

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Czech Technical University in Prague
Faculty of Civil Engineering

doc. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

Možnosti zvyšování přesnosti 3D skenování

Possibilities of 3D scanning accuracy increasing

Summary

3D scanning systems are already an important part of the instruments and procedures used in surveying practice. It generally allows contactless determination of spatial coordinates of the object points in the form of point clouds, from which then 3D modeling and visualization of complex buildings and structures, interiors, underground spaces, any terrain, historical, archaeological, historical monuments and other objects with exceptional speed, accuracy, comprehensiveness and security. From other technologies differs primarily by the non-selectivity of the data collection, measurement speed and automation. It is a technology that is in principle simple and the results can be easily and directly used for many applications in which it is necessary to create the documentation and surface reconstruction of objects of all kinds.

Commonly used 3D scanning systems work on the principle of spatial polar method or methods of spatial intersection forward from the base. In both cases, the accuracy of the 3D scanning is affected by many factors, thereby resulting in clouds comprising errors which are manifested by improper determination of the position of each point on the surface of the object, and thus also reduce the quality of the resulting model.

Not only from the technical specifications of the individual scanning systems it is apparent that the main limiting factor in the accuracy of determining of the position of each point is the slope length accuracy in particular, and therefore it is the main cause of the noise component to mitigate. Noise reduction thus becomes an important step in the process of 3D scanning data processing and should in no case be neglected. Procedures and tools for noise suppression are included in some specialized software for capturing and processing of the 3D scanning, or some 3D scanners itself. Besides the procedures at the disposal of the commercial systems, however, it was designed and published a number of other methods and algorithms for noise suppression data 3D scanning, which are presented together with newly designed methods. These methods have been tested and the results of this testing had confirmed their practical usability.

Souhrn

3D skenovací systémy jsou již nyní významnou součástí přístrojů a postupů využívaných v geodetické praxi. Obecně umožňují bezkontaktní určování prostorových souřadnic bodů objektu ve formě mračen bodů, z toho pak 3D modelování a vizualizaci složitých staveb a konstrukcí, interiérů, podzemních prostor, libovolných terénů, historických, archeologických, památkových a dalších objektů s mimořádnou rychlostí, přesností, komplexností a bezpečností. Od jiných technologií se odlišuje především neselektivitou sběru dat, rychlostí a automatizací měření. Zároveň je to technologie, která je v principu jednoduchá a jejíž výsledky je možno snadno a bezprostředně využívat pro mnoho aplikací, v nichž je třeba dokumentace či rekonstrukce povrchu objektů všeho druhu.

Běžně využívané 3D skenovací systémy pracují na principu prostorové polární metody nebo metody prostorového protínání vpřed ze základny. V obou dvou případech přesnost 3D skenování ovlivňuje řada faktorů, čímž jsou do výsledných mračen zanášeny chyby, které se projevují nesprávným určením polohy jednotlivých bodů na povrchu měřeného objektu a tedy také snížení kvality výsledného modelu.

Nejen z technických specifikací jednotlivých skenovacích systémů je patrné, že limitujícím faktorem přesnosti určení polohy jednotlivých bodů je zejména přesnost určení šikmé délky a tedy je to hlavní příčinou vzniku potlačitelné složky šumu. Redukce šumu se tedy stává důležitým krokem v procesu zpracovávání dat 3D skenování a nemělo by být v žádném případě opomíjeno. Postupy a nástroje pro potlačení šumu jsou součástí některých specializovaných softwarů pro pořizování a zpracování dat 3D skenování, resp. některých 3D skenerů. Vedle postupů, kterými disponují komerční systémy, však byla navržena a publikována celá řada dalších metod a algoritmů pro potlačení šumu dat 3D skenování, které jsou zde spolu s nově vyvinutými metodami prezentovány. Tyto metody byly testovány a výsledky tohoto testování potvrdily jejich praktickou využitelnost.

Klíčová slova

Terestrické 3D skenování, přesnost, chyby měření, šum, snižování šumu.

Keywords

Terrestrial 3D scanning, accuracy, measurement errors, noise, denoising.

Obsah

1 ÚVOD.....	7
2 PRINCIPY 3D SKENOVACÍCH SYSTÉMŮ.....	7
2.1 3D SKENOVACÍ SYSTÉM.....	7
2.2 PROSTOROVÁ POLÁRNÍ METODA.....	7
3 CHYBY PŮSOBÍCÍ NA PŘESNOST 3D SKENOVÁNÍ	8
4 METODY POTLAČOVÁNÍ ŠUMU.....	9
4.1 OPAKOVANÉ MĚŘENÍ DÉLKY	9
4.2 REDUKCE ŠUMU V SOFTWARE GEOMAGIC STUDIO	10
4.3 METODA SUPER-RESOLUTION	10
4.4 PRŮMĚROVÁNÍ POLÁRNÍCH SOUŘADNIC BLÍZKÝCH BODŮ	11
4.5 PRŮMĚROVÁNÍ DÉLEK BLÍZKÝCH BODŮ S TESTOVÁNÍ VÝSKYTU ODLEHLÝCH HODNOT	12
4.6 PRŮMĚROVÁNÍ DÉLEK SOUSEDNÍCH BODŮ.....	13
4.7 NELOKÁLNÍ (NON-LOCAL) PRŮMĚROVÁNÍ	13
4.8 ZVYŠOVÁNÍ PŘESNOSTI DAT 3D SKENOVÁNÍ POMOCÍ METODY PRŮMĚROVÁNÍ OPAKOVANÝCH SKENŮ	14
4.8.1 Popis algoritmu zpracování.....	15
4.8.2 Přepočítání souřadnic na zprostředkující veličiny	15
4.8.3 Algoritmus vyhledání odpovídajícího bodu	16
4.8.4 Výpočet výsledných souřadnic a jejich charakteristik přesnosti	16
4.8.5 Popis programu ScanAverager.....	17
4.8.6 Testování měření plné sféry v členitém prostředí	17
4.8.7 Testování v malém úhlovém rozsahu v laboratorních podmínkách	19
4.8.8 Testování vlivu průměrování na kvalitu trojúhelníkových sítí ...	20
4.8.9 Shrnutí	24
4.9 REDUKCE ŠUMU V DATECH 3D SKENOVÁNÍ NA ZÁKLADĚ PROKLÁDÁNÍ OKOLNÍCH DAT POLYNOMICKÝMI PLOCHAMI	24
4.9.1 Popis algoritmu zpracování.....	24
4.9.2 Přepočítání souřadnic na zprostředkující veličiny	25
4.9.3 Algoritmus vyhledání zvoleného okolí bodu.....	25
4.9.4 Proložení okolí bodů plochou – konstrukce ploch pomocí polynomů a Čebyševových bivariantních polynomů	25
4.9.5 Řešení proložení plochy metodou nejmenších čtverců a pomocí normy L1	26

4.9.6	Výpočet vyhlazené délky, souřadnic a doplňujících kritérií	27
4.9.7	Popis programu Denoiser	28
4.9.8	Testování využití metod vyhlazení.....	28
4.9.9	Testování metod na rovinném tělese	28
4.9.10	Testování metod na kulovém tělese.....	30
4.9.11	Testování metod na tělese s nepravidelným povrchem.....	31
4.9.12	Shrnutí	33
4.10	REDUKCE ŠUMU VLNKOVOU (WAVELET) TRANSFORMACÍ.....	35
5	ZÁVĚR.....	35
	LITERATURA.....	36
	DOC. ING. MARTIN ŠTRONER, PH.D.	38

1 Úvod

3D skenovací systémy jsou již nyní významnou součástí přístrojů a postupů využívaných v praxi. Obecně umožňují bezkontaktní určování prostorových souřadnic bodů objektu ve formě mračen bodů, z toho pak 3D modelování a vizualizaci složitých staveb a konstrukcí, interiérů, podzemních prostor, libovolných terénů, historických, archeologických, památkových a dalších objektů s mimořádnou rychlostí, přesností, komplexností a bezpečností. Od jiných technologií je odlišuje především neselektivitou sběru dat, rychlostí a automatizací měření. Zároveň je to technologie, která je v principu jednoduchá a jejíž výsledky je možno snadno a bezprostředně využívat pro mnoho aplikací, v nichž je třeba dokumentace či rekonstrukce povrchu objektů všeho druhu. Podrobný přehled přístrojů, principů, výpočetních postupů i aplikací uvádí monografie [1], [2], [3] a nejnověji monografie [4].

2 Principy 3D skenovacích systémů

Běžně využívané 3D skenovací systémy pracují na principu prostorové polární metody nebo metody prostorového protínání vpřed ze základny. Terestrické skenovací systémy pracující na principu prostorové polární metody se označují v zahraniční literatuře jako dálkoměrné (ranging) skenery a na principu prostorového protínání vpřed ze základny jako triangulační (triangulation) skenery. Principy jsou podrobně popsány v [4].

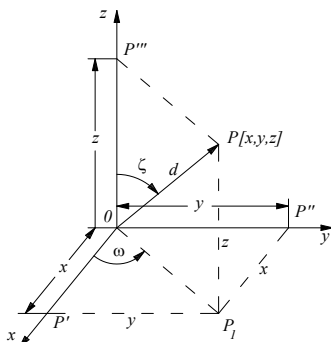
2.1 3D skenovací systém

Systém se skládá ze 3D skeneru, řídicí jednotky, programu pro řízení skenování, programu pro zpracování naměřených dat a příslušenství (stativ, baterie, terče, kabely, atd.). Využívají se systémy statické (při měření se nemění stanovisko přístroje) nebo dynamické (častěji se označují jako mobilní), které mohou být umístěny jak na prostředku pozemním (automobil, čtyřkolka, ...) nebo vodním (člun, ponorka, ...), tak i vzdušném (letadlo, helikoptéra, dálkově ovládané modely, apod..)

2.2 Prostorová polární metoda

Základním principem činnosti skeneru je prostorová polární metoda. K určení souřadnic bodu P je třeba znát délku průvodiče d (měřená délka) a úhly ζ , ω (viz. Obr. 1). Úhly jsou získávány například z polohy zrcadel, které rozmitají laserový svazek a délka například impulsním nebo fázovým dálkoměrem skeneru synchronizovaně s polohou zrcadel. 3D skenery pak obecně fungují tak, že laserový svazek je naváděn podle programu na body

rastru v pravidelném úhlovém kroku ve sloupcích či řádcích, přičemž je měřen horizontální a vertikální úhel a šikmá vzdálenost. Získané mračno bodů je získáno v souřadnicové soustavě skeneru, následně je volitelně transformováno prostřednictvím vlíčovacích bodů do potřebné cílové soustavy. Podrobné informace o principech 3D skenerů lze nalézt v [4].



Obr. 1 Schematické znázornění prostorové polární metody

3 Chyby působící na přesnost 3D skenování

Měření 3D skenerů je ovlivněno chybami stejně jako jakékoli jiné měření. Skenovací systémy jsou komplexní přístroje, skládající se z mnoha částí, z nich každá je vyrobena a pracuje s určitou nejistotou. Kromě těchto vlivů, které je možné označit jako vnitřní, měření a jeho výsledky jsou ovlivňovány také vlivy vnějšími mimo přístroj samotný jako jsou tvar či povrch měřeného objektu, jeho okolí, atmosférické podmínky, atd.

Při určování geometrických charakteristik z modelu objektu je třeba si uvědomit, že plochy, útvary a obecně další objekty jsou určovány obvykle z velkého množství bodů a tedy z nich určené hodnoty jsou vzhledem k náhodné složce úplně chybě přesnější než určení polohy jednoho měřeného bodu na objektu. Při měření, kdy je třeba získat data na samotné hranici přesnosti přístroje, jsou hlavním zdrojem chyb chyba měření délky (jak náhodné, tak systematické), na které lze aplikovat dále uvedené metody. Metody jsou obvykle testovány na skenerech využívajících prostorovou polární metodu měření. Pro triangulační skenery je vyjádření stejné, šikmá délka není sice určována „přímo“, ale platí zde stejné zákonitosti. Podrobný popis chyb působících na měření 3D skenerů je nad rámec tohoto textu, lze jej nalézt opět v [4].

4 Metody potlačování šumu

Jak již bylo uvedeno, přesnost dat 3D skenování ovlivňuje řada faktorů, čímž jsou do výsledných mračen zanášeny chyby, které se projevují nesprávným určením polohy jednotlivých bodů na povrchu měřeného objektu a tedy také snížení kvality výsledného modelu. Na Obr. 2 je ukázka takového mračka odpovídajícího zaměření roviny. Na první pohled je zřejmé, že body nejsou v jedné rovině, což ukazuje skutečnost, že body nejsou v zákrytu při pohledu shora.



Obr. 2 Ukázka mračka s viditelným šumem

Obecně lze říci, že šum má charakter náhodné chyby kolísající okolo střední hodnoty (polohy), u které předpokládáme, že odpovídá správné poloze bodu na povrchu měřeného objektu (více o náhodných chybách v [5]). Z technických specifikací jednotlivých skenovacích systémů je patrné, že limitujícím faktorem přesnosti určení polohy jednotlivých bodů je zejména přesnost určení šikmé délky a tedy je to hlavní příčinou vzniku potlačitelné složky šumu.

Redukce šumu se tedy stává důležitým krokem v procesu zpracovávání dat 3D skenování a nemělo by být v žádném případě opomíjeno. Postupy a nástroje pro potlačení šumu jsou součástí některých specializovaných softwarů pro pořizování a zpracování dat 3D skenování (např. Geomagic Studio [6]), resp. některých 3D skenovacích systémů a jejich firmwarů (Trimble GS200 [7] nebo Faro Focus3D [8]). Vedle postupů, kterými disponují komerční systémy, však byla navržena a publikována celá řada dalších metod a algoritmů pro potlačení šumu dat 3D skenování, z nichž některé budou v následující kapitole stručně popsány.

4.1 Opakované měření délky

Společnost Trimble se rozhodla u některých 3D skenerů řešit otázku redukce šumu již ve fázi pořizování (měření) dat, na rozdíl od většiny ostatních metod, které šum redukují až u finálních dat postprocesně. Tyto 3D skenovací systémy (GS200 [7], GX [9]) umožňují měřit délku n -krát opakovaně (až 100x dle výběru uživatele). Výslednou hodnotou určené délky je aritmetický průměr. Přesnější informace o tomto algoritmu nejsou k dispozici, a není známo, zda se během výpočtu provádí např. testování oprav opakovaných měření od průměru, které by z výpočtu vylučovalo odlehlá měření.

Obdobnou funkcí disponuje také skenovací systém Faro Focus 3D. Měření délky je v tomto případě založeno na určení fázového rozdílu vyslané a přijaté vlny. Zde je možné nastavit dobu vyhodnocení signálu a platí - delší měření = přesnější určení délky.

4.2 Redukce šumu v softwaru Geomagic Studio

Příkladem komerčního řešení redukce šumu je využití software Geomagic Studio od firmy Geomagic, je zde funkce *Reduce noise*. Tuto funkci lze aplikovat na mračno stejně tak jako na trojúhelníkovou síť z mračna vytvořenou. V dílčím nastavení této funkce je dále možné zvolit druh vyhlazování podle tvaru skenovaného objektu. V nabídce jsou dvě možnosti – tzv. *free-form* vyhlazení, které provádí redukci šumu s ohledem na zakřivení povrchu skenovaného objektu, a *prismatic shapes* vyhlazení, které je vhodné pro data s pravidelným uspořádáním, u nichž se snaží zachovat jejich charakteristické prvky - např. ostrost hran a rohů.

Na přímou otázku ohledně podrobného popisu použitého algoritmu výrobce odpověděl následující: „algoritmus funguje tak, že hledá v mračnu body, které statisticky leží mimo oblast průměrovaného souboru bodových dat, a posouvá je na statisticky správné místo.“

4.3 Metoda Super-resolution

Algoritmus Super-resolution je známý zejména z oblasti zpracování obrazových dat, kde je tato metoda využívána pro vytváření snímků s vysokým rozlišením na základě několika vstupních snímků s nižším rozlišením (podrobněji o této metodě v [10]). Aby mohl být tento algoritmus využíván také pro zpracování dat 3D skenování, musel být tento algoritmus upraven do podoby, která je uvedena v [11].

Princip této metody spočívá v tom, že skenovaný objekt se opakovaně nasnímá z mírně posunutých stanovisek přístroje, čímž vznikne velmi husté mračno bodů. Souřadnicový systém je definován tak, aby osa Z směřovala od skeneru k těžišti objektu. V tomto souřadnicovém systému je vytvořena mřížka v rovině $x - y$ o zvolených rozměrech, která rozdělí mračno bodů na buňky, ve kterých se nachází vždy určitý počet bodů naměřeného mračna. Pro každou buňku se středem q je spočtena výsledná hodnota hloubky (souřadnice z) jako vážený průměr z hodnot příslušejících bodům nacházejících se v okolí N (obvykle 5×5 buněk), váhy jsou přiřazovány jednotlivým bodům na základě jejich vzdáleností od středu buňky q s využitím dvourozměrné frekvenční funkce normálního (Laplace - Gaussova) rozdělení (např. dle v [5]). Výpočet výsledné hodnoty $z(q)$ je pak podle [11] dán vztahem:

$$z(q) = \frac{\sum_{r_i \in N} z(r_i) \cdot w(r_i, q)}{\sum_{r_i \in N} w(r_i, q)}, \quad (1)$$

kde r_i jsou body v okolních buňkách vstupující do výpočtu a w je váha. Parametry frekvenční funkce normálního rozdělení, jsou určovány v závislosti na velikosti vytvářené mřížky tak, aby body mimo okolí 5×5 buněk, měly nulovou váhu. Výsledkem je nové mračno s pravidelným krokem. Metoda se jeví jako funkční, ale v případě, kdy měřená data nemají dostatečně velkou hustotu, algoritmus sice funguje, ale hodnoty z něj vycházející jsou značně zkreslené.

4.4 Průměrování polárních souřadnic blízkých bodů

Další metoda redukce šumu byla navržena v [12]. Obecným principem této metody je průměrování prostorových polárních souřadnic blízkých bodů. Kolem zvoleného bodu (upravovaného) je vytvořena buňka ve tvaru komolého jehlanu s osou totožnou se směrem skenování (Obr. 3), rozměry jsou definovány uživatelem dle hustoty a velikosti šumu. Je vhodné volit rozměry na základě mezního úhlového rozdílu v horizontálním a vertikálním směru. Volba ovlivňuje hustotu výsledného mračna. Volba výšky komolého jehlanu je závislá na velikosti šumu. Čím větší je šum, tím větší musí být výška jehlanu. Po vytvoření jednotlivých komolých jehlanů je nutné do nich rozdělit jednotlivé body v mračnu na základě posouzení následujících vztahů:

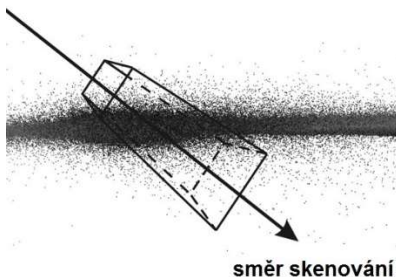
$$|\varphi - \varphi_i| \leq \Delta\varphi, \quad |v - v_i| \leq \Delta v, \quad |d - d_i| \leq \Delta d, \quad (2)$$

kde φ, v, d jsou prostorové polární souřadnice zvoleného bodu mračna, φ_i, v_i, d_i jsou prostorové polární souřadnice ostatních bodů mračna, $\Delta\varphi, \Delta v, \Delta d$ jsou parametry definující rozměry jehlanu.

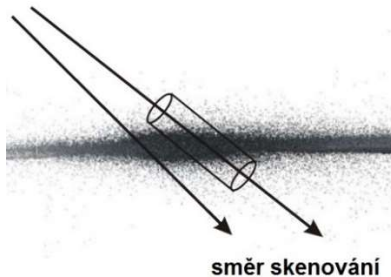
U všech bodů, které se nachází ve vytvořeném komolém jehlanu, se následně provede průměrování všech tří polárních souřadnic (horizontální úhel φ , vertikální úhel v , délka d) dle rovnic:

$$\varphi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i, \quad v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i, \quad d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i, \quad (3)$$

kde n je počet bodů spadajících do jehlanu. Výsledkem procesu redukce šumu je mračno tvořené body, jejichž prostorové polární souřadnice jsou získány průměrováním podle rovnic (3).



Obr. 3 Schéma rozdělení dat pomocí komolých jehlanů [12]



Obr. 4 Schéma rozdělení dat pomocí válce [13]

Každý jehlan tedy reprezentuje právě jeden bod ve výsledném mračnu, výsledné mračno má menší hustotu než mračno vstupní. Je opět nutné, aby hustota skenování vstupního mračna byla velká. U vstupních mračen s menší hustotou dochází k ještě většímu zředění a také k průměrování polárních souřadnic bodů, které mohou být od sebe poměrně daleko vzdáleny, což může mít za následek snížení kvality výsledného mračna. V [13]) je uvedena modifikace této metody lišící se pouze nahrazením jehlanu válcem (Obr. 4).

4.5 Průměrování délek blízkých bodů s testováním výskytu odlehlých hodnot

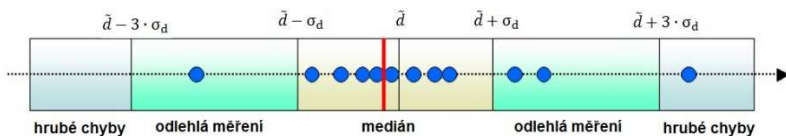
Metoda redukce šumu, která je popsána v [14], je založena na podobném principu, na kterém pracuje metoda Super-resolution (viz. 4.3). I v této metodě jsou nejprve naměřená data rozdělena mřížkou na jednotlivé buňky, do kterých jsou následně přiřazeny jednotlivé naměřené body. Body, které přísluší stejné buňce, jsou pak zpracovávány za účelem výpočtu výsledných hodnot charakterizující jednotlivé buňky. Před výpočtem je ještě provedeno testování odlehlých měření (více o odlehlých hodnotách v [5]). Toto testování probíhá tak, že je určen medián $\tilde{d}$ a také opravy délek v_{d_i} od mediánu pro všechny body z jednotlivé buňky podle rovnice:

$$v_{d_i} = |\tilde{d} - d_i|, \quad (4)$$

kde $\tilde{d}$ je medián délek a d_i jsou délky k jednotlivým bodům v buňce.

Tyto opravy jsou následně porovnávány s hodnotou směrodatné odchylky určení délky σ_d , která je udána výrobcem. Délky, které mají opravu v_{d_i} menší než je hodnota σ_d , jsou zahrnuty do výpočtu aritmetického průměru, naopak délky, které mají opravu v_{d_i} větší než je hodnota σ_d , jsou

z výpočtu vyřazeny (Obr. 5). Výhodou této metody je automatické vyřazování odlehlých bodů.



Obr. 5 Princip posuzování a vyřazování odlehlých hodnot [14]

Výsledné mračno má opět menší hustotu skenování než vstupní mračno. U členitých površích s nedostatečnou hustotou může tato metoda selhávat a odstranit neodlehle body.

4.6 Průměrování délek sousedních bodů

Průměrování délek mezi skenerem a sousedícími body za účelem redukce šumu z dat 3D skenování využívá také Ing. Jan Řezníček, Ph.D. (Katedra mapování a kartografie, Fakulta stavební, ČVUT v Praze) v softwaru Point Cloud Manager, [15]. Je zde použit odlišný postup výběru okolních (sousedních) bodů v mračnu. Body jsou hledány na základě vazeb mezi jednotlivými body v rámci trojúhelníkové sítě, která je mračnem proložena. Jsou tedy aritmeticky průměrovány délky mezi skenerem a body, se kterými tvoří opravovaný bod úsečky v rámci vytvořené trojúhelníkové sítě. Horizontální a vertikální úhel zůstává stejný.

4.7 Nelokální (non-local) průměrování

Metoda „non-local“ (nelokální = NL) průměrování je známá a používaná pro redukci šumu zejména v oblasti obrazových dat ([16]). Princip této metody spočívá v přepočítání hodnot intenzit u každého pixelu pomocí váženého průměru ostatních pixelů v obrázku.

Pro potřeby 3D skenování byla tato metoda upravena a publikována v [17]. Jelikož je výše popsán algoritmus původně určený pro dvourozměrné obrázky, je v článku navržen postup přechodu od dvourozměrného obrázku s hodnotami intenzit pro jednotlivé pixely $I(\mathbf{u})$ k datům 3D skenování tvořené body mračna $\mathbf{p}_i$. Rovnice určení nové polohy bodu:

$$\mathbf{p}_i' = \mathbf{p}_i \frac{\sum_{\mathbf{p}_j \in \mathcal{N}(\mathbf{p}_i)} \Phi_d \Phi_s [(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) \cdot (\mathbf{d}_i)] \mathbf{d}_i}{\sum_{\mathbf{p}_j \in \mathcal{N}(\mathbf{p}_i)} \Phi_d \Phi_s}, \quad (5)$$

kde $\mathbf{p}_i'$ je přepočítaná poloha bodu,
 Φ_d je hodnota váhy určená na základě vzdálenosti,

Φ_s je hodnota váhy určená na základě podobnosti,
 $\aleph(\mathbf{p}_i)$ je čtvercové okolí bodu $\mathbf{p}_i$,
 $\mathbf{d}_i$ je směr posunu bodu vlivem šumu (v případě 3D skenování je to směr skenování).

Pro hodnoty Φ_d resp. Φ_s platí následující vztahy:

$$\Phi_d(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j) = e^{-\frac{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|^2}{d^2}}, \quad \Phi_s(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j) = e^{-\frac{Sim(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j)^2}{s^2}}, \quad (6)$$

přičemž platí:

$$Sim(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j) = \frac{\sum_{o \in O} |(\mathbf{p}_{i+o} - \mathbf{p}_{j+o}) \cdot \mathbf{d}_i|^2}{\|o\|}, \quad (7)$$

kde o je vzdálenost středového bodu od bodu v okolí. V celém výpočtu uživatel volí pouze dvě hodnoty. Jednou z nich je velikost okolí $\aleph(\mathbf{p}_i)$, kterou lze upravovat stupeň vyhlazení, a druhou je velikost okolí bodu používaného pro určení parametru podobnosti $Sim(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j)$, kterým lze regulovat homogenitu výsledného mračna. Principiálně stejnou metodu jen s drobnými odlišnostmi lze najít také v [18].

4.8 Zvyšování přesnosti dat 3D skenování pomocí metody průměrování opakovaných skenů

U běžně prováděných geodetických měření lze při vyšších požadavcích na přesnost, než odpovídá jedenkrát provedenému měření, běžně zvyšovat počty opakování a aritmetickým průměrem získat přesnější výsledky, případně téhož dosáhnout měřením nadbytečných veličin a zvýšit přesnost vyrovnáním. U 3D skenování to (až na již popsané výjimky) není běžně možné. Protože však přesnost měřené délky je u víceúčelových 3D skenerů hlavním limitujícím faktorem dosažitelné přesnosti, byla hledána možnost, jak tuto nejjednodušší metodu zvýšení přesnosti aplikovat. Byly testovány vlastnosti měření skenerem Leica HDS 3000 a ukázalo se, že pokud se nezmění nastavení skenování a spustí se bezprostředně další měření, skener měří prakticky totožné body (testováno na vzdálenost až 50 m, dosažené hodnoty budou dále uvedeny) a lze tedy při zachování stejných nastavení provést vícenásobné skenování a pro další zpracování využít mračno bodů s nižšími směrodatnými odchylkami.

Byl vytvořen specializovaný program ScanAverager pro zpracování vícenásobných skenů pořízených systémem Leica HDS 3000.

4.8.1 Popis algoritmu zpracování

Postup práce se pro potřeby průměrování:

- Připraví se potřebné nastavení skenování.
- Opakovaně se n - krát se stejným nastavením provede skenování.
- Skenovaná data se vyexportují, každý sken odděleně do jednoho souboru.

Skenovaná data, ačkoli jsou při měření vždy získána ve stejném pořadí, si po exportu co do pořadí vzájemně neodpovídají. Kromě toho při měření může z různých důvodů některý bod chybět anebo být změřen jinak (chyba měření, déšť, prach, průjezd automobilu, průchod chodce apod.). Dalším důležitým faktem je velké množství bodů v jednom skenu pohybující se až v řádech miliónů. Proto byl navržen algoritmus, jehož základem je zpracování měření ve více krocích s využitím souřadnic přepočtených na šikmé délky, vodorovné směry a zenitové úhly v místní souřadnicové soustavě skeneru. Před výpočtem je k dispozici pouze n skenů o obecně různém počtu bodů, body jsou považovány za neuspořádané. Algoritmus je navržen tak, že se postupně pro všechny body základního (prvního nebo vybraného) skenu vyhledají odpovídající body z ostatních skenů, tj. vždy maximálně n bodů. Z těchto bodů se vždy vypočítá jako výsledek zpracování průměr, případně lze provést statistické hodnocení (přesnost, vyloučení odlehlých měření).

4.8.2 Přepočet souřadnic na zprostředkující veličiny

Prvním krokem výpočtu je výpočet zprostředkujících hodnot, tj. „měřených veličin“, šikmé délky d , vodorovného směru φ a zenitového úhlu z v místní souřadnicové soustavě skeneru z exportovaných souřadnic jednotlivých bodů X, Y, Z podle následujících vzorců. Přímé měřené hodnoty ze skeneru získat nelze.

$$d = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad (8)$$

$$j = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \text{ pro } X \neq 0, \quad (9)$$

se zařazením do správného kvadrantu

$$\text{pro } X < 0 \text{ platí } \varphi = j \pm 200 \text{ gon, pro } X > 0 \text{ platí } \varphi = j, \quad (10)$$

$$z = \arccos\left(\frac{Z}{d}\right) \text{ pro } d > 0. \quad (11)$$

4.8.3 Algoritmus vyhledání odpovídajícího bodu

Určené hodnoty šikmé délky a úhlů umožní zjednodušit vyhledávací algoritmus. V prvním kroku je nejprve nutné vypočítat pro bod základního skenu daného „měřeními“ hodnotami d_z, φ_z, z_z , a pro všechny body prohledávaného skenu hodnotící číslo h_i („úhlová vzdálenost“, i označuje jednotlivé nalezené body) a následně vybrat bod s nejnižší hodnotou.

$$h_i = (\varphi_z - \varphi_i)^2 + (z_z - z_i)^2. \quad (12)$$

Takto vybraný bod se zkontroluje, zda vyhovuje kritériím vymezeným hodnotami základního bodu a hodnotami Δ , tj. zda současně platí všechny následující relace:

$$d \in (d_z - \Delta d; d_z + \Delta d), \quad (13)$$

$$\varphi \in (\varphi_z - \Delta \varphi; \varphi_z + \Delta \varphi), \quad (14)$$

$$z \in (z_z - \Delta z; z_z + \Delta z). \quad (15)$$

Pokud relace platí, bod je použit pro další zpracování. Vhodným nastavením pro úhlové hodnoty je hodnota menší, než byl zvolený krok skenování. Omezení intervalu hodnot šikmé délky může být použito pro eliminaci chybně změřených bodů.

4.8.4 Výpočet výsledných souřadnic a jejich charakteristik přesnosti

Pro každý i -tý bod základního skenu se ze získaných m (maximálně n) bodů vypočítá průměr ze souřadnic bodů, které mu odpovídají v ostatních skenech (včetně bodu základního skenu), podle vzorců:

$${}^iX_p = \frac{\sum_{j=1}^m X_j}{m}, \quad {}^iY_p = \frac{\sum_{j=1}^m Y_j}{m}, \quad {}^iZ_p = \frac{\sum_{j=1}^m Z_j}{m}, \quad \text{kde } m \leq n, \quad (16)$$

kde j je proměnná označující pořadí bodu vybraného jako odpovídající i -tému bodu základního skenu z ostatních skenů; j nabývá hodnot 1 až m .

Přesnost výsledných souřadnic lze popsat směrodatnou odchylkou jednoho měření s_X či průměru s_{X_p} (podle [5]):

$${}^i v_{X_j} = {}^i X_p - X_j, \quad {}^i s_X = \sqrt{\frac{\sum {}^i v_{X_j}^2}{m-1}}, \quad {}^i s_{X_p} = \frac{s_X}{\sqrt{m}}. \quad (17)$$

Pro další veličiny jsou vzorce obdobné. Tytéž charakteristiky přesnosti je vhodné vypočítat také pro zprostředkující veličiny (šikmou délku, vodorovný směr a zenitový úhel), kde mohou sloužit zejména jako kontrola

přesnosti měření přístroje. Je vhodné ještě upozornit na to, že směrodatná odchylka průměru vzhledem k systematickým chybám přítomným v měření nepopisuje přesnost výsledku.

4.8.5 Popis programu ScanAverager

Program byl zpracován v prostředí Borland Delphi, skládá se z hlavního formuláře a několika doplňkových dialogů. Hlavní formulář umožňuje výběr souborů pro import souřadnic skenovaných bodů, jména souborů se i s cestou zobrazí v textové oblasti pod tlačítkem) a jejich následné načtení do paměti. Před spuštěním výpočtu je vhodné nastavit parametry, Svislý a Vodorovný úhlový krok jsou hodnoty, které určují velikost vyhledávacího okna ve směru vodorovného směru a zenitového úhlu, jako příslušná hodnota Δ se použije vždy polovina zadané hodnoty. Tyto hodnoty je možné získat stiskem tlačítka, kdy se na pseudonáhodně vybraném vzorku n bodů (n je volitelná hodnota) odhadnou tyto hodnoty z vybraného skenu. Volit lze také počet procesorů, po spuštění se implicitně nastaví na maximální možný. Bylo zjištěno, že využití více než tří procesorů na více testovaných konfiguracích počítače již nepřináší praktickou úsporu času (zpracování dvou skenů o cca 2 mil. bodů na notebooku s procesorem Core i5: 1 procesor: 6 min 18 s, 2 procesory: 3 min 30 s, 3 procesory: 3 min 02 s, 4 procesory: 2 min 58 s). Program rovněž kontroluje hrubé chyby měření pomocí přednastavené hodnoty „Maximální rozdíl délky“, který omezuje vyhledávací prostor co do hloubky (při pohledu od skeneru). Hodnota se aplikuje kladným i záporným směrem od základního bodu. Hodnota „Maximální oprava délky“ definuje kritérium, při jehož překročení je daná oprava a tím i měření podezřelé z odlehlosti a z dalšího výpočtu je vyloučeno. Po spuštění výpočtu se objeví formulář zobrazující průběh výpočtu spolu s odhadovanou dobou výpočtu.

Myšlenka možného využití průměrování opakovaných skenů byla testována v laboratorních podmínkách a na několika praktických případech. Výsledky jsou prezentovány dále.

4.8.6 Testování měření plné sféry v členitém prostředí

Základním limitujícím faktorem využití programu, respektive celé metody zvýšení zejména délkové přesnosti měření 3D skenerem, je přesnost nastavení přístroje v druhém a dalších měřeních, zjednodušeně řečeno, zda přístroj měří totožné body. Tento fakt byl zjišťován v experimentu uskutečněném v atriu budovy Fakulty stavební ČVUT v Praze. Měření uvnitř budovy bylo zvoleno proto, aby byly potlačeny zbytečné vlivy poškozující měření, jedná se tedy o pololaboratorní prostředí s nelaboratorními objekty.

Bylo zaměřeno celkem deset opakovaných skenů plné sféry v členitém prostředí, měřené vzdálenosti byly v intervalu 2 m až 31 m. Naskenovaná data byla programem zpracována ve dvojí formě – původní naskenované (dále neupravená data), a také po vyčištění od zřejmě chybných bodů a nežádoucích průchodů osob (dále upravená data). Pro porovnání v prvním skenu se počet bodů snížil z 33 409 na 31 952. Při standardním zpracování by tyto body byly také vyřazeny, měření na prosklené plochy je velmi nespolehlivé a změřené body jsou častěji odrazy než body skutečné. Výsledky zpracování upravených dat jsou shrnuty v Tab. 4.1. (s_X , s_Y , s_Z , s_D , s_W , s_{Ze} – směrodatná odchylka v souřadnici X, Y, Z, v určené šikmé délce, vodorovném směru, zenitovém úhlu). Počty bodů, které vznikly průměrem z jednoho až deseti bodů jsou uvedeny v Tab. 4.2.

Z prezentovaných výsledků vyplývá, že metoda je prakticky použitelná. Pro úhlové měření průměrná směrodatná odchylka maximálně 0,0005 gon představuje směrodatnou odchylku v umístění v jednom směru 0,1 mm na vzdálenost 10 m. Lze předpokládat, že měření s požadovanou vyšší přesností nebudou prováděna na extrémní vzdálenost, u přístroje Leica HDS3000 lze předpokládat vzdálenost 50 m a zde odchylka činí 0,5 mm.

Tab. 4.1 Charakteristiky přesnosti měření dat – upravená data

s_X [m]	s_Y [m]	s_Z [m]	s_D [m]	s_W [gon]	s_{Ze} [gon]
0,0013	0,0012	0,0012	0,0026	0,0005	0,0004

Tab. 4.2 Počty průměrovaných bodů ve výsledném mračnu

Počet průměrovaných bodů	Neupravená data		Upravená data	
	Bodů skenu	% z celkového počtu	Bodů skenu	% z celkového počtu
1	271	0,8	193	0,6
2	184	0,6	204	0,6
3	210	0,6	192	0,6
4	276	0,8	229	0,7
5	260	0,8	227	0,7
6	318	1,1	256	0,8
7	468	1,4	349	1,1
8	697	2,1	529	1,7
9	1780	5,3	1374	4,3
10	28945	86,6	28404	88,9

Směrodatné odchylky směrů a zenitových úhlů jsou nižší nežli hodnoty uváděné výrobcem.

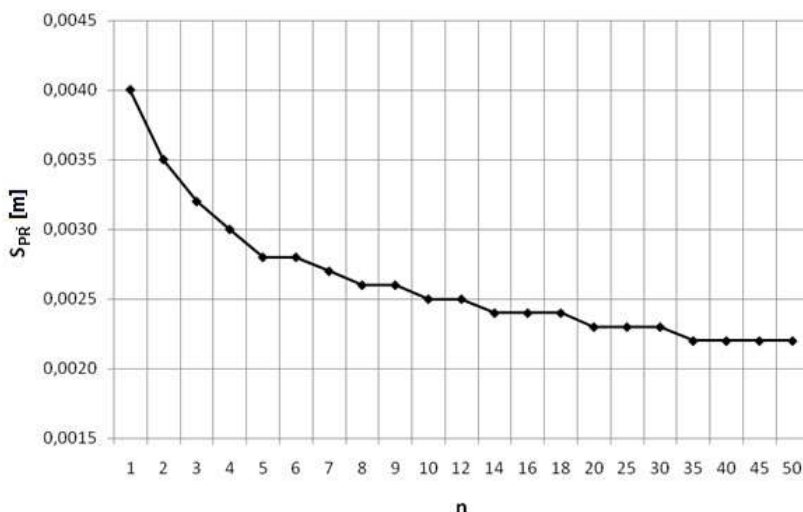
4.8.7 Testování v malém úhlovém rozsahu v laboratorních podmínkách

Proces pořízení testovacích dat byl tvořen sérií padesáti opakovaných skenování provedených 3D skenovacím systémem Leica HDS3000 v prostorách Fakulty stavební ČVUT, konkrétně zaměření části bílé interiérové příčky. Skenování bylo provedeno ze vzdálenosti 50 m kolmo plochu. Zaměřovaná část měla rozměry 1000 mm x 1000 mm a hustota skenování byla 25 mm x 25 mm na měřenou vzdálenost (1600 bodů). Pro představu o kvalitě měření jsou charakteristiky přesnosti popisující jednapadesát skenů uvedeny v Tab. 4.3.

Tab. 4.3 Charakteristiky přesnosti měření dat

s_X [m]	s_Y [m]	s_Z [m]	s_D [m]	s_W [gon]	s_{Ze} [gon]
0,0012	0,0012	0,0012	0,0027	0,00051	0,00038

Aby bylo možné posoudit přínos průměrování opakovaného skenování, bylo provedeno hodnocení vlivu opakovaného naskenování bodu na přesnost jeho zaměření metodou prokládání mračen rovinou.



Obr. 6 Vývoj směrodatných odchylek při zvyšování počtu průměrovaných skenů

Postupně byla vypočtena průměrovaná mračna ze dvou, tří, čtyř, ..., n,..., až padesáti skenů. Takto vzniklým mračnem bodů byla proložena rovina

a určena směrodatná odchylka vzdáleností jednotlivých bodů od proložené roviny s_{PR} . Vypočtené hodnoty byly graficky znázorněny na Obr. 6, zde je na první pohled patrné, že se zvyšujícím se počtem opakování měření snižuje hodnota směrodatné odchylky s_{PR} vzdáleností bodů od proložené roviny z počáteční hodnoty 0,0040 m (1 zaměření) až na hodnotu 0,0022 m (50 zaměření). Lze tedy prohlásit, že opakováním zaměření se zvyšuje přesnost v určení jednotlivých bodů. Z grafu je dále patrné, že nejvýraznější pokles hodnoty směrodatné odchylky nastává v počáteční fázi (5 zaměření) a činí 0,0012 m. Dále (6 – 50 zaměření) je již pokles poněkud mírnější a činí 0,0006 m. Lze konstatovat, že 5 opakování zaměření je optimální hodnota, kdy nastává poměrně výrazné zvýšení přesnosti určení polohy bodu a čas skenování není příliš dlouhý. Při dalším měření se sice přesnost dále zvyšuje, ale časová náročnost je již vysoká. Vyšší počet opakování než 10 již prakticky nepřinese žádný praktický efekt.

4.8.8 Testování vlivu průměrování na kvalitu trojúhelníkových sítí

Průměrování opakovaně zaměřených skenů redukuje převážně náhodnou složku chyby v určení jednotlivých bodů. Tento šum pak výrazně ovlivňuje kvalitu tvorby trojúhelníkových sítí, které jsou při modelování v oblasti 3D skenování často využívány. Byl navržen a proveden experiment, při němž bylo posuzováno, jakým způsobem ovlivní průměrování opakovaných skenů přesnost těchto sítí. Při tomto experimentu byla jako zaměřovaný objekt využita replika zmenšené sochy Michelangelova Davida a pro skenování byly využity 3D skenovací systémy Leica HDS3000 a Trimble FX. Skenování oběma skenovacími systémy bylo prováděno z jednoho stanoviska a hustota skenování byla nastavena na hodnotu 2 mm x 2 mm na vzdálenost 20 m. Celkem bylo s přístrojem HDS3000 provedeno 14 zaměření a s přístrojem FX 11 zaměření (z časových důvodů).

Při zpracování získaných dat byla postupně vytvořena mračna metodou průměrování jednotlivých skenů. Při výpočtu průměrů ze dvou až třinácti mračen byla vždy použita jen jedna z možných kombinací z daného počtu mračen (pro průměr ze dvou byly použity mračna 1, 2 pro průměr ze tří mračen 1, 2, 3 atd.) Do výsledného mračna byly zahrnuty pouze body, které byly výsledkem průměru ze všech mračen v dané kombinaci. Z bodů těchto mračen byly poté generovány v softwaru Geomagic trojúhelníkové sítě, které byly mezi sebou následně porovnávány. Kvalita tvorby trojúhelníkových sítí byla posuzována na základě velikosti směrodatné odchylky rozdílů s_{Δ} posuzované trojúhelníkové sítě od referenční trojúhelníkové sítě (Tab. 4.4), za níž byla zvolena trojúhelníková síť z neprůměrovaného zaměření (mračno 1a). Aby se vyloučila případná

nepřesnost referenčního mračna, byly průměry 2 až 5 a 13 porovnány i s modelem vzniklým z jiného neprůměrovaného mračna (mračno 1b; Tab. 4.5). Průměry 6 až 12 a průměr ze 14 mračen porovnávány znovu nebyly.

Lze tedy říci, že průměrováním se redukuje náhodná složka chyby v zaměření jednotlivých bodů. Dále je z Tab. 4.4 zřejmé, že pro průměr z pěti a více opakování se hodnota směrodatné odchylky zmenšuje již pouze nepatrně a lze tedy prohlásit, že průměrování z více než pěti skenů pozbývá významu vzhledem ke zlepšování přesnosti a časové náročnosti.

Tab. 4.4 Porovnání jednotlivých sítí s referenční (1a) – Leica HDS3000

Testovaný model	Maximální odchylka [m]		Průměrná odchylka [m]		Směrodatná odchylka [m]
	Kladná	Záporná	Pozitivní	Negativní	
Mračno 1b	0,0319	-0,0349	0,0011	-0,0012	0,0020
Ø 2	0,0330	-0,0218	0,0006	-0,0007	0,0012
Ø 3	0,0189	-0,0174	0,0006	-0,0006	0,0010
Ø 4	0,0168	-0,0255	0,0006	-0,0006	0,0009
Ø 5	0,0178	-0,0197	0,0006	-0,0006	0,0008
Ø 6	0,0159	-0,0153	0,0006	-0,0006	0,0008
Ø 7	0,0147	-0,0117	0,0006	-0,0006	0,0008
Ø 8	0,0170	-0,0092	0,0005	-0,0005	0,0007
Ø 9	0,0295	-0,0076	0,0005	-0,0005	0,0007
Ø 10	0,0184	-0,0099	0,0005	-0,0005	0,0007
Ø 11	0,0182	-0,0157	0,0005	-0,0005	0,0007
Ø 12	0,0160	-0,0185	0,0005	-0,0005	0,0007
Ø 13	0,0162	-0,0100	0,0005	-0,0005	0,0007
Ø 14	0,0168	-0,0100	0,0005	-0,0005	0,0007

Tab. 4.5 Porovnání jednotlivých sítí s referenční (1b) – Leica HDS3000

Testovaný model	Maximální odchylka [m]		Průměrná odchylka [m]		Směrodatná odchylka [m]
	Kladná	Záporná	Pozitivní	Negativní	
Ø 2	0,0211	-0,0236	0,0007	-0,0007	0,0012
Ø 3	0,0188	-0,0183	0,0006	-0,0006	0,0010
Ø 4	0,0151	-0,0237	0,0006	-0,0006	0,0009
Ø 5	0,0128	-0,0194	0,0006	-0,0006	0,0008
Ø 13	0,0162	-0,0100	0,0005	-0,0005	0,0007

Kvalita trojúhelníkové sítě byla také posuzována podle počtu otvorů („děr“), které zůstaly po výpočtu nezaplňeny. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v Tab.

4.6, kde je zřejmé, že se zvyšováním počtu průměrovaných skenů počet otvorů radikálně klesá z více než 350 na 6.

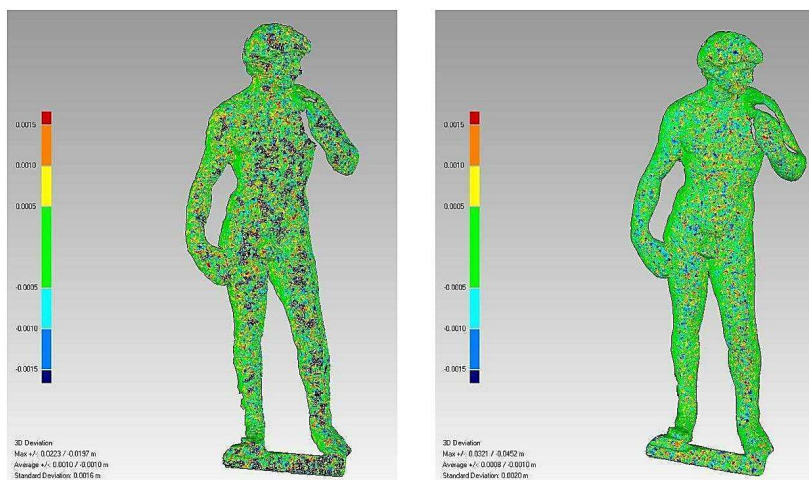
Porovnání trojúhelníkových sítí vytvořených z průměrovaných mračen s referenční trojúhelníkovou sítí bylo graficky vyjádřeno ve formě rozdílových modelů. Na Obr. 7 (vlevo) je znázorněn rozdílový model mezi dvěma trojúhelníkovými sítěmi vytvořenými z neprůměrovaných mračen (mračno 1a a mračno 1b). Vpravo je poté znázorněn rozdílový model mezi sítí z neprůměrovaného mračna (mračno 1a) a sítí vytvořenou z mračna vzniklého průměrem ze 14 opakovaných zaměření. Je patrné, že rozdíly, jejichž velikost jsou na obou modelech znázorněny v hypsometrické škále, jsou u modelu vlevo nepoměrně větší než u modelu vpravo. Potvrzuje se tím fakt, že průměrování opakovaných skenů přispívá ke zlepšení kvality trojúhelníkových sítí. Výše uvedený postup byl aplikován i pro mračna bodů získaných skenerem Trimble FX. Bylo však zjištěno, že zde nelze průměrovat jednotlivá mračna mezi sebou.

Tab. 4.6 Kvalita trojúhelníkových sítí – Leica HDS3000

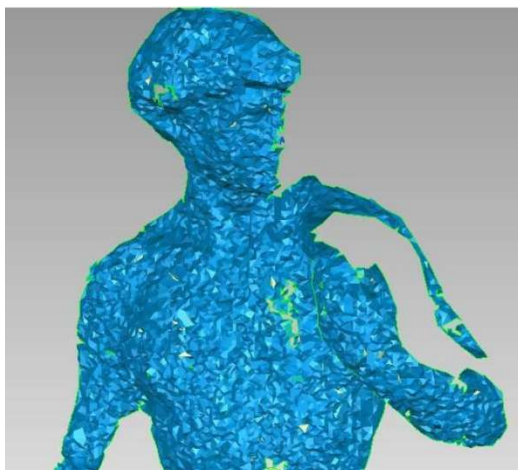
Počet průměrovaných mračen	Počet bodů	Počet otvorů	Počet trojúhelníků
1a	46949	356	84805
1b	46971	374	83767
2	46929	112	89706
3	46916	41	91317
4	46907	19	91976
5	46906	10	92392
6	46898	10	92558
7	46899	9	92683
8	46894	6	92735
9	46890	7	92760
10	46889	7	92780
11	46887	7	92845
12	46885	7	92683
13	46884	8	92862
14	46883	6	92861

Důvodem je jiný způsob měření bodů. Body z jednotlivých mračen nejsou identické, i když se měří ze stejného stanoviska, se shodným nastavením systému a bezprostředně po sobě. Vzhledem k neidentičnosti bodů byly do výsledného mračna vzniklého průměrováním použity všechny body, které byly získány průměrováním alespoň ze dvou mračen. Ani to však

nepřispělo ke kvalitnější trojúhelníkové síti. Výsledná trojúhelníková síť (Obr. 8), vytvořená z průměrovaných mračen, není již od pohledu příliš kvalitní.



Obr. 7 Rozdílové modely mezi neprůměrovanými a průměrovanými trojúhelníkovými sítěmi



Obr. 8 Trojúhelníková síť vytvořená z průměrovaných dat naměřených Trimble FX

4.8.9 Shrnutí

Na základě provedených testování s přístrojem Leica HDS3000 lze navrženou metodu a prezentovaný program považovat za využitelné, umožňující zvýšit přesnost a spolehlivost délkového měření a tedy 3D skenování celkově. Nastavení programu dále umožňuje automaticky vyloučit měření, která jsou s velkou pravděpodobností chybná, ať už se jedná o hrubé chyby přístroje nebo pohyb rušivých objektů.

Testování použitelnosti softwaru bylo také provedeno na novějších přístrojích výrobce Leica a to ScanStation 2 a ScanStation C10, v obou případech byly výsledky obdobné. Rychlost skenování je s těmito přístroji neporovnatelně vyšší (4 000 bodů za sekundu HDS3000; 50 000 bodů za sekundu ScanStation 2 i ScanStation C10) a tedy časové nároky na zvýšení přesnosti jsou nižší. Využitelnost softwaru u dat pořízených fázovými skenovacími systémy není dobrá, jak naznačuje test provedený se skenovacím systémem Trimble FX. Důvodem je měření neidentických bodů při opakovaném skenování, stejné zkušenosti jsou s přístroji firmy Faro.

4.9 Redukce šumu v datech 3D skenování na základě prokládání okolních dat polynommickými plochami

Jak již bylo uvedeno, přesnost měřené délky je obvykle u víceúčelových 3D skenerů jedním z limitujících faktorů dosažitelné přesnosti výsledku měření, tuto přesnost lze u spojitých povrchů vylepšit redukcí šumu (náhodných chyb) na základě vlastností okolních bodů. Byla navržena a testována metoda pro redukcí šumu dat 3D skenování založené na proložení různých ploch okolím vyhlazovaného bodu s možností využití robustních metod. Pro tento účel byl vytvořen specializovaný program Denoiser pro zpracování skenů, kde se na vybrané okolí bodů aplikuje proložení vybranou plochou a nová vzdálenost bodu se určí jako vzdálenost k bodu promítnutého na proloženou plochu.

4.9.1 Popis algoritmu zpracování

Při zpracování se postupně pro každý bod skenu vybere zvolený počet nejbližších bodů, tyto se proloží vybranou plochou a prodloužením či zkrácením paprsku o daném vodorovném směru a zenitovém úhlu na průsečík s plochou se získá nová (vyhlazená) poloha bodů.

Skenovaná data, ačkoli jsou při měření vždy získána v určitém pořadí, si po exportu toto uspořádání nezachovávají, proto pro vyhledání okolí bodu ve velkém mračnu (statisíce až milióny bodů) byl zvolen postup převodu problému vyhledání v prostoru (3D) na vyhledání v rovině (2D), byl navržen algoritmus, jehož základem je využití souřadnic přepočtených na šikmé

délky, vodorovné směry a zenitové úhly v místní souřadnicové soustavě skeneru. Tento postup je obdobný s postupem uvedeným u metody ScanAverager. Aby byl tento postup využitelný, je nutné vyhlazovat data netransformovaná.

4.9.2 Přepočet souřadnic na zprostředkující veličiny

Prvním krokem výpočtu je výpočet zprostředkujících hodnot (měřených veličin) - šikmé délky d , vodorovného směru φ a zenitového úhlu z v místní souřadnicové soustavě skeneru z exportovaných souřadnic jednotlivých bodů X, Y, Z podle vzorců (8), (9), (10), (11). Přímé měřené hodnoty ze skeneru získat nelze.

4.9.3 Algoritmus vyhledání zvoleného okolí bodu

Pro proložení plochy okolím o velikosti n bodů je nutné nalézt $(n - 1)$ nejbližších bodů v mračnu. Pro zvýšení rychlosti vyhledávání byl implementován algoritmus zásadně zrychlující vyhledávání odpovídajících si bodů v různých skenech. Body jsou při načítání předtříděny do „čtvercových buněk“ o rozsahu $0,5 \text{ gon} \times 0,5 \text{ gon}$, vyhledávání se pak děje pouze v buňce odpovídající buňce daného bodu a v buňkách sousedních (prohledává se tedy zorné pole $1,5 \text{ gon} \times 1,5 \text{ gon}$). Pokud se nenalezne dostatečný počet bodů v tomto zorném poli, přidá se ještě jedna vrstva okolo (zorné pole celkem $2,5 \text{ gon} \times 2,5 \text{ gon}$). Kvalitativní efekt je různý v závislosti na hustotě skenování, za běžných podmínek se vyhledávání zrychlí několikasetnásobně. Zároveň byl výpočet paralelizován, což přináší další zrychlení výpočtu. Určené hodnoty šikmé délky a úhlů umožní zjednodušit vyhledávací algoritmus. Prvním krokem je pro řešený bod daný „měřenými“ hodnotami φ_z, z_z určit buňku a jejích osm sousedních, v těchto buňkách nalezené body se seřadí dle kritéria

$$h_i = (\varphi_z - \varphi_i)^2 + (z_z - z_i)^2. \quad (18)$$

Pro další výpočet se použije prvních n bodů, první bod je vždy řešený bod a kritérium h je rovno nule.

4.9.4 Proložení okolí bodů plochou – konstrukce ploch pomocí polynomů a Čebyševových bivariančních polynomů

Plocha pro proložení může být jednoduše konstruována pomocí polynomu n -tého řádu. V následujícím předpisu je uvedena s využitím členů druhého řádu.

$$d_i = a_0 + a_1 \cdot \varphi + a_2 \cdot z + a_3 \cdot \varphi^2 + a_4 \cdot z^2 + a_5 \cdot \varphi \cdot z. \quad (19)$$

Délka d_i je funkcí úhlových souřadnic směru φ a zenitového úhlu z . Vyšší řád pro proložení vzhledem k velmi pravidelné mřížce dat 3D skenování nelze použít, výpočet je pak numericky nestabilní. Nižší řád se získá vyškrtnutím přebytečných členů. Pro plochu tvořenou členy vyššího řádu je nutné využít ortogonální polynomy, u kterých jsou jednotlivé členy vzájemně nezávislé, resp. kolmé. Příkladem takovýchto polynomů jsou Čebyševovy bivariantní polynomy, které se snadno konstruují. Pro aplikaci Čebyševových polynomů se nejprve libovolný interval lineárně transformuje na interval $\langle -1, 1 \rangle$. Každému $x \in \langle ax, bx \rangle$ bude přiřazena hodnota $tx \in \langle -1, 1 \rangle$ funkčním předpisem:

$$t\varphi = 2 \cdot \frac{\varphi - \frac{1}{2}(a\varphi + b\varphi)}{b\varphi - a\varphi}, \quad tz = 2 \cdot \frac{z - \frac{1}{2}(az + bz)}{bz - az}. \quad (20)$$

V případě dvou proměnných se každá z nich transformuje nezávisle. Následně pro člen polynomu platí:

$$T_n(x) = \cos(n \cdot \arccos(x)). \quad (21)$$

Bivariantní Čebyševův polynom má v našem případě tvar:

$$\begin{aligned} d_i = f(t\varphi, tz) = & a_0 + a_1 \cdot T_1(t\varphi) + a_2 \cdot T_1(tz) + a_3 \cdot T_2(t\varphi) + a_4 \cdot \\ & T_1(t\varphi) \cdot T_1(tz) + a_5 \cdot T_2(tz) + a_6 \cdot T_3(t\varphi) + a_7 \cdot T_2(t\varphi) \cdot T_1(tz) + a_8 \cdot \\ & T_1(t\varphi) \cdot T_2(tz) + a_9 \cdot T_3(tz) + a_{10} \cdot T_4(t\varphi) + a_{11} \cdot T_3(t\varphi) \cdot T_1(tz) + a_{12} \cdot \\ & T_2(t\varphi) \cdot T_2(tz) + a_{13} \cdot T_1(t\varphi) \cdot T_3(tz) + a_{14} \cdot T_4(tz) + \\ & \dots \end{aligned} \quad (22)$$

Konstrukce a využití Čebyševových polynomů je podrobně popsána v [5].

4.9.5 Řešení proložení plochy metodou nejmenších čtverců a pomocí normy L1

Podrobný rozpis postupu proložení plochou lze nalézt v [5]. Řešení lze provést metodou nejmenších čtverců, ale také robustní metodou – minimalizací sumy absolutních hodnot oprav (norma L1). Tato metoda byla zvolena vzhledem k tomu, že pro výpočet není nutné znát předpokládanou přesnost pro stanovení vah a robustní výpočet. Lze předpokládat, že vliv odlehklých bodů např. na zlomech či hranách bude při proložení potlačen

(více o L1 normě v [5]). Předmětem testování je mimo jiné i to, zda tento postup vzhledem k vyšším výpočetním nárokům přináší výhody či nikoli. Pro výpočet metodou nejmenších čtverců lze zvolit výpočet s vahami určenými na základě intenzit odražených laserových svazků nebo na základě úhlové vzdálenosti od vyhlazovaného bodu. Podle intenzity se váha jednotlivých okolních bodů určuje podle autorem navrženého vzorce:

$$p_i = 1,0 - K \cdot \frac{|I_0 - I_i|}{\Delta I_{max}}, \quad (23)$$

kde I_0 je intenzita vyhlazovaného bodu,
 I_i je intenzita bodu, kterému je přidělována váha,
 ΔI_{max} je maximální rozdíl intenzit v prokládaném okolí bodu.

Maximální váha je tedy 1, vliv intenzity na váhu lze upravovat pomocí koeficientu K , který se volí z intervalu $K \in (0,1)$. Podle úhlové vzdálenosti se váha okolních bodů určuje podle autorem navrženého vzorce

$$p_i = 1,0 - K \cdot \left(\frac{dU_i}{dU_{max}} \right)^M, \quad (24)$$

kde dU_i je úhlová vzdálenost bodu okolí, kterému je přidělována váha, od vyhlazovaného bodu a dU_{max} je maximální úhlová vzdálenost v prokládaném okolí bodu. Pomocí koeficientu M lze určit průběh váhy (kvadratický $M=2$, lineární $M=1$, s odmocninou $M=0,5$).

4.9.6 Výpočet vyhlazené délky, souřadnic a doplňujících kritérií

Vyhlazená délka se určí dosazením úhlových hodnot vyhlazovaného bodu (φ_i, z_i) do rovnice plochy s využitím koeficientů získaných proložením. Souřadnice se vypočítají prostorovou polární metodou, před jejich výpočtem se provede kontrola, zda oprava (změna) měřené délky nepřekračuje maximální opravu definovanou uživatelem na základě znalosti přesnosti použitého dálkoměru nebo ze zkušenosti. Zavedení této kontroly je provedeno proto, aby např. nebyly spojovány body na různých sousedících plochách a nedocházelo k vyhlazení na základě mylných předpokladů. Nastavení této hodnoty lze předpokládat o velikosti:

$$v_M = \sigma_d \cdot u_p, \quad (25)$$

kde u_p se doporučuje volit 2,5. Pro dálkoměr se směrodatnou odchylkou měření 4 mm je tedy $v_M = 10 \text{ mm}$.

4.9.7 Popis programu Denoiser

Program aplikuje výše uvedené postupy, umožňuje načíst data a provést vyhlazení zvolenou metodou. Vzhledem k náročnosti výpočtu byl výpočet paralelizován pro volitelné množství logických procesorů.

Nastavit lze počet bodů okolí, kterými se bude prokládat zvolený povrch, hodnotu maximální opravy délky (při jejím překročení se ponechá původní bod), koeficienty K a M (více v odstavci 4.9.5). Dále lze nastavit, zda se mají ukládat vyhlazené i nevyhlazené body do jednoho souboru nebo odděleně a zda se mají načítat a ukládat informace o intenzitách vrácených paprsků. Zvolit lze také počet procesorů, po spuštění se implicitně nastaví na maximální možný. V okně Metoda lze vybrat metodu vyhlazení, kde „R“ u metody značí robustní výpočet normou L1, „I“ u metody značí přidělení vah na základě intenzity a „D“ u metody značí přidělení váhy na základě úhlové vzdálenosti, připojené číslo pak řád polynomu. Kromě popsaných proložení plochami je implementována i metoda nejjednodušší - prostý průměr vzdáleností zvoleného okolí bodu.

4.9.8 Testování využití metod vyhlazení

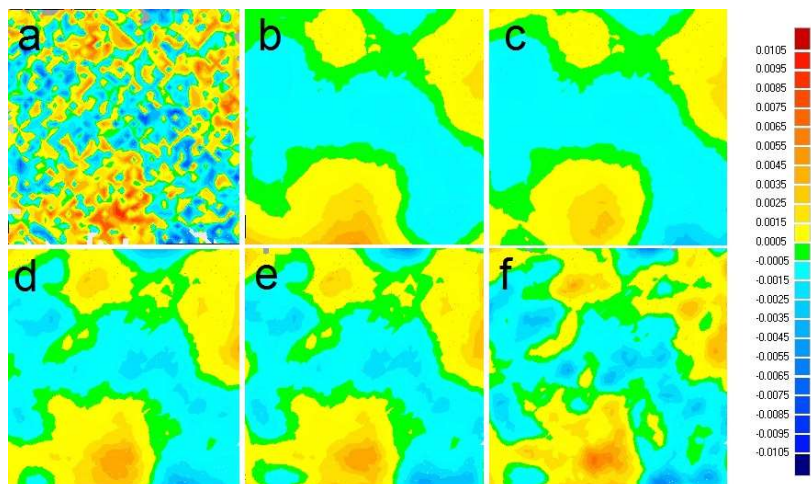
Testování programu Denoiser a jeho prostřednictvím také samotné metody vyhlazení bylo prováděno v laboratorních podmínkách na vzorových testovacích předmětech. Za tyto předměty byly vybrány jednoduché geometrické útvary (rovina, koule) a také jeden obecný útvar s nepravidelným povrchem (socha).

Geometrická primitiva byla pro účely testování zvolena z toho důvodu, že je možné je modelovat pomocí metody prokládání, u které je předpoklad prakticky úplné redukce šumu a tudíž získání správného výsledku. Pak je možné testovanou metodu vyhlazení s tímto výsledkem porovnat a tedy hodnotit její kvalitativní přínosy. Metody komparace bylo využito také v případě skenování sochy s tím, že metoda prokládání musela být nahrazena jinou metodou vzhledem k charakteru objektu. Byla zvolena metoda průměrování opakovaných skenů (software ScanAverager), která v dané situaci poskytuje nejpřesnější výsledek.

4.9.9 Testování metod na rovinném tělese

Testovacím objektem byla část bílé interiérové stěny o rozměrech $1000\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$. Skenování probíhalo ze stanoviska, které bylo situováno ve vzdálenosti 40 m od objektu a hustota skenování byla nastavena na hodnotu $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ ve výše uvedené vzdálenosti, výsledkem skenování bylo mračno o celkovém počtu 1600 bodů . Toto mračno bylo vyhlazeno v softwaru Denoiser, k vyhlazení byly použity všechny plochy, které jsou

v softwaru Denoiser na výběr, tj. rovina, průměr a Čebyševovy polynomy 2. až 4. řádu, přičemž každá z těchto ploch byla použita celkem šestkrát s různě nastavenými parametry, tj. použitím či nepoužitím robustní metody, okolí 25, 49 a 81 bodů.



Obr. 9 Rozdílové modely mezi referenční rovinou a trojúhelníkovou sítí vytvořenou z mračna a) nevyhlazeného b) vyhlazeného průměrem (81 bodů) c) rovinou (81 bodů) d) Čebyš. polynomem 2. stupně (81 bodů) e) Čebyš. polynomem 3. stupně (81 bodů) f) Čebyš. polynomem 4. stupně (81 bodů) – vyhlazeno s využitím MNC

Z vyhlazených mračen bodů byly vytvořeny trojúhelníkové sítě, které byly porovnávány s referenčním tělesem, kterým je rovina vytvořená metodou proložení rovinou nevyhlazeným mračnem. Porovnání bylo provedeno ve formě rozdílového modelu (Obr. 9), na kterém jsou v hypsometrické škále znázorněny odchylky jednotlivých bodů. Číselné zhodnocení odlehlosti bylo provedeno výpočtem směrodatné odchylky s_d vzdálenosti bodů zkoumaného objektu od referenčního. Výsledné hodnoty pro všechny možnosti výpočtu jsou uvedeny v Tab. 4.7. Hodnoty s_d pro metody využívající váhy přísluší nastaveným koeficientů $K = 0,8$ a $M = 2$. Z Obr. 9 a z hodnot z Tab. 4.7 je patrné, že v případě rovinného povrchu se, dle předpokladu, jako nejlepší jeví vyhlazování s využitím průměrování okolních bodů a rovinné plochy. Pomocí Čebyševových polynomů dochází k o něco horšímu vyhlazení - cca o $0,5 \text{ mm}$ v hodnotě směrodatné odchylky s_d . Mezi jednotlivými stupni Čebyševových polynomů však nejsou prakticky

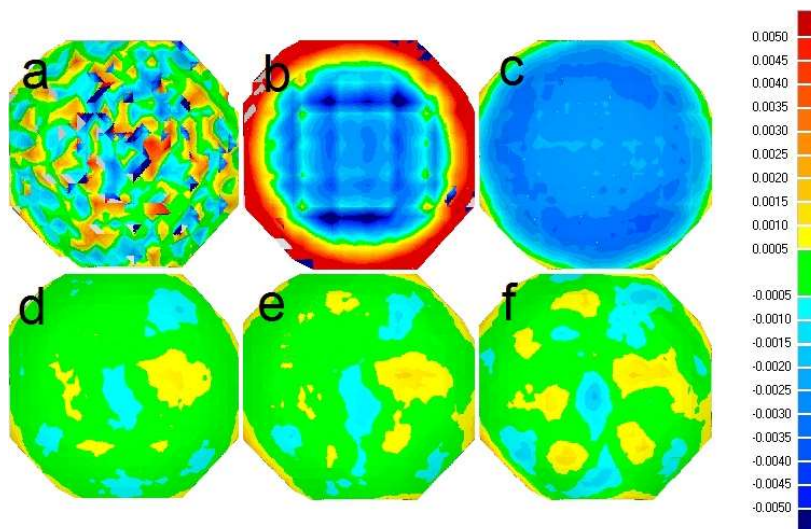
žádné rozdíly. Také využití vah nepřináší výraznější zlepšení. U všech ploch použitých k vyhlazení rovinného mračka platí, že s použitím většího počtu bodů při výpočtu dochází ke zmenšení hodnoty směrodatné odchylky s_{Δ} .

Tab. 4.7 Hodnoty směrodatných odchylek vzdáleností bodů od referenční roviny

Prokládaná plocha	Počet bodů okolí	MNČ	L1	MNČ s váhami podle intenzity	MNČ s váhami podle vzdálenosti
		s_{Δ} [m]	s_{Δ} [m]	s_{Δ} [m]	s_{Δ} [m]
Průměr	25	0,0017	0,0018	0,0017	0,0018
	49	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
	81	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Rovina	25	0,0018	0,0019	0,0018	0,0018
	49	0,0016	0,0017	0,0016	0,0017
	81	0,0015	0,0016	0,0015	0,0015
Čebyševův polynom 2. stupně	25	0,0021	0,0024	0,0021	0,0022
	49	0,0020	0,0021	0,0020	0,0020
	81	0,0018	0,0020	0,0018	0,0019
Čebyševův polynom 3. stupně	25	0,0022	0,0024	0,0022	0,0022
	49	0,0020	0,0022	0,0020	0,0020
	81	0,0019	0,0020	0,0019	0,0019
Čebyševův polynom 4. stupně	25	0,0025	0,0028	0,0025	0,0025
	49	0,0022	0,0025	0,0022	0,0022
	81	0,0021	0,0022	0,0021	0,0021
Nevyhlazená (surová) data		0,0031			

4.9.10 Testování metod na kulovém tělese

Skenovaným objektem byl kulový terč pro 3D skenování o průměru 145 mm od společnosti Faro. Objekt byl skenován ze vzdálenosti 5 m s hustotou skenování 5 mm x 5 mm. Výsledné mračno obsahovalo po očištění celkem 492 bodů. Odstraněny byly zejména body v blízkosti okrajů, které obecně vykazují značné chyby v určení polohy. Zpracování mračka bylo prováděno obdobným způsobem jako v předchozím případě. Ukázky vytvořených rozdílových modelů jsou zobrazeny na Obr. 10. Hodnoty směrodatných odchylek s_{Δ} jsou uvedeny v Tab. 4.8. Hodnoty s_{Δ} pro metody využívající váhy přísluší nastaveným koeficientů $K = 0,8$ a $M = 2$.



Obr. 10 Rozdílové modely mezi referenční koulí a trojúhelníkovou sítí vytvořenou z mračna a) nevyhlazeného b) vyhlazeného průměrem (81 bodů) c) rovinou (81 bodů) d) Čebyš. polynomem 2. stupně (81 bodů) e) Čebyš. polynomem 3. stupně (81 bodů) f) Čebyš. polynomem 4. Stupně (81 bodů) – vyhlazeno s využitím MNČ

Na Obr. 10 je vidět, že vyhlazení průměrem a rovinou v tomto případě selhává a výsledná mračna jsou značně zkreslena. Z hodnot v Tab. 4.8 je také patrné, že na rozdíl od Čebyševových polynomů, více okolních bodů ve výpočtu přináší horší výsledky a větší zkreslení, zejména v okrajových částech skenovaného objektu. Co se týká Čebyševových polynomů, tak jednotlivé stupně mezi sebou nevykazují znatelné rozdíly (s výjimkou Čebyševova polynomu 4. stupně při využití 25 bodů) stejně tak jako použití či nepoužití robustních metod a vah ve výpočtu. Vyhlazení Čebyševovými polynomy pak přináší zmenšení směrodatné odchylky s_d oproti nevyhlazeným datům o cca 2 mm.

4.9.11 Testování metod na tělese s nepravidelným povrchem

Pro účely tohoto testování byla naskenována zmenšená socha Michelangelova Davida o výšce cca 1 m ze vzdálenosti 10 m s hustotou skenování 5 mm x 5 mm. Výsledné mračno čítalo po očištění 46 120 bodů.

Zpracování naměřených dat a hodnocení vyhlazení softwarem Denoiser probíhalo stejným způsobem jako u předešlých objektů s tím, že referenční objekt, se kterým byla vyhlazená mračna porovnávána, byl získán

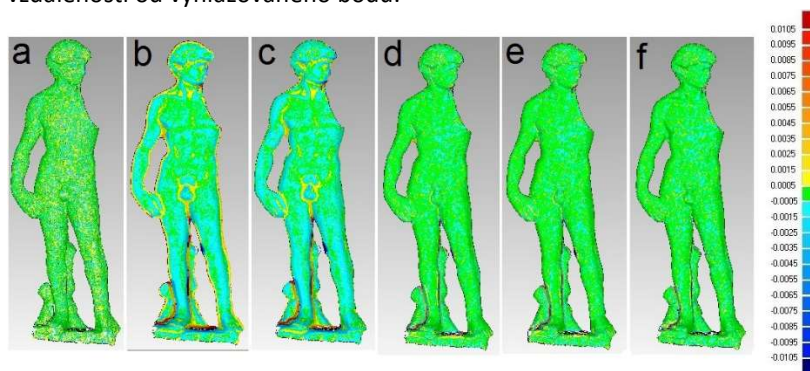
průměrováním 14 opakovaných skenů testované sochy. Ukázky vytvořených rozdílových modelů jsou zobrazeny na Obr. 11. Hodnoty směrodatných odchylek s_{Δ} jsou uvedeny v Tab. 4.9. Hodnoty s_{Δ} pro metody využívající váhy přísluší nastaveným koeficientů $K = 0,8$ a $M = 2$.

Tab. 4.8 Hodnoty směrodatných odchylek vzdáleností bodů od referenční koule

Prokládaná plocha	Počet bodů okolí	MNČ	L1	MNČ s váhami podle intenzity	MNČ s váhami podle vzdálenosti
		s_{Δ} [m]	s_{Δ} [m]	s_{Δ} [m]	s_{Δ} [m]
Průměr	25	0,0019	0,0021	0,0021	0,0017
	49	0,0033	0,0033	0,0030	0,0027
	81	0,0040	0,0041	0,0041	0,0033
Rovina	25	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
	49	0,0007	0,0007	0,0007	0,0006
	81	0,0010	0,0011	0,0010	0,0009
Čebyševův polynom 2. stupně	25	0,0006	0,0007	0,0007	0,0007
	49	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
	81	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Čebyševův polynom 3. stupně	25	0,0007	0,0008	0,0007	0,0007
	49	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
	81	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Čebyševův polynom 4. stupně	25	0,0014	0,0014	0,0015	0,0012
	49	0,0007	0,0008	0,0007	0,0007
	81	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
Nevyhlazená (surová) data		0,0027			

Z obrázků je patrné, že u tohoto objektu dosahují Čebyševovy polynomy výrazně lepších výsledků než dvě zbylé metody. Je to dáno zejména tím, že průměr a rovina vyhlazují nejen šum, ale také drobné detaily, které jsou na soše přítomny. V tomto ohledu jsou Čebyševovy polynomy citlivější a dokáží lépe charakterizovat reálný zakřivený povrch. U tohoto testovacího objektu se také objevuje skutečnost, že se zvětšujícím se počtem okolních bodů roste také hodnota směrodatné odchylky vzdálenosti bodů od referenčního objektu. V tomto případě se také jeví jako vhodné využití robustních metod, jelikož výsledky dosažené s jejich využitím jsou až o 0,5 mm lepší než bez nich. Podobné zlepšení přináší také využití

vah ve výpočtu. Lépe se v tomto ohledu jeví určování vah na základě vzdálenosti od vyhlazovaného bodu.



Obr. 11 Rozdílové modely mezi referenčním objektem a trojúhelníkovou sítí vytvořenou z mračka a) nevyhlazeného b) vyhlazeného průměrem (81 bodů) c) rovinou (81 bodů) d) Čebyš. polynomem 2. stupně (81 bodů) e) Čebyš. polynomem 3. stupně (81 bodů) f) Čebyš. polynomem 4. stupně (81 bodů) – vyhlazeno s využitím MNC

4.9.12 Shrnutí

Byla navržena a popsána metoda, která pracuje na principu opravy naměřené délky na průsečík s plochou vytvořenou na základě proložení okolních bodů vybranou plochou. Pro účely testování a aplikace této metody byl pak vytvořen specializovaný software Denoiser.

Vzhledem k výše uvedeným výsledkům lze prohlásit, že metoda vyhlazování popsaná v tomto článku přináší znatelné zlepšení v oblasti redukce šumu z naměřených dat. Ze všech ploch, které je možné v softwaru Denoiser využít, vykazují nejlepší výsledky Čebyševovy polynomy. V softwaru je možné zvolit Čebyševovy polynomy 2. až 4. stupně, je však nutné poznamenat, že mezi jednotlivými stupni nedochází k výraznému zlepšování, a proto se zdá nejvýhodnější volit 2. stupeň těchto polynomů, jelikož délka výpočtu je poté kratší.

V otázce volby počtu bodů použitých do samotného výpočtu se jeví jako nejlepší hodnota 49 bodů. Tato hodnota totiž představuje „zlatou střední cestu“ jak pro objekty pravidelného charakteru, u nichž větší počet bodů přináší větší přesnost, tak i pro objekty obecného tvaru, u nichž je úměrnost počtu bodů a přesnost nepřímá.

Tab. 4.9 Hodnoty směrodatných odchylek vzdáleností bodů od referenčního objektu

Prokládaná plocha	Počet bodů okolí	MNČ	L1	MNČ s váhami podle intenzity	MNČ s váhami podle vzdálenosti
		s_d [m]	s_d [m]	s_d [m]	s_d [m]
Průměr	25	0,0017	0,0009	0,0018	0,0017
	49	0,0028	0,0013	0,0023	0,0020
	81	0,0036	0,0016	0,0035	0,0028
Rovina	25	0,0016	0,0012	0,0016	0,0012
	49	0,0026	0,0020	0,0018	0,0026
	81	0,0033	0,0022	0,0024	0,0031
Čebyševův polynom 2. stupně	25	0,0010	0,0011	0,0010	0,0009
	49	0,0015	0,0015	0,0016	0,0012
	81	0,0020	0,0016	0,0015	0,0014
Čebyševův polynom 3. stupně	25	0,0012	0,0010	0,0012	0,0009
	49	0,0012	0,0013	0,0013	0,0012
	81	0,0022	0,0014	0,0015	0,0016
Čebyševův polynom 4. stupně	25	0,0010	0,0012	0,0010	0,0011
	49	0,0010	0,0011	0,0011	0,0010
	81	0,0013	0,0015	0,0012	0,0013
Nevyhlazená (surová) data		0,0019			

Využití robustních metod při výpočtu se u většiny testovacích objektů jevila jako zbytečná, jelikož nepřinášela výrazné zlepšení výsledků. Výjimkou byl nepravidelný objekt - socha Davida, u níž ke zlepšení výsledků došlo. Vzhledem k tomu, že většina objektů však má nepravidelný tvar podobně jako testovaná socha, využití robustních metod lze jen doporučit. Je však nutné také poznamenat, že využití robustních metod prodlužuje dobu výpočtu, což může v některých případech (zejména při velkém objemu vyhlazovaných dat) způsobit neúměrné zpomalení celého procesu zpracování naměřených dat. Obdobně lze hodnotit také možnost využití vah při výpočtu celého algoritmu. Výraznější uplatnění vah při výpočtu by bylo možné očekávat u dat s hodně vysokou hustotou skenování, kde by přínos mohl být markantnější.

4.10 Redukce šumu vlnkovou (wavelet) transformací

Pro redukci šumu lze použít i vlnkovou transformaci a obdobným postupem jako u prokládání plochami popsaném v předchozím odstavci. Jedná se také o metodu postprocesní. Pro snadný výpočet transformace je nutné připravit pravidelnou matici s měřenými daty, kdy prvek matice je měřená délka (tzv. range image).

Při správném nastavení rodiny vlnek lze dle našich testů ([19], [20]) dosáhnout výsledků mírně pod úrovní vyhlazení pomocí roviny. Problémem této metody je nutnost přípravy obdélníkové matice pro výpočet, což je prakticky při reálném použití vzhledem ke tvaru skenovaných předmětů neproveditelné, dále v matici nemohou být prázdné (nezměřené) prvky (body) a je nutné je nějakým způsobem (obvykle pomocí sousedících bodů) doplnit. Dále u každého 3D skeneru je úhlový rastr měřených bodů jistým způsobem nepravidelný a tak vlnková transformace neprovede potlačení šumu obecně zcela správně.

Vzhledem ke složitosti přípravy dat a nelze tuto metodu doporučit pro běžné zpracování dat 3D skenování.

5 Závěr

3D skenování je stále ještě rychle se rozvíjející metoda hromadného sběru prostorových dat. Vysoká rychlost je jejím hlavní kladem. Přesnost, její určování a zejména zvyšování je s ohledem na propracované techniky oboru geodézie teprve na začátku. Byly zde prezentovány vybrané prakticky využitelné metody zvyšování přesnosti dat 3D skenování snižováním účinku náhodných chyb měření (šumu), a to zejména náhodných chyb měření délky, což jeden z hlavních limitujících faktorů dosažitelné přesnosti.

Literatura

- [1] Kašpar, M. - Pospíšil, J. - Štroner, M. - Křemen, T. - Tejkal, M.: Laserové skenovací systémy ve stavebnictví. 1. vyd. Hradec Králové: Vega, 2003. 112 s. ISBN 80-900860-3-9.
- [2] Kašpar, M. - Pospíšil, J. - Štroner, M. - Křemen, T. - Tejkal, M.: Laser Scanning in Civil Engineering and Land Surveying. 1. ed. Hradec Králové: Vega, 2004. 103 s. ISBN 80-900860-7-1.
- [3] Štroner, M. - Pospíšil, J.: Terestrické skenovací systémy. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. 187 s. ISBN 978-80-01-04141-3.
- [4] Štroner, M. - Pospíšil, J. - Koska, B. - Křemen, T. - Urban, R. - et al.: 3D skenovací systémy. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2013. 396 s. ISBN 978-80-01-05371-3.
- [5] Hampacher, M. - Štroner, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 313 s. ISBN 978-80-01-04900-6.
- [6] GEOMAGIC. Geomagic Studio [software]. Listopad 2012. [přístup 21.11.2012]. Dostupné z: <http://www.geomagic.com/en/products/studio/free-trial/>.
- [7] Trimble GS Series 3D Scanner [online]. Trimble. [přístup 22.11.2012]. Dostupné z: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-217217/022543-119A_GSSeries_DS_0405_Ir.pdf.
- [8] Faro Laser Scanner Focus3D [online]. Faro. [přístup 22.11.2012]. Dostupné z: <http://www.faro.com/site/resources/share/944>
- [9] Trimble – GX 3D Scanner [online]. Trimble. [přístup 22.11.2012]. Dostupné z: <http://www.geotrade.hu/index.php?page=letoltes&spage=fajl&id=57>
- [10] Cheeseman, P. - Kanefsky, B. - Kraft, R. - Stutz, J. - Hanson, R.: Super-resolved surface reconstruction from multiple images. In: Maximum Entropy and Bayesian Methods. Kluwer Academic Publishers, 1996, s. 293-308. ISBN-10: 0792343115.
- [11] Kil, Y. J. - Mederos, B. - Amenta, N.: Laser Scanner Super-resolution. In: Eurographics Symposium on Point-Based Graphics 2006., Boston, USA. The Eurographics Association, 2006. ISBN 3-905673-32-0.
- [12] Schulz, T.: Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. Berlin: Technical University of Berlin 2007. [Disertační práce].
- [13] Schulz, T. - Ingensand, H. - Steiner, M.: Laser scanning and noise reduction applied to 3D road surface analysis. In: Geometh-data [online]. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. [přístup 24.11.2012]. Dostupné z: http://www.geometh-data.ethz.ch/downloads/Schulz_Road_O3D_Vienna.pdf

- [14] Bornaz, L. - Rinaudo, F.: Terrestrial laser scanner data processing. In: CiteSeerX [online]. The College of Information Sciences and Technology, The Pennsylvania State University. [přístup 22.11.2012]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.64.8938&rep=rep1&type=pdf>.
- [15] Řezníček, J. - Mlavec, J.: Point Cloud Manager 1.0 [software]. 2008. [přístup 20.10.2008]. Dostupné z: <http://lfgm.fsv.cvut.cz>.
- [16] Buades, A. - Coll, B. - Morel, J. M.: A non-local algorithm for image denoising. In: Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). San Diego: Computer Society. 2005. s. 60-65. ISBN 0-7695-2372-2.
- [17] Schall, O. - Belyaev, A. - Seidel, H.-P.: Feature-preserving Non-local Denoising of Static and Time-varying Range Data. In: Proceedings of the 2007 ACM symposium on Solid and physical modeling. New York: Association for Computing Machinery. 2007. s. 217-222. ISBN 978-1-59593-666-0.
- [18] Smigiel, E. - Alby, E. - Grussenmeyer, P.: Terrestrial Laser Scanner Point Cloud Denoising by Range Image NL Means Processing for Small-sized Objects. In: ISPRS Workshop Laserscanning '09. Paris: MATIS Laboratory, Institut Géographique National. 2009. s. 271-276. ISSN 1682-1750.
- [19] Jašek, P.: Reduce Noise of Laser Scanning Data. In: 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2014, Conference Proceedings vol. III. Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2014, p. 275-282. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7105-12-4.
- [20] Jašek, P. - Štroner, M.: Denoising of Laser Scanning Data using Wavelet. In: INGE0 2014. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014, vol. 1, p. 27-32. ISBN 978-80-01-05469-7.

doc. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

Narozen dne 25. 2. 1975 v Roudnici nad Labem, kde od té doby žije. Absolvoval zde základní školu a gymnázium, dále vystudoval Fakultu stavební ČVUT v Praze, obor Geodézie a kartografie, v roce 1998 obhájil diplomovou práci na téma "Studie využití GPS pro měření deformací přehradních hrází" a získal titul Ing. V témže roce nastoupil na doktorské studium, v roce 2003 obhájil doktorskou disertační práci na téma "Měření statických a dynamických charakteristik strojních a stavebních prvků" a získal titul "doktor", ve zkratce Ph.D., v oboru Geodézie a kartografie.

V roce 2009 získal titul docent, téma habilitační práce „Terestrické skenovací systémy“. Od roku 2002 do roku 2009 byl zaměstnán jako odborný asistent Katedry speciální geodézie, Fakulta stavební ČVUT v Praze, kde je od roku 2009 vedoucím katedry a docentem a kde se kromě pedagogické činnosti účastní také řešení grantových projektů GAČR a výzkumných záměrů.

V současné době přednáší povinné předměty rodiny Geodézie a Inženýrská geodézie, cvičí mnoho dalších příbuzných předmětů a výuk v terénu. Vede diplomové bakalářské a magisterské práce, je školitelem doktorandů, pod jeho vedením úspěšně dokončili doktorské studium tři studenti. Systematicky se zabývá modernizací výuky. Je úspěšným spoluřešitelem projektu FRVŠ Laboratoř laserového skenování (2006), zavedl do výuky předmět Laserové skenování a je dvou spoluautorem vysokoškolských skript.

V rámci výzkumné činnosti se věnuje hlavně 3D terestrickému skenování, inženýrské geodézii, testování geodetických přístrojů, geodetickým výpočtům, vyrovnání metodou nejmenších čtverců, metodám robustního odhadu a vyrovnávacímu počtu celkově, dále také programování. Je autorem a spoluautorem 8-mi monografií, pěti článků publikovaných v časopisech s impakt faktorem v databázi WoS, více než 50-ti článků v odborných recenzovaných časopisech, více než 50-ti příspěvků ve sbornících z odborných konferencí, dvou vysokoškolských skript a také 3 recenzí na odborné publikace. Jeho práce byly více než 100 x citovány, z toho 34x v publikacích s impakt faktorem v databázi WoS a 26x v publikacích v databázi SCOPUS. Je rovněž spoluautorem 3 národních patentů.

Je členem Českého svazu geodetů a kartografů, působí v odborné skupině Inženýrské geodézie.