCA 1970 AŽ 1985

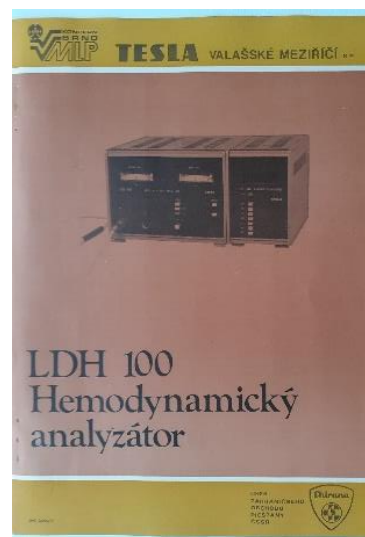
Výzkum ve starověku byl věnován analýze signálů pro přístrojovou techniku ve spolupráci s TESLA Valašské Meziříčí (TVM), CHIRANA – VÚZT a s lékařskými institucemi: brněnskou Fakultní nemocnicí, KÚNZ a MÚNZ. Tehdy u nás dostupná součástková základna s malou integrací – operační zesilovače, jednotlivá hradla a klopné obvody – sice



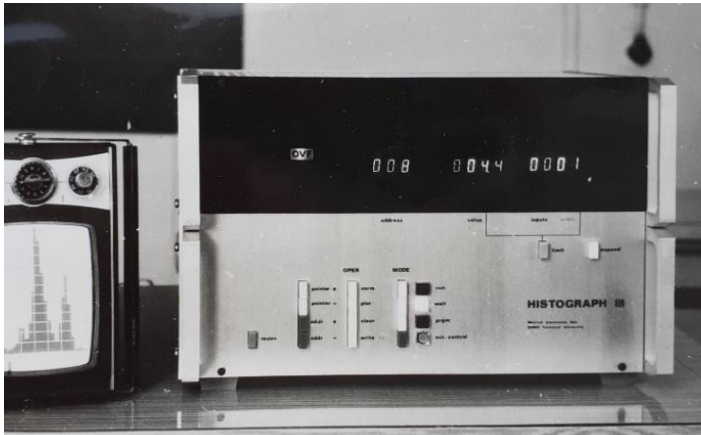
neumožňovala „up-to-date“ řešení, odpovídající jinde již dostupným mikroprocesorům, ale umožnila na základě několika

původních patentovaných ↑ nápadů hybridním řešením – analogovými výpočty a impulsními přepočty – dosáhnout u přístrojů parametrů srovnatelných či dokonce lepších než tehdejší světový stav.

Archeologický průzkum přinesl několik vykopávek, jež takový přístup demonstrují: prvou je analyzátor hemodynamiky, popisující několika okamžitými i průměrovanými parametry uzv. rychlostní signál – HYDRA (1973) a pokročilejší MiniHYDRA (1979), vyráběná pak sériově v TVM. Samotný uzv. rychloměr vyvinuli J. Rozman a R. Kubák, tým návrhu a vývoje analyzátoru MiniHYDRA tvořili J. Jan, J. Kozumplík, D. Janová a R. Mareček.



Nejkomplikovanějším systémem v této skupině byl HISTOGRAPH (postupně verze I-1976, II, až III-1979) – už téměř čistě digitální specializovaný minipočítač pro analýzu bodových procesů, s tehdy nezvyklou průběžnou vizualizací histogramů a s exponenciálním zapomináním výsledku. Ač původně určený k analýze EKG a EEG, našel i zcela odlišná uplatnění v ČSAV díky krátké mrtvé době k zatřídění (1,5 μs, oproti milisekundám u západního komerčního produktu). K tomu účelu jsme „ručně“ vyrobili



několik exemplářů na ústavě. K seriové výrobě v TVM nakonec nedošlo, neboť při předchozím plánování pětiletky se pokročilý produkt jaksi nepředpokládal; nicméně Tesla náš princip přece jen využila k návrhu kazety pro osciloskop. Návrhový a vývojový tým HISTOGRAPHu tvořili *J. Jan, M. Eyselt, V. Dvořák, P. Hladký, J. Holčík, M. Chmelař, D. Janová, J. Kozumplík, R. Mareček a V. Sapák.*

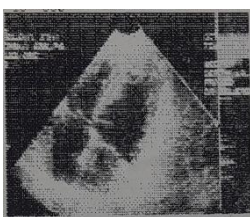
Starověká výuka byla méně než průmysl ovlivněna tuzemskými omezeními, takže bylo možné již v roce 1972 zavádět do výuky numerické přístupy, a také předmět *Lékařská kybernetika*, týkající se nejen algoritmů, řešitelnosti a diskretních strojů, ale i pravděpodobnostních a sebeučících automatů, a rozpoznávání obrazců. Zvláštní zmínku zaslouží zavedení předmětu *Diskretní metody zpracování biosignálů* v roce 1974 - zřejmě první zařazení teorie digitálního zpracování signálů do pravidelné výuky na technických univerzitách v tehdejší Československu a možná i v celém východním bloku.

V tehdejší historické etapě snad našla jisté uplatnění i „osvěta“ o souvisejících teoretických i praktických otázkách, o níž jsme se snažili v odborných časopisech (Slab.Obzor, Sděl.Tech, L&T).

Ve starověku byla rovněž zahájena dlouhá série bienální **konference BIOSIGNAL** (1977 – 2010), o níž se souhrnně přes všechny vývojové etapy zmíníme v oddíle Diskuse.

DOBA STŘEDOVĚKÁ, CCA 1985 AŽ 2000

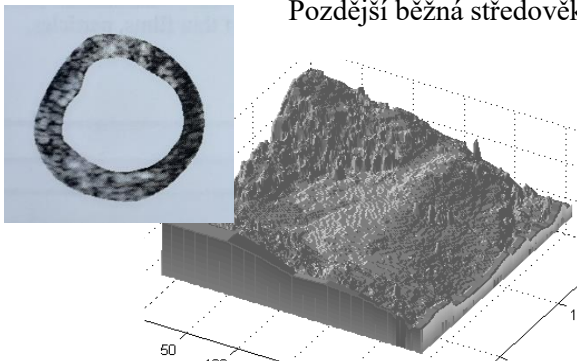
Výzkum mohl částečně pokročit již na počátku středověku díky dostupnosti osobních mikropočítačů, byť zpočátku jednoduchých, což umožnilo přejít od návrhů přístrojů spíše k algoritmizaci analýzy signálů a k teorii, což – kromě výhody aktuálnosti a zajímavosti – nebylo tolik ovlivněno lokálními omezeními. Zaměřili jsme se, s ohledem na využitelnost přímo na klinikách nebo v ordinacích, zejména na návrh původních algoritmů realizovatelných na osobních mikropočítačích a později na běžných PC, postupně nabývajících na síle.



Dnes stěží uvěřitelným způsobem jsme se na počátku středověku seznamovali s digitálním zpracováním obrazů na soukromém mikropočítači ZX Spektrum se 48 kB RAM (kupodivu v komfortním prostředí úplného PASCALu), na němž jsme si ovšem museli vyvinout vlastní IP systém. Tak bylo možné řešit i pokročilejší úlohy, byť s malým rozlišením, jež v praxi vyhovovalo jen pro uzv. tomogramy; zejména šlo o zvýšení rozlišovací schopnosti tomogramů i potlačení „speckle“-šumu restaurací pomocí upravené Wienerovské filtrace, s tehdy mezinárodně publikovatelnými výsledky. Obávám se, že nyní bychom s takovým vybavením (jež ale kupodivu stále funguje) uspěli těžko.

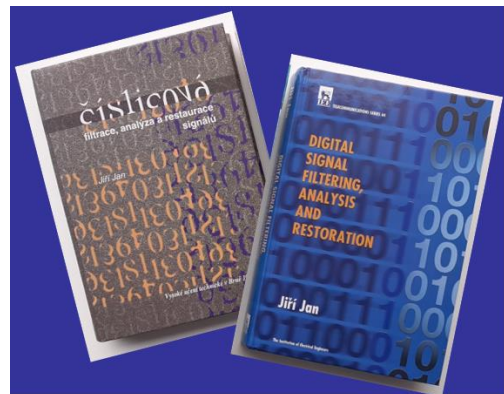


Podstatnou změnou od revoluce 1989 bylo zavedení různých typů **grantové podpory výzkumu**, což bylo v té době podobně významné, jako dříve pokroky součástkové základny, umožňující vývoj zajímavých průmyslových aplikací. Kromě porevolučních grantů MŠMT ČR a VUT nám výrazně pomohly evropské granty: EC-TEMPUS JEP 1191-92 (1992-1993), EC-ESPRIT (univ. Essex (UK), 1993), a zejména pětiletý EC-COPERNICUS CP 940223 SISPAS (univ. Leuven (B), 1995-1999). Konec středověku a počátek novověku pak pokryly národní granty GAČR 102-99-0374 a 109-99-1228.



Pozdější běžná středověká PC (byť zpočátku jen 640 kB RAM) už umožňovala složitější věci, pořád „doma“, tj. bez užití těžko dostupných výpočetních center; např. segmentaci řezu myokardem na uzv. tomogramu, nebo vývoj původní metody stereoskopické rekonstrukce povrchů na bázi dvojice snímků z elektronového mikroskopu. Tým zpracování obrazů měl v roce 1997 následující složení: *J. Jan, J. Blaha, P. Fedra, R. Chrástek, D. Janová, J. Kozumplík, J. Slezák, Z. Szabó, M. Šimčák, D. Tkoč.*

Středověká výuka byla v roce 1986 doplněna o nový předmět *Zpracování a analýza medicínských obrazových dat*, zahrnující kromě teorie vícerozměrných signálů a transformací přehled metod zpracování a analýzy obrazů včetně základů jejich fúze. Bylo též třeba obstarat literaturu k již zavedenému kurzu zpracování signálů. Poněvadž se domnívám, že vysokoškolská výuka by měla být založena na studiu monografií spíše než na často improvizovaných skriptech, vznikla v tomto období kniha *Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů* (VUTUM 1997), jež dále vyšla anglicky (IEE London 2000).



Významným výukovým impulzem v období pozdějšího středověku pro nás byla účast v evropském projektu **TAIC** (Teaching AI and Com. 1993) s účastníky Imperial College London (UK), Essex Univ. (UK), Porto Univ. (PT), ČVUT Praha a z Brna VUT-ÚBMI. Vykopání zlomků kursu umělé inteligence z roku 1993 bylo dnes jistým překvapením a změnilo zčásti výklad historie.

Konference BIOSIGNAL získala již v roce 1994 zaštitění evropskou asociací EURASIP, což nepochybně posílilo její mezinárodní postavení a logicky vedlo k výraznému zvýšení zahraniční účasti.

DOBA NOVOVĚKÁ, OD CCA 2000 DO SOUČASNOSTI

Výzkum v novověku se již zcela opíral o získané granty:

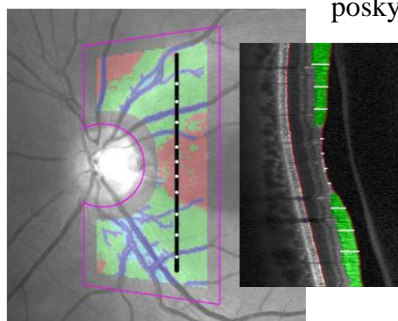
- **GAČR 102-02-0890** (analýza v uzv. tomografii, 2002-2004), tým: *J. Jan, P. Fedra, J. Haluzíková, P. Kilián, R. Kolář, J. Kozumplík, R. Kurečka, R. Kubák, M. Knotek, I. Provažník, J. Slezák, D. Schwarz, M. Skokan a Z. Szabó*
- účast v grantech FN Brno GAČR P304/11/1318 a GAČR P103/12/0552 (analýza vztahů fMRI a EEG), tým: *J. Jan, M. Havlíček, M. Lamoš, R. Labounek, R. Mareček a T. Slaviček*
- **mezinár. cestovní granty** umožnily pravidelné kontakty - DAAD 2001-2012 (oftalmologická data – Erlangen Univ.), a KIT 2005-2010 (uzv. tomografie – KIT Karlsruhe) – viz níže

- **národní výzkumné centrum DAR 2005-2011** (fúze obrazových dat – spolu s ÚTIA AVČR), rozsáhlý tým centra zahrnoval dvě níže uvedené skupiny – OFTALMO a USCT, jež úzce spolupracovaly a také se prolínaly, což se ukázalo pro výměnu idejí a výsledky velmi přínosné
- **smluvní výzkum s Philips Health Care Nederland 2008** – dosud (podpora CT diagnostiky – spolu s IRST Meldola (I)), časově proměnný tým viz níže

Zahraniční podporu lze spatřovat také v pozvání k pravidelné expertní činnosti – evaluaci grantů EC v Bruselu; ta od roku 1996 donedávna umožňovala aktuální informovanost o aktivitách a mezinárodní úrovni v příbuzných oblastech.

Národní výzkumné centrum DAR zásadním způsobem ovlivnilo zpracování obrazů na ÚBMI, neboť se poprvé zdařilo soustředit řadu kolegů z ústavu, a zčásti i mimo něj, kolem dvou oblastí založených na fúzi obrazových dat – analýzy oftalmologických dat a rekonstrukce obrazu v ultrazvukové tomografii. V raném novověku vzniklo v každé z nich více výsledků, jež podle ohlasů patřně zaujaly mezinárodní komunitu, ale nutně se omezíme jen na několik muzejních artefaktů nalezených v jedné ze zaprášených vitrín:

Skupině OFTALMO, spolupracující s univerzitou v Erlangenu, šlo o výzkum směřující k automatizované diagnóze glaukomu. Původní optimalizační úpravy dat, jako aposteriorní entropická ekvalizace osvětlení sítnice nebo odšumění náročně lícovanou kumulací, a přesné nalezení cévního stromu nelineární „matched“- filtrací poskytly upravené retinální snímky pro



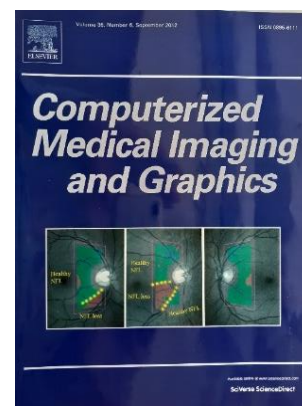
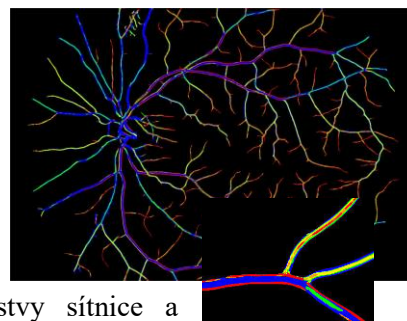
analýzu tloušťky nervové vrstvy sítnice a

umožnily tak detekci a segmentaci poškozených míst, potřebnou pro diagnostiku. Souhlas výsledku, získaného texturní analýzou upraveného běžného snímku očního pozadí s daleko náročnějším vyšetřením laserovým

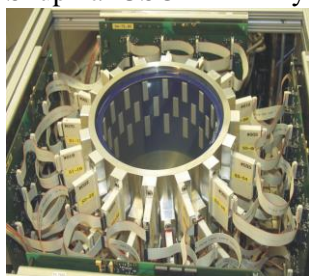
tomografem zaujal zřejmě redakci časopisu

CMIG (Elsevier) natolik, že snímky umístila na titulní stránku.

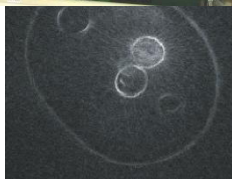
Tým OFTALMO: *J. Jan, J. Gazárek, R. Jiřík, R. Kolář, L. Kubečka, J. Odstrčilík, M. Skokan, A. Skoupý a R. Chrástek (ext.)*.



Skupina USCT se zabývala zpracováním dat z ultrazvukového 3D tomografu vyvíjeného v KIT (Karlsruhe Institute of Technology). Víceletá intenzivní spolupráce na

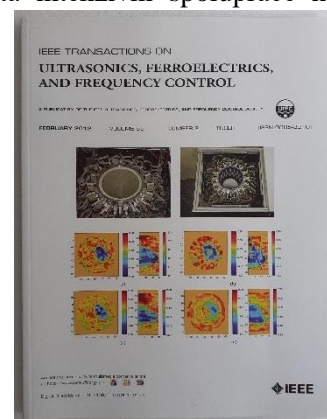


problémech ultrazvuk. rychlostní i útlumové tomografie a zejména regularizované rekonstrukce obrazu z 3D dat ultrazvukového tomografu vedla finálně k článku, který vyšel v IEEE Transactions on UFFC (2012). Také tento článek zaujal redakci, tentokrát IEEE-

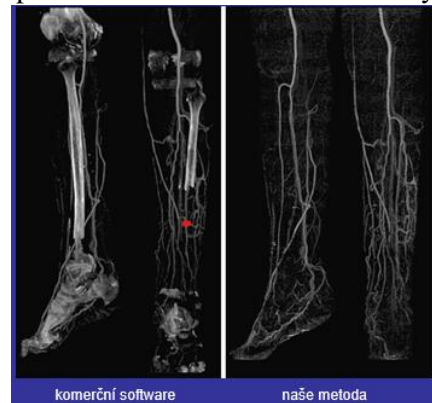


TUFFC, takže související snímky ozdobily titulní stránku příslušného čísla.

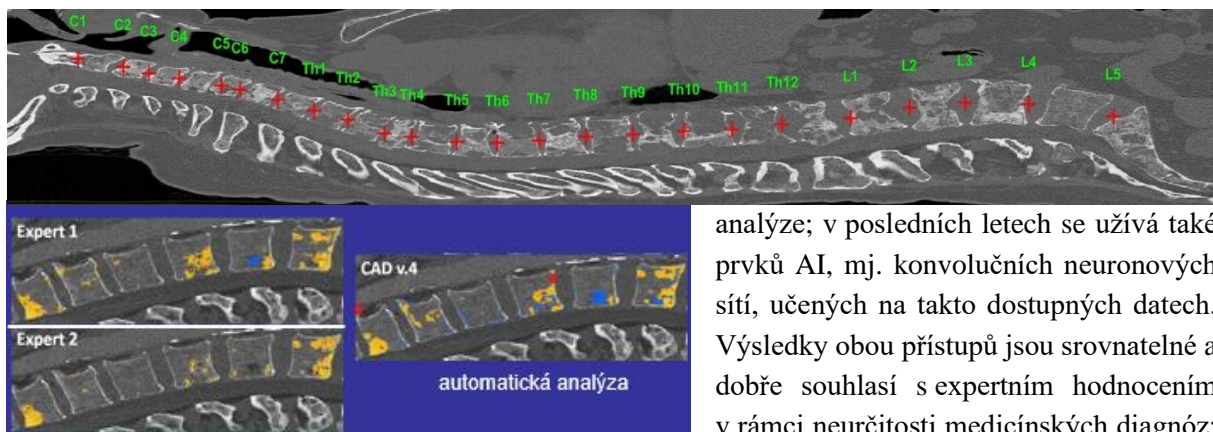
Tým USCT: *R. Jiřík, A. Filipík, J. Fousek, D. Hemzal, J. Jan, I. Peterlík, J. Roleček a J. Začal*



Smluvní výzkum pro firmu Philips Health Care Nederland: Ke spolupráci na hledání algoritmů pro podporu diagnostiky analýzou radiologických dat nás jsme byli pozváni v roce 2008. Od té doby pokračuje již 16. rokem intenzivní smluvní spolupráce, představující významnou motivaci i díky související přímé spolupráci s medicínskými pracovišti. Dosavadní práce se týkaly zejména algoritmů analýzy dat rentgenovské počítačové tomografie (CT); v poslední době dochází k rozšíření i na spektrální CT a další modalitty, zejména MRI. I u tohoto výzkumu zmíníme jen několik dnes již muzejních nálezů. Vytvořením původní metody pružného lícování s respektováním lokální elasticity tkání se podařilo ve své době zásadně zlepšit rekonstrukci cévního řečiště v CT subtraktivní angiografii. →



Spolupráce s onkologickým institutem IRST Meldola (Itálie) umožnila postupně vyvinout algoritmy pro segmentaci a identifikaci obratlů a páteře, a pro detekci, segmentaci a klasifikaci kostních lézí. Původně jsme modifikovali a kombinovali klasické metody, založené na intenzivních modelech a texturní



analýze; v posledních letech se užívá také prvků AI, mj. konvolučních neuronových sítí, učených na takto dostupných datech. Výsledky obou přístupů jsou srovnatelné a dobře souhlasí s expertním hodnocením v rámci neurčitosti medicínských diagnóz;

liši se však různou náročností ve fázi přípravy algoritmů a ovšem rychlostí při aplikaci, v níž vítězí AI.

V nedávné době vyvinutý program SmartBrain automaticky srovná 3D CT data hlavy prostorovou rotací do standardní pozice na základě identifikace význačných anatomických detailů.

Tým, v průběhu let proměnný, byl souhrnně *J. Jan, J. Chmelík, R. Jakubiček, V. Harabiš, M. Malínský, R. Peter, P. Walek, M. Nohel, P. Nemčková, M. Novosadová, J. Demel, O. Kodým, J. Šalplachta.*

Mezi vykopávkami ovšem dosud září dva články M.Havlička et al. v časopise NeuroImage (Elsevier, 2010, 2011), pocházející ze



shora zmíněné spolupráce s neurovědní oblastí, jež jsou asi nejcitovanější z našich publikací – přes 230 kvalitních citací, jejichž řada se stále doplňuje.



Dynamic Granger causality based on Kalman filter for evaluation of functional network connectivity in fMRI data

Martin Havlicek^{1,2,3,4}, Karl J. Friston⁵, Jiri Jan⁶, Milan Brazdil^{1,2}, Vince D. Calhoun^{3,4}

Také si vážíme již zavátého pozvání k editování zvláštního vydání časopisu EURASIP JASP (Advances in Modality Oriented Medical Image Processing, 2003) s edičním týmem *J. Jan, M. Šonka, I. Provažník.*

Zdaleka ne vše bylo možno zahrnout, mnohé je ale stále živé a je tak nyní – v pokročilém novověku – dostupné leckde na webu. Tyto práce se ceněnými muzejními exponáty stanou až po čase.

Dole je jediný zachovaný (a značně neúplný) snímek mezinárodního výboru a též seznam členů z roku 2006; mnohá jména čtenář zajisté zná z publikací.



INTERNATIONAL PROGRAM COMMITTEE

I. Bajla	Slovakia	D. Levický	Slovakia
E. R. Carson	United Kingdom	J. P. Marques de Sá	Portugal
G. Christé	France	I. Provazník	Czech Republic
J. Cmíral	Czech Republic	V. V. Shakin	Russia
J. L. Coatrieux	France	C. A. Swenne	The Netherlands
D. Evans	United Kingdom	J. Šimurda	Czech Republic
H.-J. Hein	Germany	M. Šonka	United States
U. Heute	Germany	N. V. Thakor	United States
H. Hutten	Austria	E. Tkacz	Poland
J. Jan	Czech Republic	R. Vích	Czech Republic
S. Laxminarayan	United States	J. Zvárová	Czech Republic

Ještě jedna zmínka z dávné historie, přímo se dotýkající i oblasti signálů a obrazů: Po revoluci v roce 1989 jsme se bezprostředně rozhodli pro konverzi katedry na Ústav biomedicínského inženýrství, se zájmy rozšířenými na celou oblast BMI.

To si žádalo předně reformu výuky: doplnění chybějících předmětů a jejich návaznosti, a splnění tehdejší (dnes už možná překonané) představy o biomedicínském inženýru: perfektní inženýr s kompetencemi elektronika, měření, aplikovaná kybernetika a informatika, a ovšem s oborovým bonusem přiměřeného přehledu o medicíně, umožňujícím komunikaci s lékaři. Tedy silný teoretický základ a široký rozhled, umožňující zaměstnání ve zdravotnictví, i mimo ně. Taková koncepce se osvědčila i v tom, že jsme nikdy neměli nedostatek studentů a všichni nalézali uplatnění; v nemocnicích, klinikách, výzkumu apod., jiní i v průmyslu, telekomunikacích, ba i v jaderné elektrárně. I tato koncepce už dnes náleží spíše k archeologickým nálezům; doba žádá i jiná alternativní pojetí. Obdobně, v tehdy novém doktorském studiu jsme kladli důraz na původnost po technické příp. teoretické stránce, samozřejmě s ohledem na význam práce pro biomedicínskou oblast; jako jedni z prvních ve zdejších poměrech jsme zavedli podmínku recenzované mezinárodní publikace pro připuštění k obhajobě disertace.

Koncepce výzkumu si také žádala změnu: skončilo hodnocení podle interních výzkumných zpráv a kritériem se staly především recenzované publikace; nutným se také ukazoval nesnadný přechod k týmové práci, soustředěné na jednu hlavní výzkumnou oblast, navíc nepříliš náročnou na prostředky a vybavení. Takovou se tehdy – i v návaznosti na předchozí etapu – jevil digitální zpracování signálů a později obrazů, jež vystačilo jen s výpočetní technikou a slibovalo i akademicky zajímavý výzkum. Tyto snahy pak vedly k vývoji, o jehož stručné shrnutí se pokusila předchozí část tohoto článku.

ZÁVĚR A PODĚKOVÁNÍ

Článek se snažil stručně vystihnout hlavní poznatky ze zvané přednášky o zachovaných reliktech vývoje zpracování signálů a obrazů na ÚBMI od šerého dávnověku přes jen mírně transparentnější středověk až k lépe dokumentovanému novověku, přecházejícímu do informacemi zahlcené současnosti.

Děkuji čtenáři, který v příspěvku dospěl až k tomuto bodu, za trpělivost i shovívavost, co se vědeckosti článku i prohrěšků vůči předepsanému formátu týče. Chybí také seznam literatury; u vykopávek a muzejních exponátů je to dáno povahou a stářím, novověké prameny lze naopak vyhledat podle jmen autorů, jsou-li tito i tazatel zadobře s webem a vědeckými databázemi.

Následující snímek ukazuje, že orientace na zpracování medicínských signálů a obrazů je – vedle novější bioinformatické oblasti – stále aktuální a významnou složkou výzkumu na ÚBMI.

aktuální stav a výhled UBMI v oblasti analýzy medicínských signálů a obrazů

- **obrazy:**

skupina CT, SCT, MRI, USG
(*Philips / FN Brno*):
J. Chmelík, R. Jakubíček, V. Harabiš,
doktorandi, J. Jan

oftalmologie, mikroskopie:
R. Kolář, J. Odstrčilík, T. Vičar

neurozobrazování, fMRI
D. Schwarz, ext. M. Lamoš

- **signály:**

EKG/VKG/FGK, EEG, EMG, PPG:
J. Kozumplík, M. Vitek, O. Janoušek,
M. Ronzhina, T. Vičar, P. Novotná,
J. Kolářová, L. Smital, R. Smíšek, M. Králík

