

5 Metody dokumentace památkových objektů

5.1 Úvod

V této kapitole budou stručně popsány současné metody používané k dokumentaci památkových objektů. Tyto metody rozdělím na tři skupiny, a to na metody geodetické, fotogrammetrické a samostatně stojící metodu laserového skenování. Chtěl jsem se zaměřit hlavně na dokumentaci kleneb, avšak nenašel jsem bohužel dostatek podkladů, proto jsou kapitoly obecnější, zaměřené celkově na dokumentace památkových objektů společně s matematickými základy a principy metod. Podle mého názoru to však není tak důležité, protože pro použití níže diskutovaných technologií platí obecné zásady, které se dají uplatnit i při dokumentaci kleneb. Část týkající se laserového skenování je obsáhlejší a podrobnější, protože by měla sloužit k seznámení s technologií použitou v této diplomové práci.

Je nutné na začátku říci, že v praxi se uvedené metody velmi často kombinují a výsledná dokumentace může být i kombinací všech tří druhů metod. Každá metoda má své klady a zápory a každá se hodí pro daný úkol lépe nebo hůře. Nelze tedy pouze říci, že některá metoda je obecně vhodnější, vždy se musí zdůraznit pro jaké zadání.

Při rozhodování kterou metodu zvolit, hrají roli následující faktory: prvním je jisté charakter dokumentované památky, např. jde-li o fasádu nebo místnost v budově nebo o budovu celou; dalším faktorem je přesnost a podrobnost výstupu žádaná zadavatelem. A nemohu nezmínit ani stránku ekonomickou a otázku rychlosti. Podle těchto kritérií pak následně volíme vyhovující metodu.

5.2 Laserové skenování

5.2.1 Matematické základy, popis metody

Laserové skenovací systémy umožňují bezkontaktní určování prostorových souřadnic, 3D modelování a vizualizaci složitých staveb a konstrukcí, interiérů, podzemních prostor, libovolných terénů atp. s mimořádnou rychlostí, přesností, komplexností a bezpečností. Nasnímaný objekt může být pomocí software zobrazen ve formě mračen bodů, na jejichž základě může být vytvořen model objektu, který lze přenést do CAD systému. Laserové skenery se podle v nich použité technologie dělí na

- 1) triangulační 3D skenery (laboratorní, přenosné)
- 2) laserové dálkoměrné (time-of-flight, phase) skenery

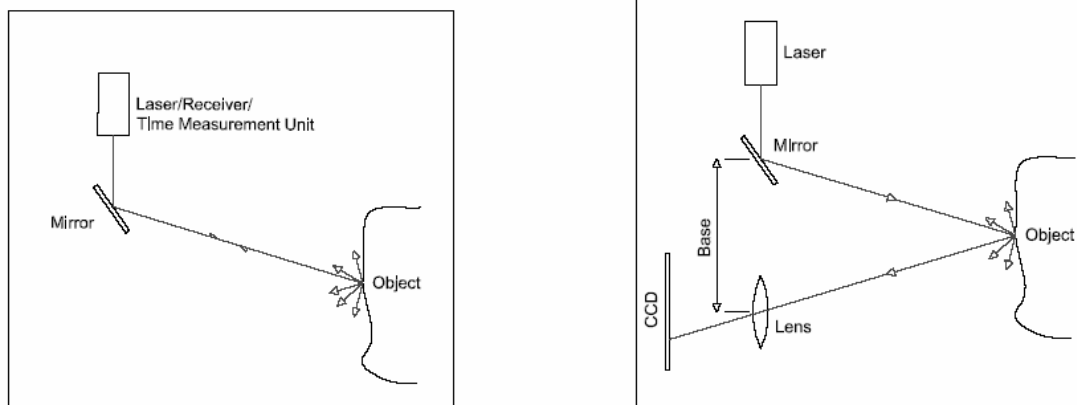
Jiné dělení, podle účelu a místa použití:

- 1) statické, pevně fixované na místě (např. na výrobních linkách kontrolují kvalitu)
- 2) mobilní systémy umísťované na stativy pro měření na krátké a střední vzdálenosti
- 3) systémy leteckého skenování pro topografické aplikace

Laserový dálkoměrný skener (který má dálkoměr impulsní nebo fázový) se skládá ze dvou částí – laserového dálkoměru a skenovacího mechanismu. Do dálkoměru je zabudován buď pulsní laser, který emituje velmi krátké záblesky infračerveného světla, nebo fázový dálkoměr (vzdálenost se určuje z fáze příchozí vlny). Impuls, který je vyslán impulsním dálkoměrem, je odražen od povrchu objektu a vrací se zpět. Senzorem je zaznamenána doba letu, potažmo vzdálenost od objektu. Světelné pulsy jsou vysílány velmi vysokou frekvencí (až 80 000 Hz). Z přijatého signálu můžeme zjistit nejen vzdálenost bodu, od kterého se puls odrazil, ale i intenzitu elektromagnetického záření, a získat tak i obrazovou informaci o typu povrchu.

Druhou částí je skenovací mechanismus, který určuje směr vysílaného paprsku. Často je používán k rozmítání paprsku rotující hranol s několika odraznými plochami. Druhý směr je zajišťován otáčením celého stroje kolem svislé osy.

Triangulační skenery využívají princip výpočtu prostorové souřadnice na základě snímání stopy laseru nebo strukturovaného světla (tzv. optická triangulace) jednou nebo dvěma kamerami (princip: řešení obecného trojúhelníku, ve kterém je známa délka jedné strany – základny - a k ní přilehlé úhly, které jsou také známy nebo měřeny).



Obr. č. 5.1 – Princip time-of-flight skenerů (založeno na měření doby mezi odesláním a přijetím signálu) - vlevo; princip triangulačních skenerů (s jednou kamerou) –vpravo (mirror - zrcátko; receiver – přijímač, senzor; base - základna)

Základním principem fungování laserového skeneru je prostorová polární metoda, jejíž schématické znázornění je na obr.č.5.2. K určení souřadnic bodu P je třeba znát délku průvodiče r (měřená délka) a úhly θ, φ :

$$x = r \cdot \cos \varphi \cdot \sin \theta$$

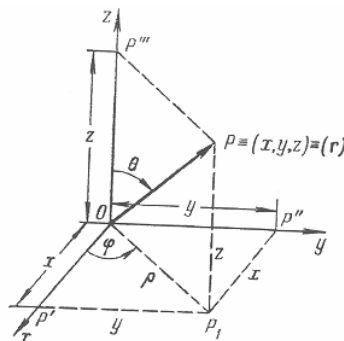
$$y = r \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta$$

$$z = r \cdot \cos \theta$$

rovnice č.5.1

Úhly jsou získávány, jak již bylo zmíněno, například z polohy zrcadel, které rozmítají laserový svazek, a délka se určí například impulsním dálkoměrem skeneru synchronizovaného s polohou zrcadel. Výsledkem výpočtu jsou 3D souřadnice měřeného bodu objektu v souřadnicovém systému skeneru. Odvozené rovnice však platí pro souřadnicovou soustavu definovanou skenerem, která je obecně (lze ji natočit podle potřeby) natočena a umístěna v prostoru. Pokud se provádí horizontace přístroje, pak při

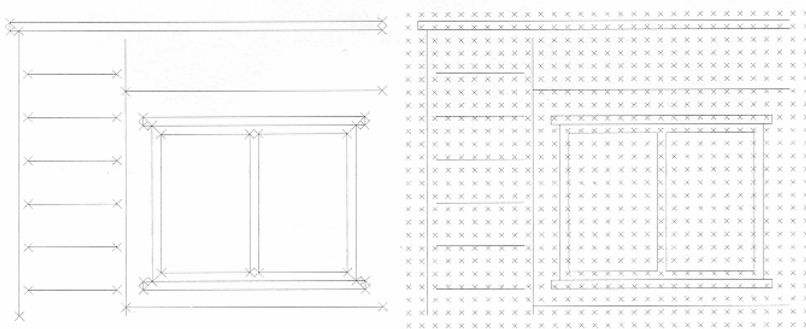
převodu do geodetického souřadnicového systému jde pouze o posun a otočení soustavy okolo osy z.



Obr. č. 5.2 - Schématické znázornění prostorové polární metody

Pro naskenování bodů objektu se používají výše zmíněné principy rozmítání laserového svazku, pomocí kterých jsou na povrchu objektu měřeny body v profilech ve zvolené hustotě. Takto zaměřené body tvoří tzv. mračno bodů. Pro zlepšení orientace uživatele při zobrazení je v některých systémech bod zobrazen nejen polohou, ale také barvou, která vyjadřuje intenzitu přijatého signálu při měření délek. Barevně jsou takto odlišeny povrchy z různých materiálů, úprav a geometrické konfigurace.

V porovnání s geodetickými metodami je laserové skenování neselektivní metodou měření. U geodetických metod včetně fotogrammetrie jsou pro následné modelování zjišťovány souřadnice vybraných charakteristických bodů objektu, jako jsou například hrany, vrchol apod. Oproti tomu u skenování jsou body rozmístěny neselektivně v pravidelném úhlovém rastru, a tedy obecně nejsou měřeny charakteristické body objektu (viz Obr. č. 5.3), které je nutno získat modelováním. Před měřením se tedy musí uvážit požadovaná přesnost modelování nepravidelných objektů vzhledem k pokrytí jejich povrchu podrobnými body.



Obr. č. 5.3 – Rozdíl mezi geodetickým měřením (vlevo) a skenováním (vpravo)

Výsledná přesnost měření (tedy výsledných souřadnic) se odvíjí od použitého přístroje, a proto závisí na přesnosti měření úhlů a délky. Jestliže jsou známy směrodatné odchylky měřených veličin $\sigma_d, \sigma_\varphi, \sigma_\theta$, lze podle zákona hromadění směrodatných odchylek odvodit vzorce pro výpočet směrodatných odchylek souřadnic takto určeného bodu:

$$\sigma_x^2 = \cos^2(\varphi) \cdot \sin^2(\theta) \cdot \sigma_d^2 + d^2 \cdot \sin^2(\varphi) \cdot \sin^2(\theta) \cdot \sigma_\varphi^2 + d^2 \cdot \cos^2(\varphi) \cdot \cos^2(\theta) \cdot \sigma_\theta^2$$

$$\sigma_y^2 = \sin^2(\varphi) \cdot \sin^2(\theta) \cdot \sigma_d^2 + d^2 \cdot \cos^2(\varphi) \cdot \sin^2(\theta) \cdot \sigma_\varphi^2 + d^2 \cdot \sin^2(\varphi) \cdot \cos^2(\theta) \cdot \sigma_\theta^2$$

$$\sigma_z^2 = \cos^2(\theta) \cdot \sigma_d^2 + d^2 \cdot \sin^2(\theta) \cdot \sigma_\theta^2 \quad \text{rovnice č.5.2}$$

Tyto rovnice představují ve své podstatě popis vlivu, který mají směrodatné odchylky měřených veličin na směrodatné odchylky určovaných souřadnic. Ze směrodatných odchylek souřadnic lze zjednodušeným způsobem odvodit směrodatnou odchylku v poloze určeného bodu dle vzorce

$$\sigma_p^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 \quad \text{rovnice č.5.3}$$

Dosazením rovnic č.5.2 a jednoduchými úpravami lze získat rovnici č. 5.4, která postihuje vliv jednotlivých měřených veličin na přesnost umístění měřeného bodu.

$$\sigma_p^2 = \sigma_d^2 + \sin^2(\theta) \sigma_\theta^2 + d^2 \cdot \sigma_\theta^2 \quad \text{rovnice č.5.4}$$

Přesnost triangulačního skeneru se zmenšuje s kvadrátem vzdálenosti předmětu, takže se tento typ skeneru obecně používá při měření na kratší vzdálenosti, zatímco při měření na delší vzdálenosti se využívá skener založený na prostorové polární metodě.

Přesnost určení bodu mohou ovlivnit další faktory. Jedním z nich je velikost laserové stopy, která může, např. na hranách, ovlivnit naměřenou vzdálenost (chyba se může pohybovat od několika milimetrů do několika desítek centimetrů). Naměřenou vzdálenost také ovlivňuje odrazivost (reflexivita) měřeného povrchu. Povrchy o různé odrazivosti mohou působit systematické chyby v měřené délce. K dalším faktorům, které ovlivňují přesnost měření patří teplota okolí i skeneru, atmosférické podmínky (na malou vzdálenost nepatrný vliv).



Obr. č. 5.4 – Příklad -3D model (mesh, neboli trojúhelníková síť) plastiky, bez textur.

Výsledkem měření LSS je tedy mračno bodů. Vzhledem k tomu, že souřadnicový systém skeneru je obecně orientován a umístěn, je většinou nutno provést transformaci bodů do

požadovaného souřadnicového systému. To lze provést, stejně jako ve fotogrammetrii, pomocí vlíčovacích bodů. V případě, že bylo pořízeno více mračen bodů (skenů), provede se stejný postup pro každý sken. Po fázi transformace (registration) se většinou provádí filtrace dat, kdy se odstraní šum, nesmyslně umístěné body (viz výše chyby měření) nebo se jen zredukuje objem dat pomocí různě definovaných filtrů.

Dalším krokem zpracování mračna bodů je aproximace měřených bodů geometrickými entitami, tj. křivkami a plochami, případně tělesy. I když toto vyjádření zní jednoduše, jde o nejnáročnější část zpracování. Geometrii drátových modelů používá mnoho CAD systémů. Zadané body prostorovými souřadnicemi jsou spojovány přímkovými segmenty nebo kruhovými oblouky. Tím vzniká model prostorového objektu, který vypadá, jako by byl sestaven z drátů. Druhou možností je modelování objektu přímo pomocí jednoduchých předdefinovaných objektů, tzv. primitiv, která jsou definována parametricky, svým matematickým vyjádřením. Mohou jimi být např. koule, kvádr, válec, kužel apod. Třetí možností je pospojovat všechny body trojúhelníkovou sítí, které se říká mesh.



Obr. č. 5.5 – Příklad – 3D texturovaný model (mesh, neboli trojúhelníková síť)

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 pro prezentační účely. Vizualizace hlavně usnadňuje orientaci v modelu a také umožňuje rozšíření modelu o další údaje, jako jsou materiály, textury, osvětlení apod. Vizualizace tedy spočívá hlavně v přiřazení materiálů (jejich textur), osvětlení a zpracování zobrazení pomocí software. Takto vytvořený model umožňuje mimo jiné virtuální prohlížení, kdy jsou jednotlivé snímky generovány s fotografickou kvalitou a lze je využít např. pro prezentaci modelu, zhodnocení vlivu nové zástavby na stávající ráz krajiny apod.

5.2.2 Použití LSS pro dokumentaci památek

Při rekonstrukcích a dokumentacích historických budov je třeba předem vypracovat rozsáhlou dokumentaci příslušného objektu. Požadavky památkářů zahrnují jak informace o současném stavu budov, tak informace o konstrukčních pracích nutných pro opravu či rekonstrukci, takže celkově je třeba poskytnout mnohem více informací, než by vyžadovaly prováděné práce. Pro památkovou péči je rovněž nezbytné archivovat celé

rozsáhlé soubory dat, které lze kdykoli v budoucnosti v krátké době vyhledat a využít pro další práci s objektem.

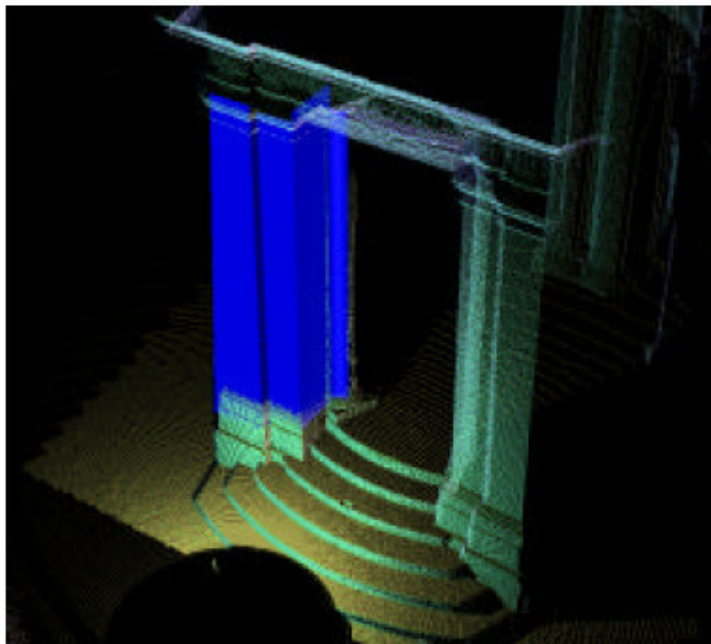
Všechny tyto požadavky lze splnit jen při nasazení 3D laserových skenerů. Zaměřením budov se nejen získají všechny podklady v měřítku 1:1, ale lze zohlednit i to, že u historických budov nejsou všechny linie, rohy a tvary celkově přesně definovány, což je zásadní rozdíl od moderních budov z oceli, betonu a skla, jejichž přesné rohy a pravidelné tvary se blíží standardním formám.

Proto údaje získané proměřováním historické budovy pomocí LSS slouží restaurátorům jako základ pro prováděné měřičské práce a pro vytvoření výsledného 3D digitálního modelu.

Ve srovnání s použitím klasických geodetických metod, kdy se zaměřují jednotlivé měřičské body a výsledky zpracovávají později, při použití LSS se během krátké doby získá velké množství dat zaměřovaného objektu, jejichž zpracování probíhá nezávisle na operátorovi pomocí firemního software. Tím se vyloučí idealizace či zkreslení údajů.

Při přípravě podkladů pro rekonstrukci celého objektu se objekt musí proměřit z více stanovisek a výsledná mračna bodů se převádějí do jednotného souřadnicového systému.

Obraz proměřovaného objektu představují údaje laserového skeneru. Pro další zpracování v CAD systému pro čistě konstrukční účely se mračna bodů převádějí do modelu dat, který se skládá z přímek, ploch, objemů těles nebo jiných jednoznačně určených geometrických prvků.



Obr. č. 5.6 – Příklad – aproximace měřených bodů jednoduchým geometrickým tvarem (primitivem) - kvádrem

Jednotlivé body z mračen bodů se dají spojit pomocí trojúhelníkové sítě a každá nerovnost je díky tomu přenesena do vektorového modelu. V některých případech pro popis objektu postačí hrubší síťování, což vede k redukci zpracovávaných dat, ale pro důležitější úseky objektu je třeba pracovat s jemnějším síťováním, které zaručí vysoký stupeň detailizace.

Digitální vektorový model je určen i pro dokumentaci stavu před zahájením rekonstrukčních prací. Z virtuálního modelu 1:1 může restaurátor porovnat v každé době aktuální stav stavby vůči počátečnímu stadiu a vyžádat si další měřičské záběry. Digitální

3D model tvoří základ pro rozsáhlý postup mapování a měření. Výsledky těchto prací jsou uspořádány podobně jako virtuální modely, které jsou stále k dispozici pro další sledování objektů v 3D systému v průběhu rekonstrukcí. Samostatnou oblastí využití LSS jsou interiéry historických objektů a jako jeden z prvních příkladů použití pro tento účel lze uvést zaměření mobiliáře Kleine Galerie ve vídeňském Schönbrunnu provedené skenerem RIEGL (http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/np_vienna_terrestrialls_2001.pdf). Výstupem mohou být různé řezy a pohledy na realistický model.

Zpracovatelský software pro laserové skenování přináší dobré výsledky u pravidelných objektů (potrubí atd.), pro obecné objekty jsou výsledky také přijatelné, jen čas strávený modelováním je často delší. Možnosti software někdy zaostávají, například jsem při zpracovávání této diplomové práce postrádal v dostupných komerčních LSS software splines. Každý zpracovatelský program má své originální funkce, často velmi užitečné, ale postrádá ty, jimiž je vybaven jiný program, a naopak. Proto jsem byl nucen ke své práci využít více programů.

Využití LSS se podle mého názoru v blízké budoucnosti široce uplatní pro dokumentaci památkových objektů. Nicméně již nyní existuje mnoho objektů, které byly zdokumentovány touto technologií. Například na webových stránkách (<http://cipa.icomos.org/>) organizace CIPA (The International Committee for Architectural Photogrammetry – Mezinárodní komise pro architektonickou fotogrammetrii) je mnoho příkladů uskutečněných projektů dokumentace památkových objektů nebo také projektů výzkumného charakteru. Část 5.2 byla částečně převzata z [3], [6] a [7].

5.3 Metody geodetické

Pokud by se měla klenba dokumentovat jen pomocí geodetických metod, byl by to úkol velmi pracný, protože předem vybrat body které budou vystihovat tvar klenby je dosti těžké (nemluvě o jejich počtu). Nicméně geodetické měření je mnohdy nezbytnou součástí při měření laserovým skenerem nebo při fotogrammetrické dokumentaci.

Podle mého názoru nemá zde smysl vypisovat matematické základy, postup výpočtu a výstupy těchto metod, protože jsou jistě geodetické veřejnosti známy.

Nejpoužívanější současnou (čistě) geodetickou metodou využívanou při dokumentaci památkových objektů je metoda polární, a to díky používání totálních stanic (i s pasivním odrazem), které umožňují měřit úhly (horizontální a vertikální) a délku. Vzorce a principy pro výpočet souřadnic z naměřených dat 3D polární metodou jsou uvedeny v kapitole 5.2. Rovněž se hojně používají kontrolní a konstrukční oměrné. Stojí za zmínku, že v současné době jsou stále populárnější laserové ruční dálkoměry (např. DISTO) s pasivním odrazem (vhodné např. pro změření výšky místnosti). Další základní geodetické úlohy se využívají např. pro určení stanoviska totální stanice – protínání zpět, protínání z délek atd.

Metody geodetické se využívají zejména při zaměřování interiéru, např. při zaměřování půdorysu místností, anebo při zaměřování pro určení souřadnic stanovisek komor.

Geodetické metody jsou mnohdy doplňkovými (nebo na stejné úrovni??) metodami při fotogrammetrické dokumentaci, například při zaměřování vlíčovacích bodů anebo při kontrolních oměrných.

5.4 Metody fotogrammetrické

Pro dokumentaci kleneb se méně hodí jednosnímková fotogrammetrie, nicméně části kleneb, které jsou téměř rovinné, by bylo možné touto metodou pracovat. Průseková

fotogrammetrie a stereofotogrammetrie se na dokumentaci kleneb hodí lépe a v praxi se používá (konkrétně zaměřeníklenby Vladislavského sálu metodou stereofotogrammetrickou, diplomová práce ing. Petra Šebesty z roku 1999).

Pro získání měřičských snímků se v současné době stále více používají digitální komory (měřičské i neměřičské). Nicméně jsou užívané i komory s fotografickými materiály (například řada komor UMK). Podle toho, jakou komoru použijeme, se odvíjí další technologie vyhodnocování. Matematické základy metod zůstávají stejné, jako je tomu např. u jednosnímkové fotogrammetrie.

5.4.1 Jednosnímková fotogrammetrie

Jde o vztah mezi dvěma rovinami, z čehož se musí při volbě vlícovacích bodů i při vyhodnocení vycházet. Pokud bude snímek rovinného objektu přesně svislý, je vztah mezi snímkem, objektem a mapou jednoduchý a obraz se liší pouze měřítkem. Většinou ale snímek není přesně svislý (osa záběru kolmá na objekt), tudíž je měřítko ve snímku proměnné s polohou na snímku z důvodu proměnné vzdálenosti k jednotlivým bodům, a dochází tak k perspektivnímu pohledu. K tomu se druží fakt, že prakticky žádný objekt není naprosto rovinný, a to způsobuje radiální posuny podrobných bodů v závislosti na jejich prostorovém rozložení. Pro ideální geometrický vztah mezi dvěma rovinami platí Pappova věta: dvojpoměr čtveřice bodové nebo paprskové zůstává v rovině mapy i snímku zachován.

Matematickým vyjádřením skutečnosti je kolineární transformace mezi snímkem a mapou. Pro její řešení je třeba pěti vlícovacích bodů (9 neznámých).

$$X = \frac{a'_1x' + a'_2y' + a'_3}{c'_1x' + c'_2y' + c'_3}; Y = \frac{b'_1x' + b'_2y' + b'_3}{c'_1x' + c'_2y' + c'_3} \quad \text{rovnice č.5.5}$$

Vydělením rovnic konstantou c_3 dostaneme vyjádření jednodušší, které je definováno pouze čtyřmi body (8 neznámých).

Výsledný fotoplán (jeho přesnost) bude ovlivněn měřítkem snímku a zejména pak hloubkovou členitostí zaměřovaného objektu. Při aplikaci jednosnímkové fotogrammetrie nelze zaměřovat objekt příliš hloubkově členěný (metoda se nehodí pro domy s množstvím vystupujících balkonů, schodišť apod.) U hloubkově členitých objektů by se příliš projevoval rozdíl mezi středovým průmětem snímku a pravoúhlým průmětem a způsoboval by radiální posuny podrobných bodů.

Z tohoto plyne, že je důležitý výběr vhodné komory. Použití dlouhoohniskových komor ale přináší problém malého zorného úhlu, což je obzvlášť výrazné při zaměřování památkových objektů, kde je fotogrammetr limitován maximální možnou vzdáleností od objektu (např. šířka ulice). Dále je zřejmé, že zkreslení způsobené radiálním posunem bodů roste směrem od středu snímku, a je tedy žádoucí části s většími výstupky umístit pokud možno do středu snímku.

V případě, že je objekt hloubkově členitý a rozdíly v souřadnici y přesahují stanovenou mez, dá se objekt překreslit po vrstvách. Pokud nelze užít ani překreslení po částech, je nutno užít metodu stereofotogrammetrickou.

Jednosnímková fotogrammetrie má jednoznačně velké uplatnění při tvorbě fotoplánů nepřliš hloubkově členěných objektů jako např. fasád domů, fotoplánů fresek, archeologických nalezišť.

Metod vyhodnocení jednosnímkové fotogrammetrie existuje mnoho, nicméně zmíním nejnovější, která se bude stále častěji používat z důvodu postupně většího používání digitálních komor. Jde o digitální překreslení, které je nejjednodušší metodou digitální fotogrammetrie, jež odpovídá postupu při klasickém opticko-mechanickém překreslení snímku. Digitální řešení je ale nesrovnatelně rychlejší a elegantnější. V zásadě platí stejné poučky pro překreslování snímků, jako u řešení analogového, tj. překreslovat lze jednoduše pouze rovinný předmět nebo terén. Postup je jednoduchý a lze ho aplikovat prakticky na libovolném software, který umí provádět geometrickou transformaci obrazu na základě vlíčovacích bodů. Základem je snímek, který skenujeme podle požadavku přesnosti:

$$DPI = \frac{2,54 \cdot k \cdot m_s}{\Delta x} \quad \text{rovnice č.5.6}$$

kde Δx je maximální přípustná chyba, m_s je měřítko snímku a k je násobná konstanta (2 až 3) dle možnosti detekce vlíčovacích bodů. Při digitálním překreslení např. fasády lze použít prakticky libovolný software, který umí provádět transformaci rastru na základě vlíčovacích bodů. Nejvhodnější (nejpřesnější) je ale již zmíněná kolineární transformace. Na snímku potřebujeme minimálně čtyři vhodně rozložené vlíčovací body (nejlépe v rozích obrazu, žádné tři z těchto bodů nesmí ležet na přímce, všechny vlíčovací body musí ležet v jedné rovině), pomocí kterých vypočteme koeficienty kolienace. Pokud bude vlíčovacích bodů více, dojde k vyrovnání. Základní rovnice viz č.5.7. Rovnice se napíše jako soustava osmi lineárních rovnic. Pokud je bodů více, dojde k vyrovnání MNC.

Po odečtení souřadnic vlíčovacích bodů a spojení těchto hodnot s jejich známou polohou v místním nebo geodetickém systému dojde ke geometrické transformaci. Po jejím dokončení dostaneme překreslený obraz, transformovaný do souřadného systému vlíčovacích bodů. Výsledkem je tedy fotoplán, který se dále dá např. vektorově vyhodnotit, a to třeba v software Topol.



Obr. č. 5.7 – Fotoplán (příklad)

5.4.2 Stereofotogrammetrie

Další fotogrammetrickou metodou, hojně využívanou pro dokumentaci památkových objektů (i kleneb, příklad viz konec této kapitoly), je stereofotogrammetrie. Vyhodnocení na analogových strojích se téměř již neprovádí, zato na analytických strojích je běžné. Samozřejmě se stále více používá digitální vyhodnocení.

Metoda stereofotogrammetrie používá binokulárního přímého měření snímkových souřadnic obvykle v levém snímku měřičské dvojice a pravý snímek se užívá pro určení horizontální paralaxy. Snímkovou dvojici lze poříditi různým způsobem, pro kvalitní vyhodnocení je třeba dodržet vhodnou délku základny, přibližně stejné výšky obou stanovisek fotografování a nejlépe rovnoběžné osy záběru. V klasickém pojetí se rozlišuje:

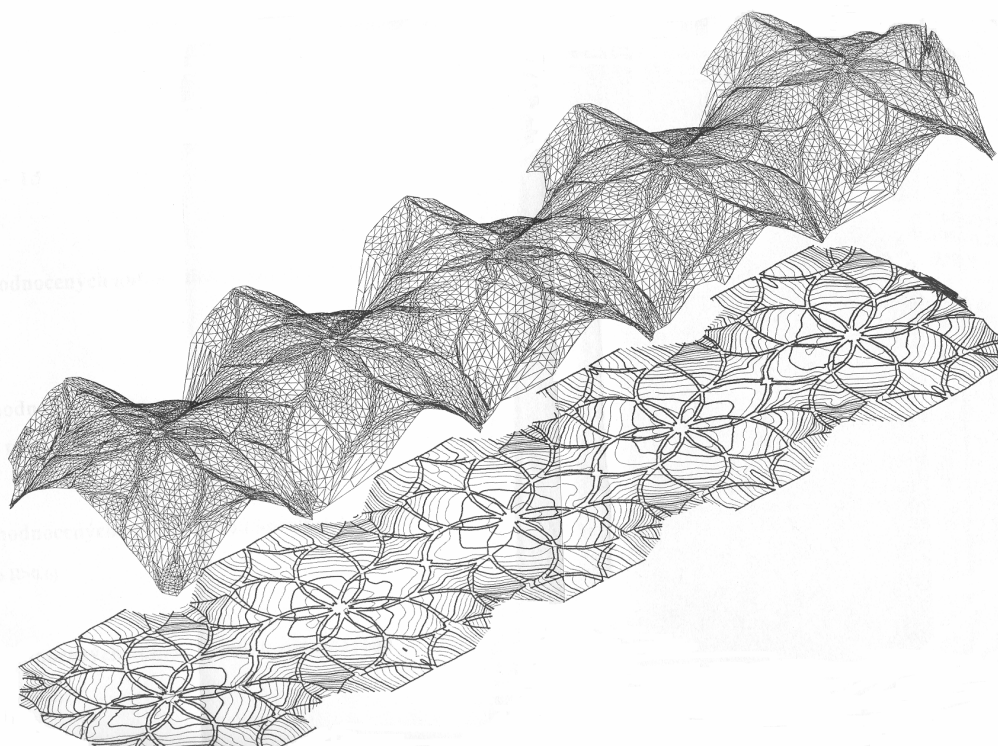
1. normální případ (osy záběru jsou kolmé k fotogrammetrické základně, (ω, φ, κ jsou úhly otočení kolem osy x, y respektive z) $\omega, \kappa = 0, \varphi = 100^{gon}$)
2. stočený případ (osy záběru jsou stočené o určitý úhel k fotogrammetrické základně, $\omega, \kappa = 0, \varphi = \text{obecný}$)
3. skloněný případ (osy záběru jsou skloněné o určitý úhel od vodorovné, $\omega = \text{obecný}, \kappa = 0, \varphi = 100^{gon}$)
4. obecně orientovaný případ (ω, κ, φ jsou obecné)
5. konvergentní snímky
6. divergentní snímky

Základem pozemní stereofotogrammetrie je tzv. normální případ, tj. situace, kdy osy záběru jsou kolmé na základnu. Odvození vztahů mezi snímkovými souřadnicemi a modelovým systémem viz [2]. Ostatní případy se dají odvodit analogicky podle vztahů normálního případu, a to téměř jen s jinými hodnotami v matici rotace.

Vyhodnocení snímků lze opět provádět analogově, analyticky (komparátory početně, analytické stroje) nebo digitálně (réseau komory, digitální stereoskopická pracoviště). Všeobecný postup vyhodnocení se skládá z orientace snímkové dvojice (snímků) a podrobného vyhodnocení. Nejstarší vyhodnocovací přístroje jsou založené na principu analogového řešení rekonstrukce snímáčího procesu – odtud název analogové přístroje. Tyto stroje už prakticky patří minulosti. Zato analytické vyhodnocovací přístroje se stále používají, např. Dicomat nebo Planicomp. Na těchto přístrojích se také provádí relativní i absolutní orientace (potřeba lícovací body), ale při pohybu měřičské značky se ve skutečnosti pohybují snímky, a to nepřímo přes procesor počítače. Jinými slovy se model, na rozdíl od analogových přístrojů, pouze simuluje v počítači. Při analytickém vyhodnocení se měří snímkové souřadnice (ve skutečnosti se procesoru předají souřadnice modelové) podrobných bodů na přesných komparátorech s následným výpočtem geodetických souřadnic. U většiny těchto přístrojů je možný export souřadnic do CAD programů (např. Microstation, AutoCAD).

Digitální vyhodnocení se provádí pomocí stereoskopů, polarizačních přístrojů anebo Crystal Eyes. Poslední jmenovaná technologie funguje na základě aktivních brýlí, mezi jejichž skly jsou tekuté krystaly. Na monitor se vysílá levý a pravý snímek a informace o tom, který snímek je zobrazován, se vysílá infračerveným vysílačem nad monitorem do brýlí; ty reagují tak, že vysílá-li se levý snímek, uzavřou průchodnost do pravého oka a naopak. Pokud je frekvence změny vysoká (alespoň 25 Hz), vnímá lidské oko tuto změnu jako kontinuální a výsledkem je stereovjem.

Jako ideální příklad použití metody stereofotogrammetrie poslouží diplomová práce ing. Petra Šebesty z roku 1999, který touto metodou (celkem 11 stereodvojic) vyhotovil model Vladislavského sálu na Pražském hradě (vrstevnicový plán i 3D model).



Obr. č. 5.8 – Model klenby Vladislavského sálu

5.4.3 Průřeková fotogrammetrie

Pokud se v současné době mluví o průřekové fotogrammetrii, myslí se tím téměř určitě průřeková fotogrammetrie digitální. Jde v podstatě o úlohu protínání vpřed z úhlů, která je řešena prostřednictvím měřičských snímků. Při průřekové fotogrammetrii se pořizují snímky z dostatečně dlouhé základny, aby úhly protnutí byly příznivé.

V současných systémech je ale řešení založeno opět na základní fotogrammetrické rovnici (rovnice č.5.7), zde trochu upravené. Veškeré fotografické práce spočívají v pořízení vhodného počtu konvergentních snímků, které obepínají snímáný objekt. Snímky musí mít dostatečný překryt s možností identifikace spojovacích bodů. Je vhodné poříditi si náčrt stanovisek s přibližnými osami záběrů. Dále je nutno na objektu zaměřit geodeticky nebo jednodušeji oměrnými dostatečný počet lícovacích bodů.

Minimální počet pro transformaci do geodetického systému je sedm změřených veličin (2 body o 3 souřadnicích a jeden o jedné). V tomto případě není kontrola, proto se běžně zaměřuje 6-10 vlícovacích bodů na menším a jednoduchém objektu.

Nutnou podmínkou je změřit na snímcích spojovací body, které slouží k vytvoření modelu obdobně jako orientační body u stereo metody při relativní orientaci. Výpočet probíhá na základě fotogrammetrických rovnic

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x' - x_0') + r_{12}(z' - z_0') - r_{13}f}{r_{31}(x' - x_0') + r_{32}(z' - z_0') - r_{33}f} \quad \text{rovnice č.5.7}$$

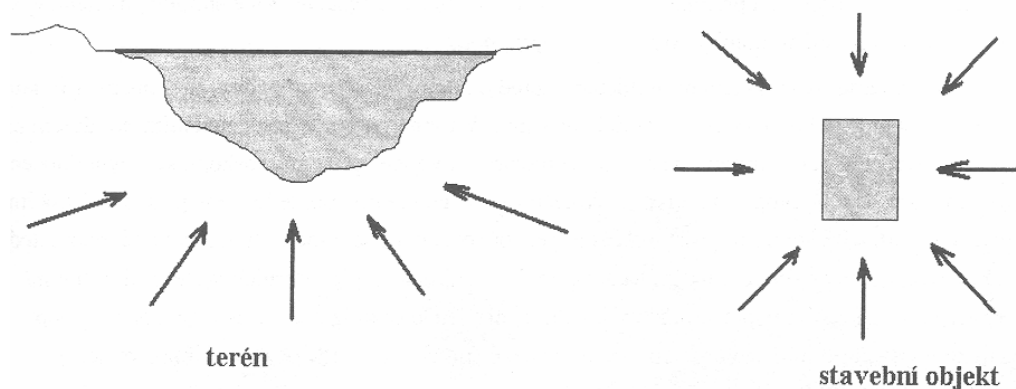
$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x' - x_0') + r_{22}(z' - z_0') - r_{23}f}{r_{31}(x' - x_0') + r_{32}(z' - z_0') - r_{33}f}$$

kde X, Y, Z jsou geodetické souřadnice bodů, X_0, Y_0, Z_0 jsou souřadnice projekčního centra, x', z' jsou měřené snímkové souřadnice a x'_0, z'_0 jsou souřadnice hlavního bodu, f je konstanta komory. Výpočet neznámých v matici rotace ω, φ, κ , X_0, Y_0, Z_0 pro každý snímek se provádí iterací pomocí souřadnic známých lícovacích bodů; znamená to, že potřebujeme přibližné hodnoty neznámých před výpočtem.

Celkový výpočet využívá blokové vyrovnání ve tvaru:

$$\begin{pmatrix} x' - x'_0 + \Delta x' \\ z' - z'_0 + \Delta y' \\ -f \end{pmatrix} = m \cdot R^T \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad \text{rovnice č.5.8}$$

Kde $\Delta x'$ a $\Delta y'$ jsou opravy snímkových souřadnic (obvykle o radiální distorzi). Pro vyrovnání je vztah v rovnici č.5.8 linearizovat a převést na rovnice oprav a dále na systém normálních rovnic, případně zavést váhy jednotlivých měření.



Obr. č. 5.9 – Ukázkové rozestavení stanovisek a naznačené směry snímkování při průřezové metodě

Digitální snímky jsou získány buď přímo digitální komorou nebo skenováním snímků měřičských nebo réseau komor (nejlépe negativů). Potřebné rozlišení digitálních snímků je nutné předem vypočítat na základě požadavků přesnosti výsledků. Výpočet probíhá tak, že nejprve se zpětně vypočtou stanoviště fotografování (iteračně z měřených lícovacích a spojovacích bodů a ze znalosti přibližné orientace snímků – z náčrtu). Dále se určují snímkové souřadnice podrobných bodů na jednotlivých snímcích a provede se protínání vpřed. Pro vyhodnocení je třeba pořídit alespoň tři měřičské snímky, aby byla možnost kontroly (dva bez kontroly). Osy záběru jednotlivých snímků musí být konvergentní (osy záběrů se protínají). Optimální počet snímků vyplývá z velikosti objektu, jeho složitosti a požadované přesnosti vyhodnocení. Na objektu je nutné geodetickými metodami zaměřit dostatečný počet vlícovacích bodů. Stanoviště komory lze volit téměř libovolně, přizpůsobit dané situaci a jejich polohu v okamžiku snímkování lze při dostatečném počtu vlícovacích bodů vypočítat zpětně. Při vyhodnocení se numericky obnoví chod paprsků v prostoru od snímku k předmětu, neboli obnoví se situace při snímkování a nalezne transformační vztah mezi systémem snímkových souřadnic a systémem souřadnic objektu tak, aby bodu zaměřenému na snímcích odpovídal jednoznačně právě jeden bod předmětu ve zvolené souřadnicové soustavě. Více snímků znamená vyšší pracnost, ale též zpřesnění polohy nově určených bodů.



Obr. č. 5.10 – Příklad – 3D model kapličky v Bolkově u Roupova; Plzeňský okres, zaměřený metodou průsekové fotogrammetrie

Nevýhodou této metody je skutečnost, že geometrie pohledu není podobná lidskému (stereo) a vyhodnotit prostorově lze jen přirozeně nebo uměle signalizované body, tedy takové body, které jsme schopni nalézt na alespoň dvou snímcích. V moderních systémech tomu může z hlediska automatizace přispět obrazová korelace, ale jen u snímků, které nejsou pořízeny s příliš velkým konvergentním úhlem. Další nevýhodou této metody je, že u členitých objektů existuje mnoho zakrytých míst.

Známým systémem je RolleiMetric, který nabízí profesionální komory i výkonný software, obdobné principy používá např. systém Leica-Elcovision. Systémů pro digitální průsekovou fotogrammetrii je dnes již více, řada z nich využívá digitální fotoaparáty nebo filmové měřičské i neměřičské komory s možností jejich kalibrace (např. Photomodeler). Díky jednoduchosti a cenové dostupnosti současného software spojené s nenáročnou technickou výbavou i obsluhou se použití této technologie hojně rozšířilo.

Co se týká použití této metody pro zaměření a dokumentaci kleneb, myslím si, že průseková fotogrammetrie se dá s úspěchem použít pro velkou část klenebních tvarů. Nicméně tato metoda je limitována větším úhlem protnutí paprsků, a ten může být, vzhledem k tomu, že jde o interiér, někdy problém dodržet. V kapitole 5.4 bylo částečně čerpáno z [2] a [3].

Konečným výstupem při fotogrammetrické a geodetické dokumentaci památkových objektů jsou zejména pohledy na zaměřovaný objekt z libovolného směru a místa, vrstevnice, řezy a půdorysy anebo dokonce 3D model (v příslušném software). Toto platí i pro třetí metodu, laserové skenování.