# České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební

# Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering

Doc. Ing. Jiří Pospíšil, CSc.

Současné trendy skenování ve stavebnictví a v příbuzných oborech Recent Trends of Scanning in Civil Engineering and Related Branches

## **Summary**

A relatively new method of direct contactless determination of 3D coordinates – a scanning technology – is briefly described here. The static scanning systems are divided into polar systems and systems with basis, which are further divided into camera systems and panoramatic systems. Categorization of scanning systems according to range, accuracy and scanning speed is stated too. Kinematic systems are mentioned as well for purpose of completeness. Programs for data collection, data processing and administration of projects are described. Influences affecting quality of the measured data are listed transparently. Some trends in the field of devices and systems, in testing scanning devices, in processing the measured data and in using scanning systems in engineering surveying are emphasized on the basis of analysis of results of international conferences and publications. The trend leading up to development of financially undemanding scanners is recorded by the development of the LORS1 up to LORS4 prototypes and of the scanner with virtual binary marks. The created algorithms for measuring and its processing, construction solutions, conducted tests and achieved accuracy are described. The results are documented by illustrations of point clouds, models and photographs of the scanned objects. With respect to the fact that field of testing scanning systems is not closed by far, a new method for direct determination of standard deviations of horizontal directions and zenith angles of laser scanners with distance meters working in the visible part of spectrum was designed and implemented. The method is described in detail and documented. The matter of processing scanning data is thoroughly analysed at first and then the problem is defined and fitting method which minimize orthogonal distances (further designated as orthogonal fitting) is described. A library of classes and functions in the C++ programming language SPATFIG is being developed for solving orthogonal fitting in 3D.The implemented geometric formations in the SPATFIG library are consistent with formations in the ČSN EN ISO 10360-6 norm. Verifying functionality of SPATFIG was carried out on data of the Leica HDS 2500 scanner after measuring a cylinder and a sphere with various percents of covering and by comparison with results of processing by Cyclone 5.1 a 3Dipsos 3.0.3. commercial software, whereas unsuitable using algebraic fitting was discovered in the 3Dipsos 3.0.3 program. It was found out that differences between SPATFIG and Cyclone are insignificant. Design and implementation of simulator of measuring scanning systems for further testing of manufacturing programs and assessing activity of scanner are described. There is also stated an analysis of possibilities of using scanning technology for measuring displacements and deformations in engineering surveying by means of experiments in laboratory and measuring in real environment in the gallery of the UEF Josef complex and in the built railway tunnel "Nové spojení" ("New connection") in Prague. A new method of average displacements of points was designed for purpose evaluation of normal displacements of any surface. This method is based on average difference of digital model of surface in two stages for the observed areas and the result is not burdened so much with measuring noise.

## Souhrn

Je stručně popsána poměrně nová metoda přímého bezkontaktního určování 3D souřadnic – technologie skenování. Statické skenovací systémy jsou rozděleny na systémy polární a se základnou, které se dále dělí na kamerové a panoramatické. Také je uvedena kategorizace skenovacích systémů podle dosahu, přesnosti a rychlosti skenování. Rovněž jsou pro úplnost zmíněny kinematické systémy. Jsou popsány programy pro sběr dat, zpracování dat a správa projektů. Přehledně jsou vyjmenovány vlivy působící na kvalitu měřených dat. Na základě analýzy výsledků mezinárodních konferencí a publikací jsou zdůrazněny některé trendy v oblasti přístrojů a systémů, v testování skenovacích zařízeních, ve zpracování naměřených dat a ve využití skenovacích systémů v úlohách inženýrské geodézie. Trend směřující k vývoji finančně nenáročných skenerů je zachycen vývojem prototypů LORS1 až LORS4 a skeneru s virtuálními binárními značkami. Jsou popsány vytvořené algoritmy pro měření a jeho zpracování, konstrukční řešení, provedené testy a dosažené přesnosti. Výsledky isou dokumentovány ukázkami mračen bodů, modelů a fotografií skenovaných předmětů. Vzhledem k tomu, že problematika testování skenovacích systémů není zdaleka uzavřená, byla navržena a realizována nová metoda pro přímé určení směrodatných odchylek vodorovných směrů a zenitových úhlů laserových skenerů s dálkoměry pracujícími ve viditelné části spektra. Metoda je podrobně popsána a dokumentována. Otázka zpracování dat ze skenování je nejdříve zevrubně analyzována a pak je definován problém a popsána metoda prokládání minimalizující ortogonální vzdálenosti (dále označeno jako ortogonální prokládání). K řešení ortogonálního prokládání ve 3D je vyvíjen SPATFIG, což je knihovna tříd a funkcí v programovacím jazyce C++. Implementované geometrické útvary v knihovně SPATFIG jsou shodné s útvary v normě ČSN EN ISO 10360-6. Ověření funkčnosti SPATFIGu bylo provedeno na datech ze skeneru Leica HDS 2500 po zaměření válce a koule s různými procenty pokrytí a srovnáním s výsledky zpracování komerčními programy Cyclone 5.1 a 3Dipsos 3.0.3., přitom v programu 3Dipsos 3.0.3 bylo odhaleno nevhodné použití algebraického prokládání. Bylo zjištěno, že rozdíly mezi SPATFIGem a Cyclone jsou zanedbatelné. Je popsán návrh a realizace simulátoru měření skenovacího svstému pro další testování zpracovatelských programů a posuzování činnosti skenerů. Je uvedena analýza možností využití technologie skenování pro měření posunů a přetvoření v inženýrské geodézii pomocí experimentů v laboratoři a měření v reálném prostředí v důlní štole komplexu UEF Josef a v budovaném železničním tulenu "Nové spojení" v Praze. Pro vyhodnocení normálových posunů libovolného povrchu byla navržena metoda průměrného posunu bodů, která je založena na průměru rozdílu digitálního modelu povrchu ve dvou etapách pro sledované oblasti a výsledek není tolik zatížen šumem měření.

## Klíčová slova:

skenování, mračno bodů, 3D souřadnice, statické systémy, kinematické systémy, letecké systémy, LORS (Laserový a Optický Rotační Skener), virtuální značky, binární kód, DLT (Direktní Lineární Transformace), DSM (digitální model povrchu), digitální kamera, točna, analýza přesnosti, přesnost vzdálenosti, úhlová přesnost, kalibrace, testování, prokládání podle ortogonálních vzdáleností, program SPATFIG (prostorový útvar), simulátor měření, posuny, přetvoření, tunel

#### **Keywords:**

scanning, point cloud, 3D coordinates, static systems, kinematic systems, airborne systems, LORS (Laser and Optic Rotating Scanner), virtual markers, binary code, DLT (Direct Linear Transformation), DSM (Digital Surface Model), digital camera, rotating platform, accuracy analysis, distance accuracy, angle accuracy, calibration, testing, orthogonal distance fitting, software SPATFIG (Spatial Figure), simulator of measurements, displacements, deformations, tunnel

České vysoké učení technické v Praze

Název: Současné trendy skenování ve stavebnictví a příbuzných oborech
Autor: Doc. Ing. Jiří Pospíšil, CSc.
Počet stran: 32
Náklad: 150 výtisků

© Jiří Pospíšil, 2007 ISBN

# Obsah

1	Úvod		6					
2	Princip s	skenování	6					
3	Skenova	Skenovací systémy						
	3.1 Stat	ické systémy	7					
	3.1.1	Dělení skenerů podle principu	7					
	3.1.2	Dělení skenerů podle zorného pole	8					
	3.1.3	Dělení skenerů podle dosahu	9					
	3.1.4	9						
	3.1.5	Dělení skenerů podle rychlosti skenování	9					
	3.2 Kine	ematické systémy	9					
4	Program	IV	10					
5	Vlivy pů	asobící na kvalitu měřených dat	10					
6	Současn	é trendy	10					
	6.1 Přís	troje a systémy	10					
	6.1.1	LORS1	11					
	6.1.2	LORS2	11					
	6.1.3	LORS3	12					
	6.1.4	LORS4	13					
	6.1.4.	1 Matematické řešení výpočtu podrobných bodů	14					
	6.1.4.	2 Konstrukční řešení systému LORS4	15					
	6.1.4.	3 Vyhodnocení	15					
	6.1.4.	4 Provedené experimenty	15					
	6.1.4.	5 Testování přesnosti	15					
	6.1.5	Skener s virtuálními binárními značkami	15					
	6.2 Test	ování systémů	17					
	6.2.1	Metoda pro přímé určení směrodatných odchylek vodorovných	směrů a					
	zenitový	ch úhlů laserových skenerů	17					
	6.3 Zpra	acování dat ze skenování	18					
	6.3.1	Definice problému	19					
	6.3.2	Metody prokládání	20					
	6.3.3	SPATFIG	21					
	6.3.4	Komerční programy k ortogonálnímu prokládání v oblasti geodézie a p	osouzení					
vlastností algoritmu metody								
	6.3.5	Simulátor měření skeneru	22					
	6.4 Vyu	žití skenovacích systémů pro úlohy inženýrské geodézie	25					
7	Závěr	· · · · ·	29					
Li	Literatura							
Ži	Životopis							

# 1 Úvod

V průběhu druhé poloviny devadesátých let minulého století se v geodézii objevila nová metoda přímého bezkontaktního určování 3D souřadnic - technologie skenování. Od začátku 21. století již můžeme hovořit o jejím běžném komerčním nasazení. Tato technologie ohromila obrovskou efektivností sběru dat. Skenovací systémy dokáží při využití impulsní dálkoměrné technologie měřit tisíce bodů a při využití fázové technologie desetitisíce bodů za vteřinu. Po čase používání skenerů se však ukázalo, že jejich "úzkým hrdlem" je zpracování naměřené množiny bodů (tzv. mračna bodů). Existující projekty často obsahují stovky miliónů bodů a poměr mezi dobou sběru dat a jeho zpracováním se pro běžné aplikace uvádí 1/10 až 1/100. Doposud nevyřešeným problémem skenovacích systémů je jejich kalibrace. U klasických teodolitů se metodika kalibrace vyvíjela desetiletí a obsahuje značně sofistikované metody. Naproti tomu jsou kalibrační metody skenovacích systémů teprve v počátcích vývoje. Existuje zde jistá podobnost skenovacích systémů a totálních stanic s bezhranolovým měřením, u nichž je ale výhodou snazší manipulace. Problémem skenovacích systémů je také neznalost jejich vnitřních principů, které výrobci z konkurenčních důvodů tají. Stejně tak jsou utajovány algoritmy ke zpracování naměřených dat. Z těchto a dalších důvodů výrobci u skenovacích systémů neuvádějí běžné charakteristiky přesnosti zaměřených bodů. Tato nová metoda se jeví být podobným fenoménem jako ve své době technologie globálního pozičního systému GPS. Skenovací systémy umožňují bezkontaktní určování prostorových souřadnic, 3D modelování a vizualizaci složitých staveb a konstrukcí, interiérů, podzemních prostor, libovolných terénů apod. s mimořádnou rychlostí, komplexností a bezpečností. Prakticky lze skenovací systémy využívat hlavně ve stavebnictví a v příbuzných oborech [1], [2].

# 2 Princip skenování

Vzhledem k vlastnostem, které má laserové záření, jsou lasery velmi výhodným zdrojem záření pro skenovací systémy. Laserové záření je nezávisle na typu laseru a konkrétních technických datech ve vysoké míře monochromatické, koherentní, intenzivní a s využitím doplňující optické soustavy vysoce směrové [3]. Ve skenovacích systémech je měření vzdálenosti založeno převážně na elektronickém způsobu měření a nebo na optickém (měření ze známé základny). Podle principu měření se elektronické dálkoměry využívané ve skenovacích systémech dělí na impulsní, fázové a frekvenční [1], [2]. Základním principem fungování laserového skeneru je prostorová polární metoda (obr. 1). K určení souřadnic bodu P je třeba znát délku průvodiče r (měřená délka) a úhly  $\theta$ ,  $\phi$ . Úhly jsou získávány například z polohy zrcadel, které rozmítají laserový svazek a délka například impulsním dálkoměrem skeneru synchronizovaně s polohou zrcadel. Jinou variantou metody je určení polohy bodu ze základny. Výsledkem výpočtu jsou 3D souřadnice měřeného bodu objektu v souřadnicovém svstému skeneru. Pro naskenování bodů objektu se používá různých principů rozmítání laserového svazku [1], [2], pomocí kterých jsou na povrchu objektu měřeny body v profilech ve zvolené hustotě, výsledkem měření skenovacícho systému je mračno bodů. Vzhledem k tomu, že souřadnicový systém skeneru je obecně orientován a umístěn, je většinou nutno provést transformaci bodů do požadovaného souřadnicového systému. Dalším krokem zpracování mračna bodů je aproximace měřených bodů geometrickými entitami, tj. křivkami a plochami, případně tělesy. Jakkoli toto vyjádření zní jednoduše, jedná se o nejnáročnější část zpracování. Tělesy mohou být např. koule, kvádr, válec, kužel a další. Takto vytvořený digitální model umožňuje měření, úpravy a další operace, ale z hlediska lidského vnímání může být nepřehledný a proto se přistupuje k vizualizaci, jejíž výsledek slouží jak pro prezentační účely, ale hlavně usnadňuje orientaci v modelu a dále umožňuje rozšíření modelu o další údaje, jako jsou materiály, textury, osvětlení apod. Dalším krokem zpracování modelu je tedy jeho vizualizace, která spočívá hlavně v přiřazení materiálů (jejich textur), osvětlení a

zpracování zobrazení pomocí programu. Takto vytvořený model umožňuje mimo jiné virtuální prohlížení, lze je využít např. pro prezentaci modelu, zhodnocení vlivu nové zástavby na stávající ráz krajiny apod.



Obr. 1 Schématické znázornění prostorové polární metody

# 3 Skenovací systémy

Skenovací systémy lze dělit podle různých kritérií. Jedním z nich je umístění skeneru při skenování. Je-li skener umístěn pevně na Zemi, hovoříme o statických systémech, je-li umístěn na pohybujícím se nosiči (autu, drezíně, vrtulníku, letadle ...) o kinematických systémech. Dále je možno skenery dělit podle měřicího principu, podle zorného pole, podle dosahu, přesnosti určení polohy bodu a rychlosti skenování [4].

# 3.1 Statické systémy

## 3.1.1 Dělení skenerů podle principu

Skenery mohou být děleny do skupin podle měřicího principu jak je uvedeno v obr. 2.



Obr. 2 Rozdělení skenerů podle měřicího principu



Obr. 3 Skener přímo měřicí vzdálenost (polární)

Měřicí principy a uspořádání skenerů je znázorněno na obr. 3,4,5. U skeneru přímo měřicího prostorovou vzdálenost je využito buď měření tranzitního času a nebo vzniklého fázového rozdílu (obr. 3). U jedno kamerového systému je základna tvořena CCD kamerou a středem rotace zrcátka, snímá se stopa laserového svazku na objektu (obr. 4). U dvou kamerového systému je základna tvořena dvěma konvergentně zamířenými CCD kamerami a projektorem se vytváří světelný řez, nebo se využije opět laseru (obr. 5).



Obr. 4 Skener se základnou – jedno kamerový



Obr. 5 Skener se základnou – dvou kamerový

## 3.1.2 Dělení skenerů podle zorného pole

Mezi důležité vlastnosti 3D skenovacích systémů patří tvar zorného pole. Zorné pole je maximální úhlový rozdíl krajních výstupních svazků paprsků, udává se ve stupních v horizontálním a vertikálním směru. Tato vlastnost je úzce spjata s tím, jakým způsobem je naváděn svazek do bodů rastru.



Obr. 6 Kamerový a panoramatický skener

3D laserové skenery obecně fungují tak, že laserový svazek je naváděn podle programu na body rastru ve sloupcích či řádcích, přičemž je měřen horizontální a vertikální úhel a vzdálenost. U některých modelů je tak činěno pomocí systému dvou zrcadel nebo hranolů se vzájemně kolmými osami otáčení. Tento systém umožňuje rozmítat laserový svazek do relativně malého zorného pole, podobného jako u fotoaparátu nebo kamery (obr. 6 vlevo) a tyto skenery se nazývají kamerové [5]. U panoramatických skenerů je otáčeno celou dálkoměrnou součástí pomocí servomotorů, což umožňuje postihnout téměř celé okolí (obr. 6 vpravo).

## 3.1.3 Dělení skenerů podle dosahu

Podle dosahu můžeme skenovací systémy přibližně rozdělit do čtyř skupin:

- systémy s velmi krátkým dosahem D1 (0,1m až 2m)
- systémy s krátkým dosahem D2 (2m až 10 m)
- systémy se středním dosahem D3 (10 m až 100 m)
- systémy s dlouhým dosahem D4 (100 m až stovky m)

#### 3.1.4 Dělení skenerů podle přesnosti

Podle přesnosti můžeme skenery rozdělit v závislosti na jejich dosahu také do čtyř skupin. Jsou to skenery s malou základnou určené pro menší vzdálenosti skenování D1 s vysokou přesností P1 (0,01 mm až 1 mm), která však se vzrůstající vzdáleností výrazně klesá. Dále skenery s velkou základnou a skenery přímo určující vzdálenost (polární skenery) s krátkým dosahem skenování D2 s přesností P2 (0,5 mm až 2 mm). Polární skenery se středním dosahem D3 s nepatrným poklesem přesnosti měření s narůstající vzdáleností P3 (2 mm až 6 mm) a konečně polární skenery s dlouhým dosahem skenování D4 s přesností P4 (10 mm až 100 mm).

## 3.1.5 Dělení skenerů podle rychlosti skenování

Podle rychlosti měření podrobných bodů lze skenovací systémy přibližně rozdělit do čtyř skupin:

- systémy s velmi vysokou rychlostí R1 (více jak 50 000 bodů za sekundu)
- systémy s vysokou rychlostí R2 (1000 až 50 000 bodů za sekundu)
- systémy se střední rychlostí R3 (10 až 1 000 bodů za sekundu)
- systémy s nízkou rychlostí R4 ( do10 bodů za sekundu)

S velmi vysokou rychlostí skenují některé základnové skenery a skenery s polární metodou používající fázové dálkoměry. S vysokou rychlostí skenuje většina polárních skenerů používající pro měření délek tranzitní čas. Nízkou rychlostí měří především přístroje, které nejsou primárně zaměřeny na sběr velkého množství dat, například totální stanice se skenovacím modulem (zde je rychlost cca 1 bod za sekundu).

# 3.2 Kinematické systémy

Jako zástupce uveď me prvotní technologii leteckého laserového skenování, která je běžná ve vyspělých zemích Evropské unie a Spojených státech. Původně vojenská technologie je známa již dvě desetiletí. Do civilní praxe byla uvolněna koncem 80. let dvacátého století, ale masivní rozvoj proběhl až během posledních pěti let, kdy se letecké laserové skenování dostalo i na území České a Slovenské republiky. Pro určování digitálního modelu terénu a měření plošných území bývá laserový systém instalován v letadle, při měření objektů, kde je požadována větší přesnost a hustota bodů je nutné nainstalovat systém do vrtulníku (TopoSys, obr.7). Letadlo létá zpravidla ve výšce od 200 metrů do 1600 metrů rychlostí kolem 200 km/h. Absolutní přesnost měřených bodů se pohybuje v rozmezí 0,1 m až 0,3 m. Z těchto parametrů vyplývá, že takto získaný model terénu svou přesností vyhovuje pro většinu aplikací. Velkou výhodou je rychlost jeho získání a zpracování.



Obr. 7 Poměry při leteckém skenování

# 4 Programy

Programy můžeme rozdělit na programy pro sběr dat, zpracování dat a management projektů. Jsou to programy pro ovládání skeneru (nastavení oblasti a parametrů), programy pro záznam dat a základní vizualizaci. Programy pro spojování jednotlivých skenů (ruční, korelační, vlícovací body), programy pro zpracování mračna bodů (manipulace s daty – filtrace, zředění, vytvoření trojúhelníkové sítě – mesh), programy pro extrakci dílčích primitiv z mračna bodů, tvorba hran, potažení texturou z digitální fotografie, tvorba fotorealistických 3D modelů, export vyhodnocené informace do výměnných formátů (např. dxf). Pro zpracování měřených dat existují speciální programy buď přímo vytvářené pro konkrétní skener nebo univerzální.

# 5 Vlivy působící na kvalitu měřených dat

Na kvalitu získaných dat působí celá řada vlivů, se kterými je nutné při skenování počítat jako je přesnost měření, přesnost transformace, geometrie a povrch skenovaných objektů. Na přesnost měření působí především přesnost určení jednotlivých prvků, ze kterých se určuje prostorová poloha podrobných bodů, například u skenovacích systémů pracujících na principu polární metody se jedná o přesnost určení délky průvodiče r a přesnost určení úhlů  $\theta$ ,  $\phi$  (obr. 1). Tyto veličiny jsou ovlivňovány nejenom kvalitou jednotlivých komponent skeneru, ale také vnějšími vlivy jako jsou atmosférické podmínky. Dalšími významnými vlivy jsou přesnost spojování jednotlivých naměřených mračen bodů do jednoho výsledného celku a transformace do požadovaného souřadnicového systému. Tvar objektu spolu s vlastnostmi povrchu také výrazně ovlivňují kvalitu naměřených dat. U tvaru objektu stejně jako u povrchu zaměřovaného materiálu záleží na úhlu dopadu dálkoměrného svazku na zaměřovaný objekt.

# 6 Současné trendy

V další části uvedeme některé trendy v oblasti přístrojů a systémů, v testování skenovacích zařízeních, ve zpracování naměřených dat a ve využití skenovacích systémů v úlohách inženýrské geodézie.

# 6.1 Přístroje a systémy

V oblasti skenovacích přístrojů a systémů lze v posledních čtyřech letech spatřovat krom jiného *trend směřující k vývoji finančně nenáročných skenerů* [6], [7] s postačující přesností. Při tomto vývoji se používají různé postupy a principy pro určení 3D souřadnic. Tento trend se podařilo zachytit vývojem skeneru LORS a skeneru s virtuálními binárními značkami.

#### 6.1.1 LORS1

Při řešení grantového projektu 103/02/0357 "Moderní optoelektronické metody topografie ploch" byl vyvinut prototyp laserového a optického rotačního skeneru LORS1 pro snímání malých předmětů [8], [9]. Systém se skládal ze tří základních komponent - digitální kamery, laserového modulu a točny. *Digitální kamera* byla přesně umístěna *na teodolitu* a ve spojení s ním určovala zenitový a vodorovný úhel měřeného bodu. Laserový modul vytvářel laserovou rovinu. Točna byla charakterizována konstantní úhlovou rychlostí a byla u ní známa poloha středu otáčení a zajištěna vodorovnost. Měřený bod v prostoru byl pak určen průsečíkem stopy laserové roviny na předmětu a optické přímky, která je daná snímkovými souřadnicemi stopy z digitální kamery. Byly vytvořeny algoritmy pro měření a jeho zpracování. Dále bylo zpracováno programové zabezpečení pro měření a vyhodnocení a také výroba a sestavení prototypu.

#### 6.1.2 LORS2

V rámci grantového projektu 205/04/1398 "Využití 3D skenerů v geodézii a památkové péči" byla změněna metoda určení prvků vnitřní a vnější orientace digitální kamery [10], [11]. K tomu účelu bylo vytvořeno stacionární prostorové kalibrační bodové pole, tzv. kalibrační klec, s dvaceti body umístěnými kolem točny a zaměřovaného předmětu (obr. 8). Bodové pole je součástí systému a umožňuje měnit pozici kamery v závislosti na skenovaném předmětu a jeho tvaru, protože určení prvků vnitřní i vnější orientace je možné v kterékoli fázi měření ve spojení s novým postupem jejich určení – Direktní Lineární Transformací (DLT, výpočet se provádí iteračně metodou nejmenších čtverců a jeho součástí je výpočet polohy hlavního snímkového bodu a koeficientů radiální distorze [12]). Při měření je nutné točnu urovnat tak, aby její osa rotace byla přesně svislá a následně určit její polohu. Využívá se digitální kamera s rozlišením 1280x1024 a frekvencí snímkování 16 snímků za sekundu, která je umístěna do vhodné pozice na fotografickém stativu a prvky její orientace jsou určeny z bodů kalibrační klece. Při měření kamera snímá sekvence snímků zachycující pohyb objektu na točně. Z vlícovacích bodů na kalibrační kleci se počítají prvky vnitřní a vnější orientace kamery a s jejich využitím dále měřené body na objektu v profilu signalizovaném laserovou stopou. Pro vyhodnocení je třeba znát prostorové souřadnice vlícovacích bodů stabilizovaných na kalibrační kleci, rovnici laserové roviny a souřadnice osy rotace točny. Dále je třeba také určit dobu 1 otočky točny, což lze ze získané sekvence snímků. Stabilizace cílů na kalibrační kleci je provedena tak, že lze využít automatické vyhledávání středu terčů a tím zpřesnit určování snímkových souřadnic včetně zápisu do souboru. První fází určení souřadnic bodů profilu je určení snímkových souřadnic pixelů, které zachycují stopu laseru na objektu, druhou fází je pak určení snímkových souřadnic středů laserové stopy. Určení snímkových souřadnic hledaných pixelů je na základě metody vylepšeného prahování, popsané např. v [13]. Dále se počítají prostorové souřadnice bodů profilu z rovnic DLT a zjištěných snímkových souřadnic a podle "časové" souřadnice (čas pořízení snímku) se pak body profilu v prostoru otáčí kolem středu rotace točny tak, aby se body jednotlivých profilů rozprostřely zpět do bodů tělesa.





Obr. 8 Model laserového skenovacího systému LORS2 Obr. 9 Kalibrační přípravek

Výsledkem výpočtů jsou prostorové souřadnice bodů objektu. Pro potřeby posouzení přesnosti upraveného skenovacího systému LORS2 byl vytvořen kalibrační přípravek tvořený šesti přesnými prostorově umístěnými koulemi (o průměru 36,9 mm, obr. 9). Určené body byly proloženy koulemi s daným poloměrem metodou nejmenších čtverců (MNČ). Pro porovnání byly středy koulí určeny geodetickými metodami. Pro určení dosažené přesnosti byla využita prostorová transformace středů koulí kalibračního přípravku určených LORSem na geodeticky určené souřadnice. Z testování vyplynulo, že skener je vhodný pro skenování menších předmětů, do velikosti **max. 0,4 m**, a určuje polohu bodu se směrodatnou odchylkou v jedné souřadnici **do 0,5 mm**. Výhodou systému je také možnost využití více různých kamer a to i současně.

## 6.1.3 LORS3

Výraznou změnou oproti předchozí verzi je změna pohonu a řízení točny [14]. Doposud byla vždy točna poháněna motorkem s konstantní úhlovou rychlostí a úhel pootočení byl odvozen z doby pohybu točny. Nově byl pořízen krokový motor s řídící deskou, základní krok motoru je 1,8° a přesnost kroku je 0,1°. Deska je propojena s počítačem pomocí sériového portu a řízena ASCII příkazy. Pro zmenšení kroku a zvýšení přesnosti byla pořízena šneková převodovka s převodovým poměrem 60:1. Po dodání a montáži převodovky byla zjištěna vůle přibližně 0.5 stupně. Její vliv byl odstraněn jednostranným nájezdem točny do požadované polohy. Tím bylo umožněno velmi přesné a automatické řízení polohy točny. Další významnou inovací systému byla změna digitální kamery na zrcadlovku Canon EOS D350 s fyzickým rozlišením snímače 8 Mpixelů (3456 x 2304), s portem USB 2.0, s možností vývoje vlastního ovládacího programu a možností plného manuálního ovládání rychlosti závěrky, nastavení clony a ostření. Pro skenování je použit jednoduchý program LORS - Scanning, který ovládá jak digitální kameru tak krokový motor točny. Nastavuje se pouze umístění snímků, rozsah otočení a velikost kroku otočení. Pro vyhodnocení je nyní použit program nazvaný LORS – Processing. Po nastavení detekčních parametrů stopy RGB filtru a rozsahu filtrované oblasti proběhne automatická detekce snímkových souřadnic stopy laserového svazku. Po zadání konfiguračních parametrů výpočtu (parametry DLT, parametry točny, parametry laserové roviny a úhlový krok mezi snímky) se rovněž automaticky provede výpočet prostorových souřadnic. Přesnost systému byla určena zaměřením již zmíněného kalibračního přípravku a jeho porovnáním s přesnými souřadnicemi shodnostní prostorovou transformací. Směrodatná odchylka z transformace byla 0,2 mm.

#### 6.1.4 LORS4

V rámci grantového projektu 103/06/0094 "Zpracování a analýza produktů hromadného sběru 3D dat terestrickými skenovacím systémy" vzniklo nové řešení [14], které má řadu výhod oproti původnímu systému. Je možné skenovat objekty větších rozměrů až **1,6 m**  $\times$  **2,2 m**  $\times$  **1,4 m**, je možné získat z jediného snímku kvalitní *barevnou informaci* pro všechny vypočtené 3D souřadnice a je možné použít jednodušší rozdílovou metodu detekce laserové stopy. Systém tvoří *pevná základna* o délce 1 m. Na jednom konci základny je upevněna točna, s pevně uchyceným laserovým modulem, na druhém konci je umístěna digitální kamera (obr. 10).



Obr.10 Systém LORS4

Snímkové souřadnice jednotlivých pixelů laserové stopy na měřeném objektu při známých parametrech vnější a vnitřní orientace digitální kamery definují přímky v prostoru. Parametry vnitřní a vnější orientace digitální kamery jsou zjištěny a popsány pomocí parametrů direktní lineární transformace. Jsou známy parametry točny (bod a směrový vektor osy rotace). Kalibrací byl určen vztah mezi aktuální polohou točny a parametry laserové roviny. Prostorový bod je definován jako průsečík laserové roviny a záměrné přímky. *Pro kalibraci systému* bylo nutné určit parametry všech komponent systému. Určení prvků vnitřní a vnější orientace kamery bylo provedeno zaměřením kalibračního pole (20 bodů) o rozměrech zorného pole kamery ve vzdálenosti 2 m. Výpočet byl proveden DLT (1).

$$x' = \frac{L_1 \cdot X + L_2 \cdot Y + L_3 \cdot Z + L_4}{L_0 \cdot X + L_{10} \cdot Y + L_{11} \cdot Z + 1} = \frac{a}{c}, \quad y' = \frac{L_5 \cdot X + L_6 \cdot Y + L_7 \cdot Z + L_8}{L_9 \cdot X + L_{10} \cdot Y + L_{11} \cdot Z + 1} = \frac{b}{c}, \tag{1}$$

kde  $L_1$  až  $L_{11}$  jsou koeficienty DLT a x', y' snímkové souřadnice bodu X, Y, Z. DLT je doplněna o parametry odstraňující radiální distorze objektivu

$$x' = \frac{a}{c} - R' \cdot (x' - x'_{0}), \quad y' = \frac{b}{c} - R' \cdot (y' - y'_{0})$$
  

$$R' = k_{0}r^{2} + k_{1}r^{4} + k_{2}r^{6}; \quad r = \sqrt{(x' - x'_{0})^{2} + (y' - y'_{0})^{2}},$$
(2)

kde  $x_0$ ',  $y_0$ ' jsou souřadnice hlavního bodu a  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  jsou koeficienty polynomu popisujícího radiální distorze.

Vektor osy otáčení točny  $n_{RP}$  a bod na této ose  $X_{CR}$  byly určeny ze zaměření bodu na točně v několika polohách točny. Body byly následně proloženy kružnicí v prostoru. Laserová rovina byla zaměřena v jedné poloze točny deseti body a proložena rovnicí roviny. Rovina je definována rovnicí

$$A \cdot X + B \cdot Y + C \cdot Z + D = 0 \tag{3}$$

a z důvodu jednoznačnosti parametrů se volí podmínka

$$A^2 + B^2 + C^2 - 1 = 0. (4)$$

#### 6.1.4.1 Matematické řešení výpočtu podrobných bodů

Rovnice (2) a (3) jsou tři lineární rovnice o třech neznámých souřadnicích bodu *X*, *Y*, *Z*. Jak již bylo zmíněno, rovina je zaměřena v jedné poloze točny a je třeba určit její parametry v libovolné poloze točny. Jsou vhodně automaticky vypočteny tři body v této rovině v globálním (kalibračním) systému *XYZ*. Tyto body je ale nutné znát i v lokální rotující souřadnicové soustavě *xyz*. Základní vztah prostorové transformace je

$$\boldsymbol{X}_{i} = \boldsymbol{X}_{CR} + \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{x}_{i}, \tag{5}$$

kde  $X_i$  je bod *i* v souřadnicové soustavě *XYZ*,  $X_{CR}$  je posun, R je rotační matice a  $x_i$  lokálním souřadnicovém systému *xyz*. V naší situaci přepíšeme rovnici (5) na tvar

$$\boldsymbol{x}_{0i} = \boldsymbol{R}^T \cdot (\boldsymbol{X}_{0i} - \boldsymbol{X}_{CR}), \qquad (6)$$

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}_{\boldsymbol{Z}'}(\boldsymbol{a}_1) \cdot \boldsymbol{R}_{\boldsymbol{Y}'}(\boldsymbol{a}_2) \cdot \boldsymbol{R}_{\boldsymbol{Z}'}(\boldsymbol{a}_3), \qquad (7)$$

$$\boldsymbol{R}_{z'}(\boldsymbol{a}_{1}) = \begin{pmatrix} \cos \boldsymbol{a}_{1} & -\sin \boldsymbol{a}_{1} & 0\\ \sin \boldsymbol{a}_{1} & \cos \boldsymbol{a}_{1} & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \boldsymbol{R}_{y'}(\boldsymbol{a}_{2}) = \begin{pmatrix} \cos \boldsymbol{a}_{2} & 0 & \sin \boldsymbol{a}_{2}\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin \boldsymbol{a}_{2} & 0 & \cos \boldsymbol{a}_{2} \end{pmatrix}, \boldsymbol{R}_{z'}(\boldsymbol{a}_{3}) = \begin{pmatrix} \cos \boldsymbol{a}_{3} & -\sin \boldsymbol{a}_{3} & 0\\ \sin \boldsymbol{a}_{3} & \cos \boldsymbol{a}_{3} & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\boldsymbol{a}_{1} = \arccos\left(\frac{\boldsymbol{n}_{RPx}}{\sqrt{\boldsymbol{n}_{RPx}^{2} + \boldsymbol{n}_{RPy}^{2}}}\right), \boldsymbol{a}_{2} = \arccos(\boldsymbol{n}_{RPz}), \qquad (9)$$

kde  $n_{RP}$  je vektor osy otáčení točny, úhel  $\alpha_3$  je aktuální směr natočení točny, který je v okamžiku zaměření roviny nulový a index 0 u  $X_{0i}$  a  $x_{0i}$  znamená právě nulový  $\alpha_3$ .

Výsledná transformace tři bodů v rovině má tvar

$$\boldsymbol{x}_{0i} = \boldsymbol{R}_{Y'}^{T}(\boldsymbol{a}_{2}) \cdot \boldsymbol{R}_{Z'}^{T}(\boldsymbol{a}_{1}) \cdot (\boldsymbol{X}_{0i} - \boldsymbol{X}_{CR}).$$
(10)

Pokud bude laserová rovina natočena o nenulový  $\alpha_3$ , je transformace bodů do systému XYZ definována jako

$$\boldsymbol{X}_{i\boldsymbol{a}_{3}} = \boldsymbol{X}_{CR} + \boldsymbol{R}_{Z'}(\boldsymbol{a}_{1}) \cdot \boldsymbol{R}_{Y'}(\boldsymbol{a}_{2}) \cdot \boldsymbol{R}_{Z'}(\boldsymbol{a}_{3}) \cdot \boldsymbol{x}_{0i} \,.$$
(11)

Pokud obě transformace spojíme, získáme výsledný vztah ve tvaru

$$\boldsymbol{X}_{ia_{3}} = \boldsymbol{X}_{CR} + \boldsymbol{R}_{Z'}(a_{1}) \cdot \boldsymbol{R}_{Y'}(a_{2}) \cdot \boldsymbol{R}_{Z'}(a_{3}) \cdot \boldsymbol{R}_{Y'}^{T}(a_{2}) \cdot \boldsymbol{R}_{Z'}^{T}(a_{1}) \cdot (\boldsymbol{X}_{0i} - \boldsymbol{X}_{CR}).$$
(12)

Nyní je již možné získat rovnici laserové roviny v dané poloze točny proložením rovnice roviny třemi transformovanými body například podle [15] vztahem

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0,$$
(13)

a tedy

$$A = (y_2 - y_1) \cdot (z_3 - z_1) - (y_3 - y_1) \cdot (z_2 - z_1),$$
(14)

$$B = -[(x_2 - x_1) \cdot (z_3 - z_1) - (x_3 - x_1) \cdot (z_2 - z_1)],$$
(15)

$$C = (x_2 - x_1) \cdot (y_3 - y_1) - (x_3 - x_1) \cdot (y_2 - y_1),$$
(16)

$$D = -x_1 \cdot A - y_1 \cdot B - z_1 \cdot C.$$
<sup>(17)</sup>

## 6.1.4.2 Konstrukční řešení systému LORS4

Konstrukční řešení vychází ze systému LORS3, je nově konstruována točna a spolu s laserovým modulem je umístěna na pevné základně. Šířka stopy upravená clonou je 1 mm.

## 6.1.4.3 Vyhodnocení

Pro vyhodnocení je opět použit program LORS – Processing rozšířený o rozdílový filtr, který je oproti klasickému RGB filtru citlivější. U obou metod detekce laserové stopy byl program doplněn o export barev v RGB schématu z příslušných pixelů referenčního snímku.

## 6.1.4.4 Provedené experimenty

Bylo provedeno několik praktických měření k ověření funkčnosti celého systému a odhalení jeho problematických oblastí. V experimentu byla v několika pozicích zaměřena přibližně metrová sádrová socha. Po registraci měření z několika pozic byla vytvořena trojúhelníková síť a model (obr. 11).



Obr. 11 Model a fotografie sochy

#### 6.1.4.5 Testování přesnosti

Přesnost celého systému byla určena pomocí kalibračního přípravku (obr. 9) (relativní přesnost v malé části pracovní oblasti) systémem LORS4 a jeho porovnáním s přesnými souřadnicemi shodnostní prostorovou transformací. Směrodatná odchylka jednotková aposteriorní této transformace byla 0,4 mm. Dále bylo vytvořeno větší kalibrační pole, jehož body pokrývaly většinu pracovní oblasti skeneru. Pole bylo tvořeno přesnými koulemi a jeho rozměry byly přibližně 1,0 m  $\times$  1,0 m  $\times$  0,4 m. K vyhodnocení byla použita stejná metoda jako u kalibračního přípravku. Směrodatná odchylka transformace byla **1 mm**.

#### 6.1.5 Skener s virtuálními binárními značkami

Teoretický základ systému se opírá zejména o poznatky získané při řešení grantového projektu GAČR 103/02/0357 "Moderní optoelektronické metody topografie ploch". Systém využívá *promítání virtuálních značek s binárním kódem* na skenovaný předmět, který je snímán digitální kamerou (obr. 12) [16]. Klíčovou částí skeneru je generování a posléze identifikace kódů obsažených ve značkách. Vzhledem k tomu, že skenovaný objekt má obecně nepravidelný tvar, byly zavrženy tvarové či barvové značky, protože jejich snímaná podoba bude obecně zkreslena objektem. Po delším zvažování dalších možností byla vybrána varianta tzv. "binárních" značek. Pro každý bod je vytvořen unikátní číselný kód, který převedený do dvojkové soustavy vytváří sekvenci jedniček a nul. Pokud jedničce přiřadíme určitou barvu a nule jinou, lze ve vysílaném vzoru z dataprojektoru vytvořit posloupnost obrazů jednoznačně identifikující vybrané body. Dekódování pak probíhá tak, že ke každému

pixelu v posloupnosti snímků jsou dle provedené kalibrace přiřazeny hodnoty nula a jedna a tyto dále převedeny na číslo v desítkové soustavě. Stejná sekvence snímků se sejme z různých stanovisek a při stejně provedeném vyhodnocení mají identické body zaměřené z různých stanovisek stejný kód. Každý pixel obrazu získá binární a posléze dekadický číselný kód. Bodů se stejným kódem bude větší počet, snímkové souřadnice středu zachycené virtuální značky se získají aritmetickým průměrem. Nelze vyloučit chybný vznik bodu o stejném kódu např. u vadného pixelu či jinak a proto je vhodné ještě provést další filtraci bodů. Programové vybavení je tvořeno pro maximální počet 16383 bodů (celkem čtrnáct měřických snímků, tj.  $2^{14} - 1$  bodů), v závislosti na potřebné velikosti značky a velikosti plochy skenovaného předmětu je možno zvolit počet libovolně nižší, počet je určen počtem řádků a sloupců. Tomuto počtu bodů odpovídá čtrnáct snímků, k tomu je třeba ještě tří dalších kalibračních snímků. Čtvercové značky jsou ve vytvořeném programu rozmístěny ve čtvercovém rastru s volitelným odstupem řádků, resp. sloupců. Barva značek a pozadí je volitelné. Za podmínky znalosti prvků vnitřní a vnější orientace lze potom určit prostorové souřadnice signalizovaných bodů. Pro určení prvků vnitřní orientace je třeba signalizovat a zaměřit vhodný počet vlícovacích bodů. Z kalibračních snímků operátor odečte snímkové souřadnice a provede výpočet prvků vnitřní a vnější orientace dohromady pomocí DLT. Z takto určených parametrů pro každé stanovisko a snímkových souřadnic lze snadno s vyrovnáním vypočítat prostorové souřadnice bodů objektu signalizovaných virtuálními značkami (obr. 13).



Obr. 12 Uspořádání měření



Obr. 13 Virtuální značky při měření a mračno bodů

V systému je začleněna digitální kamera s rozlišením 1,3 megapixelů, která se připojuje k PC prostřednictvím USB 2.0 portu. Dále je využíván standardní dataprojektor. Systém byl testován s výsledkem, že pro objekt o rozměrech  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  je průměrná polohová odchylka 1,1 mm a výběrová směrodatná odchylka jednotková 1,3 mm.

# 6.2 Testování systémů

První testy skenovacích systémů byly realizované už v roce 2000 a neustále se navrhují další a další testovací postupy. Z hlediska testovaných parametrů a vlastností skenovacích systémů můžeme hovořit o testech zkoumajících přesnost měření délek, měření úhlů, schopnost měřit různé druhy materiálů a pod různými úhly dopadu, přístrojové chyby, určení geometrie skenovaného objektu, zkreslení zorného pole, rozlišení. Komplexní metodika pro testování skenovacích systémů pomocí referenčních těles byla navržena v [17]. Přesto je možno konstatovat, že *problematika testování skenovacích systémů není zdaleka uzavřená*. V další části jsou uvedeny nejnovější výsledky dosažené na našem pracovišti.

# 6.2.1 Metoda pro přímé určení směrodatných odchylek vodorovných směrů a zenitových úhlů laserových skenerů

Bylo publikováno velké množství článků věnujících se určování směrodatných odchylek měřených délek za různých podmínek (například [18] a [19]). Tyto testy nejsou příliš komplikované, protože směrodatnou odchylku délky lze například posuzovat ze "šumu" dat pří skenování kolmé roviny. Jinou metodou je posouzení vzdáleností při měření mezi radiálně umístěnými objekty (například koulemi). Tato metoda ale neurčuje směrodatnou odchylku délek, ale chybu délky mezi dvěma vymodelovanými objekty z velkého počtu bodů. Na výsledek mají také vliv nepříliš jasné efekty na okrajích měřeného objektu. Tato metoda je použitelná pro relativní srovnání různých skenovacích systémů. Několik prací se věnuje celkovým kalibracím skenovacích systémů na základně zaměření velkého počtu nadbytečných veličin (například [20] a [21]). Tyto metody umožňují odhadovat systematické chyby skenovacích systémů jako například kolimační chybu, úklonnou chybu, indexovou chybu a další. Z hlediska určování úhlových chyb skenovacích systémů je množství publikací výrazně menší (například [18]). Zde se však nejedná o určení směrodatných odchylek horizontálních směrů a zenitových úhlů, ale pouze o posouzení příčné chyby mezi zaměřenými a vymodelovanými objekty. Metoda má opět úskalí zmíněná výše a je použitelná pouze po relativní posouzení přesnosti různých skenovacích systémů.

Proto *byla navržena nová metoda* [22] *přímého určení* směrodatných odchylek horizontálních směrů a zenitových úhlů laserových skenerů. Metoda je z důvodu použité digitální komory použitelná pouze pro skenovací systémy s dálkoměrem o vlnové délce ve viditelné oblasti elektromagnetického záření. Metoda posuzuje pouze vnitřní přesnost skenovacího systému v rámci malého zorného pole (**1 gon** × **1 gon**) a výsledky tedy nejsou ovlivněny systematickými chybami přístroje jako kolimační chybou, úklonnou chybou, indexovou chybou a dalšími. Na druhou stranu ukazuje reálnou přesnost měření pro modelování menších objektů.

Metoda je založena na projektivní transformaci. Je vytvořeno rovinné kalibrační pole, které je umístěno kolmo na směr měření a fotogrammetricky zaměřeno. Po zatemnění je rovina s kalibračním polem zaměřena skenovacím systémem, při čemž skenované body jsou simultánně snímány digitální kamerou. Na základě fotogrammetrické metody je možné určit rovinnou polohu skenerem zaměřovaných bodů s přesností přibližně 0,1 mm v každé souřadnici. Měření ze skeneru je transformováno do rovinného systému kalibračního pole. Jsou posuzovány skutečné chyby skeneru jako rozdíly souřadnicových rozdílů obou metod (fotogrammetrické metody a skenování). Kalibrační pole bylo vytvořeno nalepením vhodných terčů v pravidelném rastru 50 mm × 50 mm na pevnou rovinnou bílou podložku a proměřeno.

Z identických bodů byly vypočítány parametry projektivní transformace [23] pro transformaci z kalibračního pole do snímku. Dále byly vypočteny parametry modifikované projektivní

transformace, která zavádí členy korigující radiální distorzi objektivu [23], [24]. Nově byly do neznámých veličin zařazeny snímkové souřadnice počátku polynomu radiální distorze  $x_0$  a  $y_0$ . Pří fotografování kalibračního pole a skenovaných bodů (obr. 14) byla použita komora Canon EOS D350.



Obr.14 Fotografie měření skeneru

Odečtené snímkové souřadnice byly inverzní transformací převedeny do soustavy souřadnic kalibračního pole. Měření skeneru HDS 3000 byla také transformována do systému kalibračního pole definovaného terči Leica. Byly vypočteny souřadnicové rozdíly mezi body z obou metod. Měření bylo prováděno ze dvou pozic (50 metrů, 50 metrů po odlišném natočení skeneru). Z každé pozice bylo měření opakováno pětkrát se stejným nastavením. Výrobcem udávaná úhlová směrodatná odchylka skeneru HDS 3000 je 60 µradiánů (3,8 mgon). Pokud zprůměrujeme výsledné hodnoty, pro testovaný skenovací systém HDS 3000 vychází směrodatná odchylka v horizontálním směru i zenitovém úhlu do 0,3 mgon, což jsou hodnoty, které se blíží přesnosti referenční fotogrammetrické metody.

# 6.3 Zpracování dat ze skenování

Na začátku je zakázka na vytvoření prostorového modelu určitého objektu. Při volbě měřické metody, která bude použita, je nutné zvážit velikost a tvar objektu a požadavky na přesnost. Je-li tento objekt prostorově členitý a jeho povrch se skládá z matematicky obtížně definovatelných ploch (haldy, skalní stěny, umělecké předměty jako jsou sochy nebo složitá průmyslová zařízení) a použití klasických měřických postupů by bylo složité, či nemožné, nabízí se jako vhodná metoda skenování. Typ skenovacího systému bude vybrán na základě velikosti objektu a požadované přesnosti. Pro objekty, jejichž velikost se pohybuje v řádu metrů až desítek metrů, jsou vhodné skenovací systémy pracující na principu polární metody. Pro objekty, u nichž je požadavek na vysokou přesnost výsledného modelu a jejichž rozměr nepřesahuje několik metrů, jsou vhodné základnové skenovací systémy. Před měřením bude provedena rekognoskace měřeného objektu a jeho okolí, na jejímž základě bude určen počet stanovisek skeneru a jejich umístění. Zda budou při skenování použity identické body, záleží na zadání projektu: na požadované přesnosti, případně na požadavku na umístění výsledného modelu do souřadnicového systému. Identické body slouží nejen k umístění naskenovaného mračna do souřadnicového systému, ale také ke spojování jednotlivých mračen do jednoho výsledného mračna. Toto spojování lze provést i bez použití identických bodů pomocí překrytového území, na kterém je možné identifikovat dostatečné množství bodů společné pro obě spojovaná mračna. Parametry skenování budou nastaveny z požadavku na přesnost a rozlišení, zejména hustota skenovaného mračna bodů (vzájemný rozestup bodů v mračně ve vertikálním a horizontálním směru, platí pro body měřené na ploše kolmé ke směru skenování). Dále je kromě prostorových souřadnic podrobných bodů možné určovat další údaje jako je intenzita odraženého záření nebo snímat objekt pomocí digitální kamery.

Po zaměření objektu následuje zpracování naměřených dat. Nejprve dojde ke zpracování mračen. Jednotlivá mračna budou vizuálně zkontrolována, očištěna od šumu (body, které byly zaměřeny, ačkoli být zaměřeny neměly, např. dopravní ruch v mračnu ulice) a redukována (např. tzv. decimací bodů, při níž je zvolena určitá nejvyšší hustota bodů v mračnu. která nebude překročena, všechny body navíc budou smazány). Poté budou jednotlivá mračna pospojována do jednoho výsledného mračna. Toto mračno bude také očištěno a redukováno. Následuje modelování. Při modelování je možné nahrazovat jednotlivé části mračna jednoduchými objekty (rovina, válec, kužel atd.) nebo složitějšími objekty (ventily, kohouty atd.). Další možností je modelování povrchu polygonovými sítěmi. Povrch takto vytvořeného modelu je možné upravit pomocí textury nebo snímků reálného objektu. Závěrem celého zpracování je kontrola kvality vytvořeného modelu. Znalost a programové zpracování problematiky prokládání geometrických útvarů množinou bodů v souladu s metodou nejmenších čtverců může být využito k pokročilým účelům. Jedná se například o modelování procesu měření skenovacího sytému a vyhodnocení naměřených dat za účelem prognózy chyb nebo o analýzu přesnosti skenovacího systému založené na vyhodnocení zaměřených geometrických útvarů, u kterých jsou známy modelové parametry.

#### 6.3.1 Definice problému

V prostoru  $\mathbb{R}^n$  je dáno *m* bodů. Je dána funkce v implicitním tvaru

$$F(\mathbf{a}, \mathbf{X}) = 0, \qquad (18)$$

nebo parametrickém tvaru

$$\mathbf{X}(\mathbf{a},\boldsymbol{u})\,.\tag{19}$$

**a** je sloupcový vektor neznámých modelových parametrů dimenze p, **X** je sloupcový vektor daných bodů dimenze  $(m \cdot n, 1)$  a u je vektor parametrů (parametrického popisu geometrického útvaru). Úkolem algoritmu je určení hodnot parametrů **a** tak, aby byla minimalizována zadaná funkce. V případě prokládání geometrických útvarů se jedná o funkci

$$\boldsymbol{s}_{0}^{2} = \boldsymbol{\mathsf{d}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\mathsf{P}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\mathsf{P}} \boldsymbol{\mathsf{d}}, \qquad (20)$$

nebo o funkci

$$\boldsymbol{S}_{0}^{2} = (\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}')^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} (\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}').$$
(21)

**d** je sloupcový vektor ortogonálních vzdáleností mezi danými body  $\mathbf{X}_i$  a odpovídajícími body na geometrickém útvaru  $\mathbf{X}'_i$ ,  $\mathbf{P}^T \mathbf{P}$  je váhová matice nebo matice váhových koeficientů ( $\mathbf{Q}^{-1}$ ),  $\mathbf{P}$  je symetrická matice a  $\mathbf{X}'$  je sloupcový vektor souřadnic bodů na útvaru odpovídající bodům vektoru  $\mathbf{X}$ . Funkce ( $\sigma_0/\sqrt{r}$ ), kde *r* značí počet stupňů volnosti, je tzv. směrodatná odchylka jednotková aposteriorní.

Uvedená problematika se v zahraniční literatuře nazývá například geometrické prokládání (geometrical fitting), Euklidovské prokládání (Euclidean fitting), regrese podle ortogonálních vzdáleností (orthogonal regression), obecněji nelineární regrese nebo prokládání podle ortogonálních vzdáleností (orthogonal distance fitting). Dále bude užíván zkrácený poslední uvedený termín ve formě "ortogonální prokládání".

Ortogonální prokládání je používáno všude tam, kde je nutné prokládat křivky nebo plochy nadbytečným počtem měření: inženýrská geodézie, strojírenství, souřadnicová metrologie, astronomie, fyzika částic, počítačové a přístrojové vidění, robotika, sportovní a zábavní

průmysl. Vzhledem k našemu zaměření je práce orientována zejména na první uvedenou aplikační oblast. Z praktického hlediska to znamená, že není nutné brát ohled na zpracování v reálném čase.

#### 6.3.2 Metody prokládání

Před nástupem metody ortogonálního prokládání se většinou používaly různé náhradní funkce k prokládání. To bylo způsobeno jednak nedostatečným výpočetním výkonem a jednak i teoretickou složitostí ortogonálního prokládání.

První a nejednodušší náhradní funkcí je tzv. algebraické prokládání. Ta je založena na algebraické vzdálenosti, která je minimalizována

$$\min_{\mathbf{a}} \sum_{i=1}^{m} F^2(\mathbf{a}, \mathbf{X}_i).$$
(22)

Jak je vidět u algebraického prokládání, je minimalizována přímo implicitní funkce v základním tvaru (18).

Další možností je minimalizování upravené implicitní funkce ve tvaru

$$\min_{\mathbf{a}} \sum_{i=1}^{m} \left( \frac{F(\mathbf{a}, \mathbf{X}_{i})}{\left\| \nabla F(\mathbf{a}, \mathbf{X}_{i}) \right\|} \right)^{2},$$
(23)

kde  $\|v\|$  znamená  $l_2$  normu vektoru v.

Tato metoda se nazývá normalizované algebraické prokládání. Pro úplnost je uvedena i funkce ortogonálního prokládání ve stejném tvaru:

$$\min_{\mathbf{A}_{i} \in \mathbf{X}_{i}^{\prime} \}_{i=1}^{m}} \sum_{i=1}^{m} \left\| \mathbf{X}_{i} - \mathbf{X}_{i}^{\prime} \right\|^{2}, \qquad (24)$$

což je jen jiná forma zápisu (20) nebo (21) bez uvedení vah.



obr. 15 Schéma ortogonálního prokládání geometrického útvaru v parametrickém tvaru Hlavní výhodou metod algebraického prokládání a normalizovaného algebraického prokládání je snadná definice funkce vzdálenosti, která se v sumě čtverců minimalizuje. Pro algebraické prokládání existuje vždy uzavřené analytické řešení pro výpočet definované

vzdálenosti. Analýzou těchto metod jsme došli k závěrům shodným s hodnocením například v [25], [26] a [27]. Mezi zásadní nevýhody algebraického prokládání patří to, že definice chyb není v souladu s principem měření, není zřejmá interpretace algebraické vzdálenosti, pro útvary vyššího než druhého stupně (kvadratické plochy, …) neexistuje efektivní metoda k získání fyzických parametrů (tvar, velikost, pozice, …) z algebraických parametrů, parametry modelu jsou závislé na souřadnicových transformacích.

V případě ortogonálního prokládání existuje uzavřené analytické řešení jen pro nejednodušší útvary. V případě řešení ortogonálního prokládání při neexistenci uzavřeného analytického řešení je výpočet ortogonální vzdálenosti nejnáročnější částí. Až na několik výjimek pro nejjednodušší útvary (koule, kružnice, elipsa) je nutné ortogonální prokládání řešit iterativně. Jako pro každou iterativní metodu je nutné zadat pro ortogonální prokládání přibližné počáteční hodnoty modelových parametrů, které lze získat např. pomocí metody "evoluce modelů" [25],[28], [29], [30] nebo podle [31] a [32] pomocí normál k povrchu definovanému mračnem bodů.

## 6.3.3 SPATFIG

V rámci řešení grantového projektu 103/06/0094 "Zpracování a analýza produktů hromadného sběru 3D dat terestrickými skenovacím systémy" je vyvíjen SPATFIG (zkratka ze spojení "spatial figure" – prostorový útvar), což je knihovna tříd a funkcí k ortogonálnímu prokládání geometrických útvarů ve 3D (přímka, kružnice, rovina, koule, válec, kružnice\_2D a přímka\_2D, pro útvary koule, válec a kružnice\_2D je možnost zavedení podmínky známého poloměru) zpracovaná ve shodě s dříve uvedenými algoritmy [11]. Jako programovací jazyk k tvorbě knihovny SPATFIG byl použit objektově orientovaný jazyk C++. Použita byla kromě standardních knihoven C/C++ ještě knihovna *matvec* projektu GNU Gama [33], [34]. Tato knihovna obsahuje základní operace s maticemi a vektory.

# 6.3.4 Komerční programy k ortogonálnímu prokládání v oblasti geodézie a posouzení vlastností algoritmu metody

Komerční programové aplikace k ortogonálnímu prokládání nepracují samostatně, ale tvoří skupinu nástrojů ke zpracování mračna bodů. Tento program pracuje v grafickém režimu a umožňuje interaktivní výběr části mračna bodů. Nástroje k ortogonálnímu prokládání většinou obsahují základní geometrické útvary, které se mohou vyskytnout v praxi.

Hlavní nevýhody komerčních programů jsou: není znám algoritmus výpočtu a to omezuje jeho kontrolu, nepracuje se s kovarianční maticí vstupních bodů, nezobrazují se směrodatné odchylky a kovarianční matice vyrovnaných modelových parametrů, není možno doplnit další geometrické útvary, vysoká pořizovací cena. Tyto důvody vedly k vývoji knihovny SPATFIG. K ověření její funkčnosti byly použity komerční programy a to Cyclone 5.1 a 3Dipsos 3.0.3. Testování proběhlo na datech ze skeneru Leica HDS 2500, konkrétně zaměření válce a koule s různými procenty pokrytí. Poloměr byl určen souřadnicovým měřicím systémem FARO (směrodatná odchylka ve všech osách 0,01 mm). Z výsledků lze konstatovat, že rozdíly mezi výsledky SPATFIGu a Cyclone jsou zanedbatelné. Cyclone kromě jediného případu vypočítal správné modelové parametry a nebo žádné. Naopak 3Dipsos vypočítal modelové parametry vždy, ale ve dvou případech dosáhl zcela chybných výsledků. I v dalších případech rozdíly výrazně přesahují chyby očekávané. Ukázalo se, že při použití algebraického prokládání se výsledky shodují s výsledky programu 3Dipsos, což potvrzuje nevhodnost využití tohoto algoritmu. Význam uvedené chyby lze vidět na obr. 16. Pro objasnění rozdílnosti algebraického prokládání a ortogonálního prokládání v nejjednodušším případě koule jsou uvedeny funkce použité v minimalizaci (25).



Obr.16 Rozdíly v proložení koule a válce testovanými programy

$$\frac{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2 - r^2 = 0}{\sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2} - r = 0}.$$
(25)

Je nutné uvést, že tyto chyby se projeví výrazněji pouze ve speciálních, ale přesto reálných případech. Obecně lze konstatovat, že čím je menší procentuální pokrytí geometrického útvaru, tím je chyba způsobená algebraickým prokládáním větší. Dalším faktorem je neznalost poloměru. Ve stejných případech se známým poloměrem jsou chyby v poloze řádově menší. Určité systematické chyby jsou pozorovány i u ortogonálního prokládání. Nejen pro testování SPATFIGu bylo nutné vytvořit simulátor měření skenovacího systému. Výhodou takového systému je, že lze analyzovat působení jednotlivých složek měření.

#### 6.3.5 Simulátor měření skeneru

V rámci řešení grantového projektu 103/06/0094 "Zpracování a analýza produktů hromadného sběru 3D dat terestrickými skenovacími systémy" byla řešena problematika automatizovaného zpracování mračen bodů získaných z měření skenerů. Jedním ze základních kamenů řešení projektu je prokládání základních matematických ploch mračny bodů. Základními plochami zde využívanými jsou rovina, koule, válec, kužel, eliptický válec, eliptický kužel, a proto byla vytvořena knihovna tříd Virtual Laser Scanner (VLS), která *umožňuje generovat mračno bodů včetně simulace chyb měření* a nastavování směru laserového skeneru. Princip simulace měření spočívá v generování jednotlivých směrů měření ze stanoviska skeneru definovaných směrem a zenitovým úhlem vysílaného měřicího svazku paprsků a následně výpočet souřadnic průsečíku takto definované přímky s matematicky definovanou plochou. Plochy jsou definovány rovnicemi (26) – (31),  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , r jsou konstanty definující tvar a velikost plochy a X, Y, Z prostorové souřadnice bodu plochy.

Rovina: 
$$\alpha \cdot X + \beta \cdot Y + \gamma \cdot Z + \delta = 0.$$
 (26)

- Koule:  $X^2 + Y^2 + Z^2 r^2 = 0.$  (27)
- Kužel:  $X^2 + Y^2 r^2 \cdot Z^2 = 0.$  (28)
- Válec:  $X^2 + Y^2 r^2 = 0$ . (29)

Eliptický kužel: 
$$\frac{X^2}{\alpha^2} + \frac{Y^2}{\beta^2} - Z^2 = 0.$$
(30)

Eliptický válec: 
$$\frac{X^2}{\alpha^2} + \frac{Y^2}{\beta^2} - 1 = 0.$$
(31)

Pro výpočet průsečíku a pro získání svazku směrů pro měření se přímka popíše rovnicí (32).

$$X = \cos(\sigma) \cdot \sin(z) \cdot d + A = a \cdot d + A$$
  

$$Y = \sin(\sigma) \cdot \sin(z) \cdot d + B = b \cdot d + B , \qquad (32)$$
  

$$Z = \cos(z) \cdot d + C = c \cdot d + C$$

kde *s* je směrník přímky, *z* zenitový úhel, *d* vzdálenost od stanoviska a [*A*, *B*, *C*] souřadnice stanoviska v pořadí X, Y, Z. Složky směrového vektoru lze pro zjednodušení dalších odvození označit *a*, *b*, *c* dle rovnice (33).

$$a = \cos(\sigma) \cdot \sin(z)$$
  

$$b = \sin(\sigma) \cdot \sin(z) . \qquad (33)$$
  

$$c = \cos(z)$$

Průsečík takto definované přímky s rovinou lze vypočítat dosazením rovnic (32) do rovnice (26) a s pomocí triviálních úprav získat vztah (34), neznámou je pouze vzdálenost *d*.

$$d = -\frac{\alpha \cdot A + \beta \cdot B + \gamma \cdot C + \delta}{\alpha \cdot a + \beta \cdot b + \gamma \cdot c}.$$
(34)

U ostatních ploch daných rovnicemi (27) až (31) stejný postup řešení vede na kvadratickou rovnici, jejíž kořeny jsou průsečíky přímky s plochou. Z hlediska skenování je důležité znaménko délky *d*, které musí být kladné, a hledaným průsečíkem s plochou je dále bližší bod z případné dvojice. Ostatní rovnice pro výpočet vzdálenosti průsečíků od počátečního bodu:

Koule: 
$$d^{2} + (2 \cdot A \cdot a + 2 \cdot B \cdot b + 2 \cdot C \cdot c) \cdot d + (A^{2} + B^{2} + C^{2} - r^{2}) = 0$$
 (35)

Kužel: 
$$(a^2 + b^2 - r^2 \cdot c^2) \cdot d^2 + (2 \cdot A \cdot a + 2 \cdot B \cdot b - r^2 \cdot 2 \cdot C \cdot c) \cdot d + (A^2 + B^2 - r^2 \cdot C^2) = 0$$
 (36)

Válec: 
$$(a^{2} + b^{2}) \cdot d^{2} + (2 \cdot A \cdot a + 2 \cdot B \cdot b) \cdot d + (A^{2} + B^{2} - r^{2}) = 0.$$
 (37)  
 $((\beta^{2} \cdot a^{2} + \alpha^{2} \cdot b^{2} - \alpha^{2} \cdot \beta^{2} \cdot c^{2}) \cdot d^{2} + )$ 

Eliptický kužel: 
$$\begin{pmatrix} (\beta^{2} \cdot a + \alpha^{2} \cdot b - \alpha^{2} \cdot \beta^{2} \cdot 2 \cdot C \cdot c) \cdot d + \\ + (\beta^{2} \cdot A^{2} + \alpha^{2} \cdot B^{2} - \alpha^{2} \cdot \beta^{2} \cdot C^{2}) \end{pmatrix} = 0.$$
(38)

Eliptický válec:  $\begin{pmatrix} \left(\beta^{2} \cdot a^{2} + \alpha^{2} \cdot b^{2}\right) \cdot d^{2} + \left(\beta^{2} \cdot 2 \cdot A \cdot a + \alpha^{2} \cdot 2 \cdot B \cdot b\right) \cdot d + \\ + \left(\beta^{2} \cdot A^{2} + \alpha^{2} \cdot B^{2} - \alpha^{2} \cdot \beta^{2} \cdot r^{2}\right) \end{pmatrix} = 0.$ (39)

Při skutečném měření budou měřená tělesa a plochy v obecné poloze. Pro výpočet je výhodné využít výše uvedených rovnic a skener (jak bude dále ukázáno) natočit do požadované polohy pomocí rotačních matic definovaných v dalším odstavci. Lineární transformace v *n*-rozměrném prostoru je obecně dána rovnicí (40).

$$\mathbf{X} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{T} , \qquad (40)$$

Kde **x**, **X** jsou vektory souřadnic v jedné a druhé soustavě (rozměr (n,1)), **M** je matice měřítkových koeficientů (n,n), **R** je matice zobrazení (n,n), **T** je vektor translací (n,1). V případě, že transformace je lineární, matice zobrazení **R** musí být v uvedených vztazích pouze maticí rotace a tedy je dána součinem elementárních rotací podle jednotlivých os  $\mathbf{R}_{\mathbf{X}}(\omega)$ ,  $\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}(\varphi)$ ,  $\mathbf{R}_{\mathbf{Z}}(\kappa)$  (41). Matice měřítkových koeficientů se vzhledem k charakteru výpočtů dále neuplatní.

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X}}(\boldsymbol{\omega}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\boldsymbol{\omega}) & \sin(\boldsymbol{\omega}) \\ 0 & -\sin(\boldsymbol{\omega}) & \cos(\boldsymbol{\omega}) \end{pmatrix}, \\ \mathbf{R}_{\mathbf{Y}}(\boldsymbol{\varphi}) = \begin{pmatrix} \cos(\boldsymbol{\varphi}) & 0 & -\sin(\boldsymbol{\varphi}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\boldsymbol{\varphi}) & 0 & \cos(\boldsymbol{\varphi}) \end{pmatrix}, \\ \mathbf{R}_{\mathbf{Z}}(\boldsymbol{\varphi}) = \begin{pmatrix} \cos(\boldsymbol{\varphi}) & \sin(\boldsymbol{\varphi}) & 0 \\ -\sin(\boldsymbol{\varphi}) & \cos(\boldsymbol{\varphi}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$
(41)

Záleží na pořadí, ve kterém se elementární rotační matice násobí, dále je použito rovnice (42)

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{\mathbf{X}}(\boldsymbol{\omega}) \cdot \mathbf{R}_{\mathbf{Y}}(\boldsymbol{\varphi}) \cdot \mathbf{R}_{\mathbf{Z}}(\boldsymbol{\kappa}) \quad . \tag{42}$$

Pro generování měření je třeba znát konstanty definující plochu (např. poloměr r pro válec), souřadnice stanoviska  $S[X_S, Y_S, Z_S]$ , úhly otočení kolem jednotlivých os w, j, k sloužící k naklonění plochy, směrodatnou odchylku nastavení směru a svislého úhlu při skenování, směrodatné odchylky měření směru, svislého úhlu a délky a také rozmezí a krok skenování pro vodorovný směr a svislý úhel. Vzhledem k tomu, že se jedná o matematický model, je třeba také definovat maximální vzdálenost, kterou skener změří.

Zadané hodnoty jsou v reálné soustavě  $C_R$ , ve výpočtu ale budou figurovat ještě další dvě soustavy a to "soustava skeneru"  $C_S$  a "soustava svislé plochy"  $C_P$ . Na obr. 17 je pro názornost jako plocha zobrazen válec.



Obr. 17 Reálná soustava  $C_R$ , soustava skeneru"  $C_S$ , soustava svislé plochy  $C_P$ 

V soustavě skeneru  $C_S$  se generují směry a svislé úhly v zadaném kroku a intervalu. Výpočet vzdálenosti průsečíku od skeneru je třeba provést v soustavě "svislé plochy"  $C_P$  a výslednou polohu vypočítat v soustavě  $C_R$ . Matice rotace pro transformaci mezi soustavou  $C_S$  a soustavou  $C_R$  závisí na tom, kam má "osa záběru" skeneru, tedy nulový vodorovný směr a svislý úhel o velikosti 100 gon směřovat. Jednou z možností je, aby tento "nulový směr" byl od stanoviska skeneru do počátku souřadné soustavy  $C_R$ . Z obr. 17 vyplývá, že se uplatní pouze elementární rotace  $\mathbf{R}_Y(\varphi)$  a  $\mathbf{R}_Z(\kappa)$ . Vztah je definován tak, že vektor (1,0,0) v soustavě  $C_S$  je třeba přetransformovat do soustavy  $C_R$ , kde má tvar (X<sub>S</sub>/d, Y<sub>S</sub>/d, Z<sub>S</sub>/d), kde d je vzdálenost stanovisko – počátek soustavy souřadnic.

$$\begin{pmatrix} \cos(\phi) \cdot \cos(\kappa) & \cos(\phi) \cdot \sin(\kappa) & -\sin(\phi) \\ -\sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ \sin(\phi) \cdot \cos(\kappa) & \sin(\phi) \cdot \sin(\kappa) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-X_s}{d} \\ \frac{-Y_s}{d} \\ \frac{-Z_s}{d} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix}.$$

$$d = \sqrt{X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2}.$$
(43)

Z vzorce (43) vyplývají vzorce (45), ze kterých lze spočítat rotace j a k.

$$x_{s} = \cos(\phi) \cdot \cos(\kappa)$$
  

$$y_{s} = -\sin(\kappa) \qquad (45)$$
  

$$z_{s} = \sin(\phi) \cdot \cos(\kappa)$$

Druhou možností je tvar vektoru v soustavě  $C_R$  (X<sub>S</sub>/d, Y<sub>S</sub>/d, 0), který zajistí vodorovnou záměru nulového směru. Výpočet je totožný s dříve uvedeným postupem, pouze úhel  $\varphi = 0$ . Výsledkem předchozích odvození jsou matice rotace. **R**<sub>S</sub> slouží k transformaci mezi soustavou skeneru **C**<sub>S</sub> a soustavou skutečnosti **C**<sub>R</sub> a určí se ze vzorců (45), **R**<sub>P</sub> k transformaci do **C**<sub>R</sub> ze soustavy svislé plochy **C**<sub>P</sub> (protože definuje náklony plochy ze svislé polohy do obecné). Jednotlivé kroky generování jsou dále uvedeny v [35], změny a chyby měření mající charakter normálního rozdělení jsou vytvářeny pomocí generátoru normálního rozdělení. Na obr. 18 je demonstrován výsledek virtuálního skenování válce s eliptickou podstavou.





#### 6.4 Využití skenovacích systémů pro úlohy inženýrské geodézie

Na mezinárodních konferencích se ukazuje trend v posunu použití skenování pro řešení náročných úloh inženýrské geodézie – *měření posunů a přetvoření* [36]. Měření posunů a přetvoření je důležitou součástí geodetických prací při provádění a monitorování staveb. V současné době jsou nejčastěji používané způsoby měření posunů a přetvoření s využitím totálních stanic nebo GPS technologií. Zajímavou možností, která se nabízí v oblasti měření posunů a přetvoření, je technologie skenování, která nedosahuje pro jednotlivé body takové přesnosti jako v případě přesných totálních stanic nebo dlouhodobých observací GPS, ale tento nedostatek vyvažuje v rychlosti měření, hustotě bodů a komplexnosti zachycení povrchu. V rámci řešení výzkumného záměru MSM 684 0770005 "Udržitelná výstavba" byly posouzeny možnosti využití technologie skenování pro měření posunů a přetvoření pomocí experimentů, které ověřují přesnost určení posunů HDS terčů, mračna bodů a

vymodelovaných rovin. Experimenty byly provedeny v laboratorních podmínkách s využitím interferometru i v podmínkách důlní štoly a tunelu. Výsledky byly posouzeny s využitím hypsometrických map a na základě výpočtu směrodatných odchylek posunů. Posuny byly určovány nejdříve v podélném směru ve vzdálenosti vozíku interferometru od skeneru přibližně 16 m a 5 m. Na vozíku byly umístěny dva terče HDS  $3" \times 3"$  čtvercového tvaru, jeden kruhový terč o průměru 6" a přesná koule o průměru 218 mm (obr. 19) a zaměřeny v deseti pozicích. Posuny mezi jednotlivými pozicemi byly v řádu centimetrů.



Obr. 19 Fotografie a mračno bodů terčů na vozíku interferometru

Terče byly ve všech pozicích zaměřeny jako HDS terče s využitím vnitřního procesu určování polohy identických bodů programem Cyclone Scan. Stejným způsobem byla zaměřena i koule. Pak byla na vozíku umístěna rovina tak, aby normála této roviny byla přibližně rovnoběžná se směrem skenování. Pro určení posunů v příčném směru bylo provedeno měření na vzdálenost přibližně 5 m z důvodu omezených prostor laboratoře. Z těchto pozic byly vypočteny posuny terčů mezi jednotlivými etapami. Ty byly porovnány s přesnými posuny získanými z měření interferometru. Vzhledem k přesnosti interferometru (0,7 µm) lze získané rozdíly považovat za skutečné chyby. Z těchto chyb byly vypočteny směrodatné odchylky posunu terčů. Při určování kulového terče byl v programu Cyclone Scan použit průměr standardních kulových HDS terčů (průměr 6"). Při určování posunů roviny v podélném směru byly její mračna bodů v jednotlivých etapách proloženy rovinou v Cyclonu. Pro posouzení posunu byla vypočtena vzdálenost jednoho bodu jedné roviny od roviny druhé. Zaměření roviny je možné použít pro posouzení směrodatné odchylky posunu jednoho bodu mračna. K tomu je možné použít metodu rozdílu dvou digitálních modelů povrchu (DSM). Pro každý bod jednoho mračna je vypočtena vzdálenost k DSM vytvořeného z druhého mračna. Tato vzdálenost je porovnána se vzdáleností určenou interferometrem. Dosažený rozdíl je považován za skutečnou chybu. Je-li očekáván homogenní a k povrchu přibližně normálový posun, byla k posouzení posunů navržena metoda průměrného posunu bodu. Metoda je použitelná pro povrch libovolného tvaru. Základ metody je stejný jako v předchozím odstavci. Pro obě mračna je vytvořen DSM. V dalším kroku je vytvořen rozdílový model. Průměrná souřadnice Z rozdílového modelu v určité oblasti představuje průměrný posun. Přesnost zaměření čtvercového a kruhového rovinného HDS terče je obdobná. Směrodatná odchylka posunu rovinného HDS terče a koule v podélném směru je přibližně 0,7 mm ve vzdálenosti 5 m i 16 m. Pro rovinu ve vzdálenosti 5 m je směrodatná odchylka 0,36 mm. Dále byla zjištěna směrodatná odchylka posunu jednoho bodu mračna v podélném směru o hodnotě 3,3 mm. Směrodatná odchylka posunu rovinného HDS terče v příčném směru je přibližně 0,15 mm a pro kouli 0,85 mm. Vyšší přesnost v příčném směru je dána vyšší úhlovou přesností skeneru HDS 3000 oproti přesnosti délkové [22]. Pro vyhodnocení normálových posunů libovolného povrchu byla navržena metoda průměrného posunu bodů. Ta je založena na rozdílovém DSM

sledované oblasti. Výsledek není zatížen šumem měření. Tato metoda byla použita pro vyhodnocení podélných posunů roviny a výsledná směrodatná odchylka je 0,32 mm. Měření v reálném prostředí probíhaly v důlní štole komplexu UEF Josef a v budovaném železničním tulenu "Nové spojení" v Praze. Měření probíhala v přímém úseku páteřní přístupové části komplexu UEF Josef, která má přibližně obdélníkový průřez o rozměrech 4,2 m × 2,7 m. Bylo zaměřováno přibližně 15 m štoly s rozlišením 25 mm ve vzdálenosti 8 m (obr. 20). Další měření probíhala v jižním tubusu dvoukolejného železničního tunelu budovaného v rámci projektu "Nové Spojení". Tunel je ve fázi budování sekundárního ostění. Měření probíhalo na primárním ostění v přímé části tunelu (povrch – stříkaný beton). Tunelový tubus je přibližně válcového tvaru o průměru přibližně 12 m viz obr. 21. Bylo zaměřeno 50 metrů tunelu. Měření bylo rozděleno na pět desetimetrových segmentů. Hustota skenování 50 mm × 50 mm byla vždy nastavena pro průměrnou vzdálenost segmentu od skeneru. Z důvodu snížení hustoty podrobných bodů na ostění v podélném směru s rostoucí vzdáleností od skeneru ([37]) byl poslední segment ještě zaměřen s hustotou 20 mm × 20 mm.



Obr. 20 Mračno bodů štoly

Veškeré měření proběhlo z jednoho stanoviska. Každý segment byl zaměřen dvakrát s nastavením mírně změněné oblasti skenování, aby bylo zajištěno měření odlišných bodů. Kromě toho byl zaměřen první a čtvrtý segment při identickém nastavení parametrů skenování. Při zpracování byl nejprve vytvořen DSM pro každý sken. Tento DSM je následně zobrazen hypsometricky a interpretován. Číselné výsledky byly použity také pro určení směrodatné odchylky jednoho bodu mračna (tab.1). K vyhodnocení byl použit program Atlas s nadstavbou Tunel. Interpretace šumem zatížených hypsometrických modelů je obtížná a proto byla dále použita metoda průměrného posunu (obr. 22). V tab. 1 je v sekci měření po identických bodech zřetelný pokles směrodatné odchylky jednoho bodu s rostoucí vzdáleností



Obr.21 Mračno bodů železničního tunelu

segmentu od skeneru. To je pravděpodobně způsobeno zvětšeným úhlem dopadu laserového svazku a díky tomu potlačeným vlivem přesnosti dálkoměru a zvýšeným vlivem přesnosti

měření úhlů ([37]). V sekci měření rozdílných bodů je vidět v segmentu pět vyšší přesnost při měření totožné oblasti s větší hustotou skenování. To je pravděpodobně způsobeno menší generalizací zaměřovaného povrchu a tedy snížením vlivu jeho členitosti. V tab. 1 je dále vidět, že směrodatná odchylka v posunu jednoho bodu se i v reálném prostředí pohybuje kolem 3 mm, stejně jako v laboratorních podmínkách. Pokud je použita metoda průměrných posunů, jsou dosažené směrodatné odchylky zhruba poloviční. Jejich konkrétní velikost závisí na velikosti průměrované oblasti a na hustotě skenování. Velikost průměrované oblasti je nutné volit podle očekávaných rozměrů deformované zóny. V uvedeném příkladu povrchu ze stříkaného betonu byla zvolena oblast  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ . Na základě provedených experimentů je možné konstatovat, že směrodatná odchylka určení posunu vymodelovaného objektu je nižší než 1 mm. V případě jednotlivých bodů mračna odpovídá směrodatná odchylka určení posunu charakteristice dálkoměru a je tedy přibližně 3 mm. Obecně lze říci, že přesnost v určení příčných posunů je vyšší než přesnost určení posunů podélných. To je způsobeno vyšší úhlovou přesností oproti přesnosti dálkoměru u systému HDS 3000. Zajímavou možností je posuzování průměrných posunů, které nejsou tolik ovlivněny šumem měření a díky tomu umožňují snadnější interpretaci hypsometrických dat a dosahují vyšších přesností při určování posunů než u jednotlivých bodů mračna. Uvedené závěry nezohledňují vliv registrace měření z různých stanovisek, vliv změny atmosférických podmínek ani vliv časové nestability skenovacího systému HDS 3000.



*Obr. 22 Diferenční DSM rozvinutého povrchu tunelu – body a průměry 13 – 14,15 - 16* 

	Segment číslo	Sken č. minus sken č.	Směrodatná odchylka jednoho bodu /mm	Vzdálenost povrchu /m	Úhel dopadu /gon	Počet bodů /tisíce	Směrodatná odchylka prům. posunu /mm
Rozdílné	1	3 - 4	3,2	10	66	129	
body	2	5 - 6	1,8	20	81	49	
	3	7 - 8	3,2	30	87	28	
	4	11 - 12	3,3	40	91	18	
	5	13 - 14	3,1	50	92	14	1,5
(vyš.hust.)	5	15 - 16	1,7	50	92	92	0,7
Identické	1	2 - 3	3,0	10	66	129	
body	4	10 -11	0,8	40	91	18	

Tab.1 Směrodatná odchylka posunu jednoho bodu

# 7 Závěr

Po stručném úvodu do problematiky skenování byly uvedeny současné trendy v oblasti přístrojů a systémů, v testování skenovacích zařízeních, ve zpracování naměřených dat a ve využití skenovacích systémů v inženýrské geodézii. Trend směřující k vývoji finančně nenáročných skenerů vedl k realizaci prototypů skenerů, kde LORS4 dosahuje přesnosti 1 mm pro předměty rozměrů 1,6 m  $\times$  2,2 m  $\times$  1,4 m a skener s virtuálními binárními značkami pro objekt o rozměrech 2 m  $\times$  2 m  $\times$  1 m průměrnou polohovou odchylku 1,1 mm.

Pro testování skenerů byla navržena nová metoda přímého určení směrodatných odchylek horizontálních směrů a zenitových úhlů, která posuzuje vnitřní přesnost skenovacího systému v rámci zorného pole 1 gon  $\times$  1 gon a výsledky tedy nejsou prakticky ovlivněny systematickými chybami přístroje. Pro systém HDS 3000 vychází směrodatná odchylka v horizontálním směru i zenitovém úhlu do 0,3 mgon.

V souladu se zásadami ortogonálního prokládání byla vytvořena knihovna tříd a funkcí SPATFIG, která slouží k prokládání geometrických útvarů množinou bodů. Knihovna byla úspěšně ověřena srovnáním s komerčními programy Cyclone 5.1 a 3Dipsos 3.0.3 a přitom v programu 3Dipsos 3.0.3 bylo odhaleno nevhodné použití algebraického prokládání. Knihovnu lze použít nejen k modelování povrchů, ale také k testování měření skenerů a rozborům chyb. Byl popsán návrh a realizace simulátoru měření skenovacího systému pro další testování zpracovatelských programů a posuzování činnosti skenerů.

Zajímavou možností, která se nabízí v oblasti měření posunů a přetvoření, je technologie skenování, která nedosahuje pro jednotlivé body takové přesnosti jako v případě přesných totálních stanic nebo dlouhodobých observací GPS, ale tento nedostatek vyvažuje v rychlosti měření, hustotě bodů a komplexnosti zachycení povrchu. Byly posouzeny možnosti využití technologie skenování pro měření posunů a přetvoření pomocí experimentů v laboratoři a měření v reálném prostředí v důlní štole komplexu UEF Josef a v budovaném železničním tulenu "Nové spojení" v Praze. Pro vyhodnocení normálových posunů libovolného povrchu byla navržena metoda průměrného posunu bodů, která je založena na rozdílovém digitálním modelu povrchu sledované oblasti a výsledek není tolik zatížen šumem měření. Bylo prokázáno, že směrodatná odchylka v posunu jednoho bodu je v reálném prostředí přibližně 3 mm (do vzdálenosti 50 m). Metoda průměrných posunů umožňuje snadnější interpretaci hypsometrických dat a dosahuje vyšších přesností (až třikrát) při určování posunů než u jednotlivých bodů mračna.

Přes dosažená řešení, která při prezentaci na mezinárodních konferencích byla příznivě hodnocena, zůstává v technologii skenování řada otevřených otázek. Je to například problematika filtrace dat, decimace bodů, problematika spojování několika skenů, působení prostředí na měření a v neposlední řadě problematika mobilních mapovacích prostředků - zde je připraven projekt řešení.

Řešená témata mají interdisciplinární charakter a prezentované výsledky vznikly při řešení grantových projektů 103/02/0357 "Moderní optoelektronické metody topografie ploch", 205/04/1398 "Využití 3D skenerů v geodézii a památkové péči", 103/06/0094 "Zpracování a analýza produktů hromadného sběru 3D dat terestrickými skenovacím systémy", 103/06/0617 "Vliv použití progresivní techniky na urychlení technologických a měřicích procesů" a výzkumného záměru MSM 684 0770005 "Udržitelná výstavba". Získané poznatky jsou průběžně zaváděny do výuky jak v programu Geodézie a kartografie a v programu Stavební inženýrství tak v programu Architektura a stavitelství a v doktorském studijním programu Geodézie a kartografie.

# Literatura

[1] KAŠPAR, M. - POSPÍŠIL, J. - ŠTRONER, M. - KŘEMEN, T. - TEJKAL, M.: Laserové skenovací systémy ve stavebnictví. Hradec Králové: Vega, 2003, 112 s.

[2] KAŠPAR, M. - POSPÍŠIL, J. - ŠTRONER, M. - KŘEMEN, T. - TEJKAL, M.: Laser Scanning in Civil Engineering and Land Surveying. Hradec Králové: Vega, 2004, 103 s.

[3] VRBOVÁ, M. et al : Lasery a moderní optika. (Oborová encyklopedie). PROMETHEUS, Praha, 1994, 474 s.

[4] POSPÍŠIL, J. - ŠTRONER, M.: Moderní geodetické technologie a přístroje pro laserové skenování. In: Stavební obzor. 2005, **14**, č. 8, s. 249-253.

[5] LUHMANN, T. (Hrsg): Photogrammetrie und Laserscanning Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management. Wichmann Verlag Heidelberg, 2002.

[6] International symposium " New Perspectives to Save Curtural Heritage, CIPA,2003, Antalya, Turkey.

[7] International Workshop on Vision Techniques for Digital Architectural and Archeogical Archives, ISPRS, 2003, Ancona, Italy.

[8] KOSKA, B. - ŠTRONER, M. - POSPÍŠIL, J.: Algoritmus určování rovnice obecné roviny pro laserové skenování včetně rozborů přesnosti. Stavební obzor. **13**, 2004, č. 2, s. 55-60.

[9] KOSKA, B. – KŘEMEN, T. – ŠTRONER, M. – POSPÍŠIL, J. – KAŠPAR, M.: Development of Rotation Scanner, Testing of Laser Scanners. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Surveying and FIG Regional Conference for Central and Eastern Europe INGEO 2004 in Bratislava [CD-ROM]. Bratislava: Slovak University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 2004.

[10] KOSKA, B. - ŠTRONER, M. - POSPÍŠIL, J.: Laserový skenovací systém LORS - vývoj a ověřování přesnosti. Stavební obzor. **14**, 2005, č. 4, s. 123-126.

[11] KOSKA, B. - POSPÍŠIL, J. - ŠTRONER, M.: The Result Presentation of the Development of Laser and Optic Rotating Scanner LORS and Introduction of Public Library of Classes and Functions SPATFIG. In: Optical 3-D Measurement Techniques VII, Volume I. Vienna: TU Vienna, 2005, vol. 1, s. 63-73.

[12] ŠTRONER, M. : Měření statických a dynamických charakteristik strojních a stavebních prvků – soubor rozborů, postupů a prostředků. [Disertační práce]. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2002.

[13] ŠTRONER, M. - POSPÍŠIL, J. : Neměřická digitální kamera při dynamickém měření přetvoření. Stavební obzor. 2001, **10**, č. 3, s. 84-88.

[14] KOSKA, B. – POSPÍŠIL, J. – ŠTRONER, M.: Innovations in the Development of Laser and Optic Rotating Scanner LORS. FIG XXIII. Congress Munich,October 2006, PS 5.2 pp. 1-15.

[15] REKTORYS,K. a spolupracovníci: Přehled užité matematiky I a II. Sedmé vydání: Nakladatelství Prometheus, 1995.

[16] ŠTRONER, M. - POSPÍŠIL, J.: Návrh skenovacího systému s virtuálními binárními značkami. Stavební obzor. **14**, 2005, č. 10, s. 300-302.

[17] ZÁMEČNÍKOVÁ,M.: Testovanie terestrických laserových systémov. [Disertační práce]. STU Bratislava, stavebná fakulta, 2006.

[18] BOEHLER, W. – VICENT, M. B. – MARBS, A.: Investigating Laser Scanner Accuracy. In: The Proceedings of The XIXth CIPA Symposium at Antalya, Turkey, 2003.

[19] KERSTEN, T. P. – STERNBERG, H. – MECHELKE, K.: Investigations into the Accuracy Behaviour of the Terrestrial Laser Scanning System Mensi GS100. In: The proceedings of the 7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, 2005.

[20] LICHTI, D. – FRANKE, J: Self-Calibration of the iQsun 880 Laser Scanner. In: The proceedings of the 7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, 2005.

[21] RIETDORF, A. – GIELSDORF, F. – GRUENDIG, L.: A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners. In: Proceedings of the INGEO 2004, Bratislava, 2004.

[22] KŘEMEN, T.- KOSKA, B. – POSPÍŠIL, J.: Verification of Laser Scanning Systems Quality. FIG XXIII. Congress Shaping the Change [CD-ROM] Munich,October 2006, TS 24.4, pp. 1-16.

[23] *DLT Method* [online]. [cit. 1.6.2006].: <u>http://kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html</u>>

[24] HANZL, V.: Přímá lineární transformace snímkových souřadnic s eliminací radiálního zkreslení objektivu. In: Geodetický a kartografický obzor, **32/74**, č. 5, 1986. [Czech].

[25] AHN, S.J.: Least Squares Orthogonal Distance Fitting of Curves and Surfaces in Space. In: Lecture Notes in Computer Science, vol. 3151, p. 1-125, doctoral thesis, 2004.

[26] FABER, P. – FISHER, R. B.: Pros and Cons of Euclidean Fitting. In: Lecture Notes in Computer Science, vol. 2191, p. 414-420, 2001.

[27] FABER, P. – FISHER, R. B.: Euclidean Fitting Revisited. In: Lecture Notes in Computer Science, vol. 2059, p. 165-175, 2001.

[28] AHN, S.J. – RAUH, W. – RECKNAGEL, M.: Least Squares Orthogonal Distance Fitting of Implicite Curves and Surfaces. In: Lecture Notes in Computer Science, vol. 2191, p. 398–405, 2001.

[29] AHN, S.J. – RAUH, W. – WESTKÄMPER, E.: Fitting of Parametric Space Curves and Surfaces by Using the Geometric Error Measure. In: Proc. 24th DAGM Symp. Pattern Recognition. Lecture Notes in Computer Science, vol. 2449, p. 548–556, 2002.

[30] AHN, S.J. – EFFENBERGER, I. – ROTH-KOCH, S. – WESTKÄMPER, E.: Geometric Segmentation and Object Recognition in Unordered and Incomplete Point Cloud. In: Lecture Notes in Computer Science, vol. 2781, p. 450–457, 2003.

[31] LUKÁCS, G. – MARSHAL, A. D. – MARTIN, R. R.: Geometric least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori. In: Geometric Modelling Laboratory Studies, vol. 5, 1997.

[32] LUKÁCS, G. – MARTIN, R. R. – MARSHAL, A. D.: Faithful Least-Squares Fitting of Spheres, Cylinders, Cones and Tori for Reliable Segmentation. In: Lecture Notes in Computer Science, vol. 1406, p. 671-686, 1998.

[33] ČEPEK, A. - PYTEL, J.: A Progress Report on Numerical Solutions of Least Squares Adjustment in GNU Project Gama, Acta Polytechnica, Czech Technical University in Prague, **45**(1),2005,s.12-18.

[34] ČEPEK, A.: The GNU Gama project – adjustment of geodetic networks, Acta Polytechnica, Czech Technical University in Prague, **42**(3),2002, s.26-30.

[35] ŠTRONER, M.: Virtuální laserový skener. Stavební obzor. 2006, **15**, č. 6, s. 187-190.

[36] KOPÁČIK, A. – WUNDERLICH, T.A.: Usage of Laser Scanning Systems at Hydro –

technical Structures. In: FIG Working Week 2004, Athéna, Greece, May 2004, TS23.4,p.1-8. [37] KŘEMEN, T. - KAŠPAR, M. - POSPÍŠIL, J.: Operating Quality Control of Ground Machines by Means of the Terrestrial Laser Scanning System. In: Image Engineering and Vision Metrology [CD-ROM]. Dresden: ISPRS, 2006.

# Životopis

Doc. Ing. Jiří Pospíšil, CSc., narozen 5.5.1951 v Praze, ženatý.Pracovní zařazení1.8.1974 – 31.10.1976ČSA, Praha 6, Ruzyň.1.11.1976 – dosudKatedra speciální geodézie Fakulty stavební ČVUT v PrazeVzdělání1969 – 74 : Ing.Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze1987 : CSc.Fakulta stavební ČVUT v Praze2002 : Doc.Fakulta stavební ČVUT v Praze

Pracoval od roku 1974 u ČSA jako samostatný technik letadel (radionavigace a zaměřování). Na základě konkurzu je přijat jako odborný pracovník na Katedru speciální geodézie FSv ČVUT v Praze. Od roku 1984 pak zařazen jako samostatný vědeckotechnický pracovník, od roku 1987 do roku 2002 jako vědecký pracovník, od r. 2002 jako docent.

#### Vědeckovýzkumná činnost

Zabývá se problematikou optických a elektronických měření v inženýrské geodézii. V posledních dvaceti letech se podílel na řešení 2 výzkumných záměrů, 12 grantových projektů a z toho 3 vedl. Výsledky vědecko-výzkumné činnosti publikoval v řadě prací, mezi které patří i tyto monografie: *Využití laserové techniky v investiční výstavbě* (spoluautor M. Kašpar), NADAS 1989 oceněná tvůrčí prémií Českého literárního fondu za práci z oblasti vědecké a odborné literatury v roce 1990; *Laserové skenovací systémy ve stavebnictví* (4 spoluautoři), Vega 2003; *Laser Scanning in Civil Engineering and Land Surveying* (4 spluautoři), Vega 2004.Význam publikační činnosti dokumentuje i 14 zahraničních a 30 domácích citací. Na řešení uvedené problematiky spolupracoval s předními odborníky. Byli to prof. Ing. CH. K. Jambajev, DrSc., MIIGAiK Moskva, prof. B. Gorham, UeL Londýn, Univ.– Prof. Dr.- Ing.B. Witte, RFWU Bonn a Prof. Dr.-Ing. W. Böhler, institut i3mainz Mainz.

#### Spolupráce s praxí

Spolupracoval s řadou podniků: Závody rudných dolů a geologického průzkumu, Vodní stavby Praha, IDS Metro, DS Olomouc, VÚIS Bratislava, TZÚS Teplice. Jednalo se zejména o spolupráci při statických a dynamických zatěžovacích zkouškách komorových mostů (např. mosty z předpjatého betonu v Teplicích, Děčíně, Třebčicích, Trmicích a u Poděbrad a ocelové mosty u Třebušic, v Lounech a ve Škodě Plzeň) a při měření Karlova mostu v Praze.

#### Pedagogická činnost

Přednáší předmět "Stavební geodézie". Do výuky zavedl předměty "Základy automatizace měření v inženýrské geodézii", a " Laserové skenování". Do doktorského studia zavedl předmět "Teorie měřicích systémů", který přednáší i na ČZU v Praze. V rámci 2 projektů FRVŠ zřídil dvě výukové laboratoře. Je školitelem jednoho doktoranda po SDZ a dvou doktorandů před SDZ. Dva doktorandi výtečně obhájili, jeden navržen na cenu rektora.

#### Další aktivity

1988 – 1998 mezinárodní pracovní skupina 6E FIG (Fédération Internationale Géometrès). 1990 – znalce z oboru elektronika se specializací na optoelektronické měřicí systémy

1993 – znalce z oboru ekonomika odvětví ceny a odhady se specializací na optoelektronické geodetické systémy

2001 – člen zkušební komise pro státní závěrečné zkoušky na FSv ČVUT

2004 – člen pedagogické rady studijního programu Geodézie a kartografie

2005 - člen oborové rady doktorského studia Geodézie a kartografie na FSv

2005 – člen zkušební komise pro státní magisterské a státní doktorské zkoušky ve studijních programech kartografie, geografie na PřF UK

2006 – člen odborné skupiny "Inženýrská geodézie" při Českém svazu geodetů a kartografů Od r. 2003 vedoucí výzkumného týmu Laserové skenery a skenování (Ing. M. Štroner, Ph.D.,

Ing. B. Koska, Ing. T. Křemen), který byl oceněn z fondu rektora ČVUT v r. 2005.