

1. KALIBRACE DIGITÁLNÍCH FOTOAPARÁTŮ

Tato kapitola obsahuje tři části. V první části jsou stručně popsány jednotlivé [kalibrační techniky](#). Druhá část je zaměřena na popis vhodné [konfigurace snímků](#). Konkrétní [postup pro kalibraci](#) amatérského digitálního fotoaparátu pomocí testovacího pole je obsahem třetí části. Popis kalibrace je uzpůsoben podmínkám Laboratoře fotogrammetrie na stavební fakultě ČVUT v Praze, kde je pro tyto účely používán program Photomodeler kanadské firmy EOS Systems Inc..

1.1 PŘEHLED KALIBRAČNÍCH TECHNIK

1.1.1 Pojem kalibrace

Kalibrace systému snímků slouží k určení vlastností použitého fotografického přístroje¹ a popisuje skrze níže uvedené parametry tzv. prvky vnitřní orientace:

- Konstanta komory
- Poloha hlavního snímkového bodu
- Zkreslení = distorze
- Rozličné přídavné parametry

Zkreslení lze charakterizovat pomocí dílčích vlivů jako je radiálně-symetrické, tangenciální a asymetrické zkreslení, afinita a nekolmost os souřadnicového systému nebo lze veškeré vlivy vyjádřit jedinou polynomičnou funkcí, která popisuje dostatečně přesně průběh zkreslení daného objektivu. Často se můžeme rovněž setkat s vyjádřením distorze pouze pomocí radiálně-symetrického a tangenciálního zkreslení (viz.kalibrační protokol semiměřické komory Rolleiflex 6006 Metric).

Poněvadž obecně se předpokládá, že prvky vnitřní orientace u měřických komor jsou známé a neměnné, bude zaměřena problematika kalibrace především na snímkovací systémy, jejichž geometrická stavba se mění s časem (např.semiměřické komory a digitální fotoaparáty). V závislosti na aktuálních požadavcích na přesnost musí být měřické komory po určitém čase znovu kalibrovány.

1.1.2 Kalibrační metody

V podstatě lze kalibrační postupy rozdělit na tři základní způsoby. Ty mohou být charakterizovány pomocí referenčního objektu stejně jako pomocí místa a časového okamžiku kalibrace:

¹ Pojem fotografický přístroj je použit jako obecné označení pro měřické, semiměřické komory a profesionální či amatérské fotoaparáty klasické i digitální. Jeden či více fotografických přístrojů tvoří měřický systém.

- Laboratorní kalibrace
- Kalibrace pomocí testovacího pole
- Simultánní kalibrace

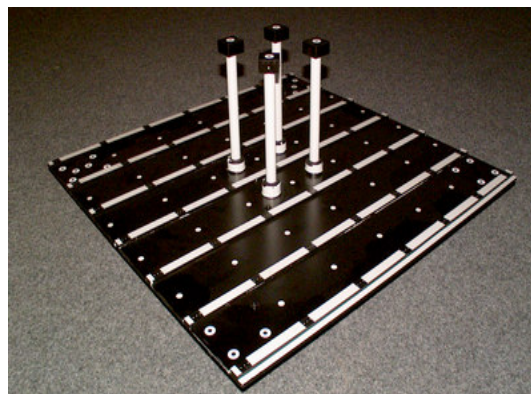
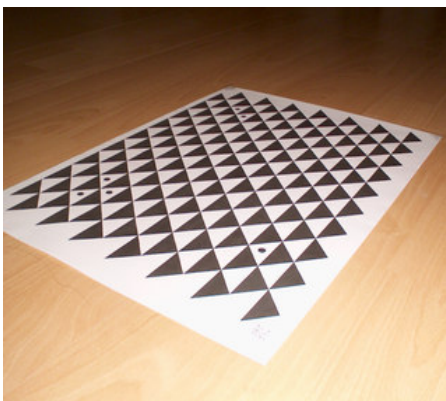
Kalibrace snímací techniky dnes znamená, že parametry fotografického přístroje jsou určovány v rámci početního vyhodnocení, které už často nelze provádět odděleně od vlastní rekonstrukce objektu. K porozumění jednotlivých způsobů jsou proto nezbytné znalosti o základních postupech fotografické orientace a rekonstrukce objektu, stejně tak jako paprskového vyrovnání svazků. Přehledy kalibračních technik jsou zmíněny v následující literatuře: Fryer 1996, Klette 1996, Godding 1993, Kupfer a Wester-Ebbinghaus 1985, Wester-Ebbinghaus 1983b, Brown 1971.

1.1.2.1 Laboratorní kalibrace

Laboratorní kalibrace má smysl jen pro měřické komory. Vnitřní orientace je určována za pomoci goniometru nebo kolimátoru, v němž je měřen směr nebo úhel obrazových paprsků procházejících objektivem komory. Laboratorní kalibraci nemůže běžně provádět vlastník komory a pro měřické systémy v pozemní fotogrammetrii nemá prakticky význam.

1.1.2.2 Kalibrace pomocí testovacího pole

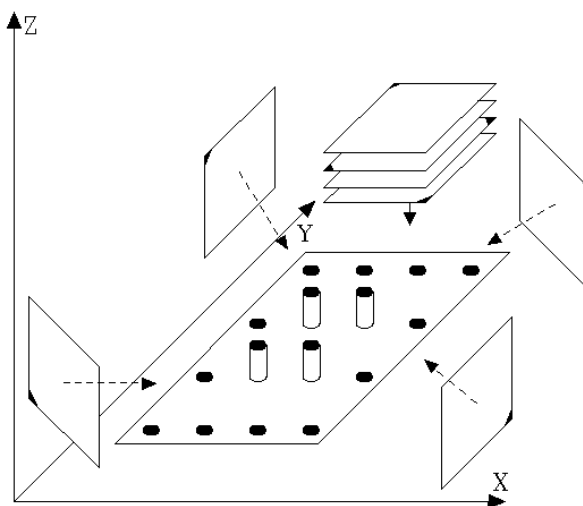
Při tomto způsobu kalibrace se snímkuje z několika stanovisek testovací pole se signalizovanými body, tak aby vlastní pole zaujímalo dostatečnou plochu na pořízených snímcích a osy záběrů jednotlivých snímků měly vhodnou konfiguraci pro protínání (konvergentní snímky). Signalizované body jsou buď body o známých objektových souřadnicích², nebo jsou známy vzdálenosti mezi několika body testovacího pole. Testovací pole může být přenosné nebo pevné (např. na fasádě budovy), rovinné či prostorové, viz.Obr.1.



Obr. 1: Konfigurace snímků pro kalibraci pomocí testovacího pole

² Objektové souřadnice – souřadnice měřené v objektovém prostoru (např. geodetické souřadnice).

Vlastní možnou konfiguraci snímků pro kalibraci pomocí testovacího pole znázorňuje Obr. 2. Optimální pro kalibraci pomocí rovinného testovacího pole je osm snímků, z toho čtyři s osou záběru kolmou na testovací pole a vzájemně pootočené ve své rovině o 90° a dále čtyři snímky šikmé rovněž pootočené o 90° .



Obr. 2: Konfigurace snímků pro kalibraci pomocí testovacího pole

Z měřených snímkových a daných objektových souřadnic (přibližných) se vypočtou metodou protínání paprskových svazků vyrovnané souřadnice bodů testovacího pole, prvky vnější, a rovněž i vybrané prvky vnitřní orientace. Souřadnice bodů testovacího pole v objektové souřadnicové soustavě se vypočtou metodou vyrovnání volné sítě.

Při početním určení může dojít k nežádoucí korelaci mezi jednotlivými parametry, kterému lze zabránit např. vhodnou konfigurací snímků. Obzvláště důležité je znát v objektovém prostoru³ alespoň jednu informaci o měřítku ve směru osy záběru, aby bylo možné určit konstantu komory. K tomu stačí jedna známá vzdálenost, v případě kalibrace pomocí prostorového testovacího pole, nebo při použití rovinného testovacího pole zajistí tuto podmínku šikmé snímky. Snímky otočené ve vlastní rovině ($\kappa=90^\circ$) slouží především pro určení správné polohy hlavního snímkového bodu a nestejného měřítka v jednotlivých souřadnicových osách (afinita).

Všeobecně by měla konfigurace snímků dostatečně vystihovat daný objekt (testovací pole...), tzn. že objekt musí být zachycen na dostatečném množství snímků s vhodným úhlem průtnutí os záběru a dostatečným vzájemným překrytem. Pro dostatečně přesné určení parametrů zkreslení je rozhodující zejména počet a rozmístění bodů na jednotlivých snímcích.

³ Objektový prostor – prostor, kde se ve skutečnosti vyskytuje objekt zobrazený na snímcích

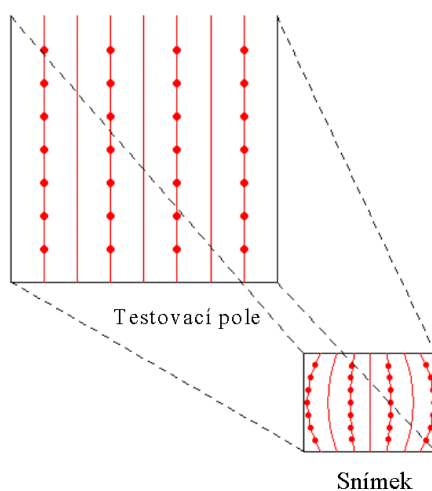
1.1.2.3 Kalibrace na olovnicové závěsy

Při tzv. olovnicové metodě se sestává testovací pole z více objektových rovin, které mohou být tvořeny např. svisle visícími dráty. Protože v ideálním středovém promítání se teoreticky přímky zobrazují jako přímky, musí být všechny odchylky způsobeny pouze vlivem zkreslení. V tomto případě ovšem může být odvozeno pouze zkreslení, konstantu komory ani polohu hlavního snímkového bodu tedy touto metodou určit nelze. Výhodou této metody je, že vypočtené parametry zkreslení nejsou korelované s ostatními prvky vnitřní a vnější orientace.

Při praktické realizaci olovnicového testovacího pole mohou být závěsy opatřeny signalizovanými body, jejichž polohu lze měřit na jednotlivých snímcích. Existují-li na objektu nepřerušené linie, je možné určit v obraze jejich vlastní průběh pomocí automatického sledování linie s vysokou hustotou bodů.

Dále lze pro kalibraci použít také přirozené přímky např. hrany budov.

Olovnicová metoda se používá v takových případech, kdy je požadována předkalibrace zkreslení, např. pro objektivy s velkým zkreslením (rybí oko), a získané snímkové souřadnice jsou tedy před vlastní kalibrací opraveny o vliv zkreslení.

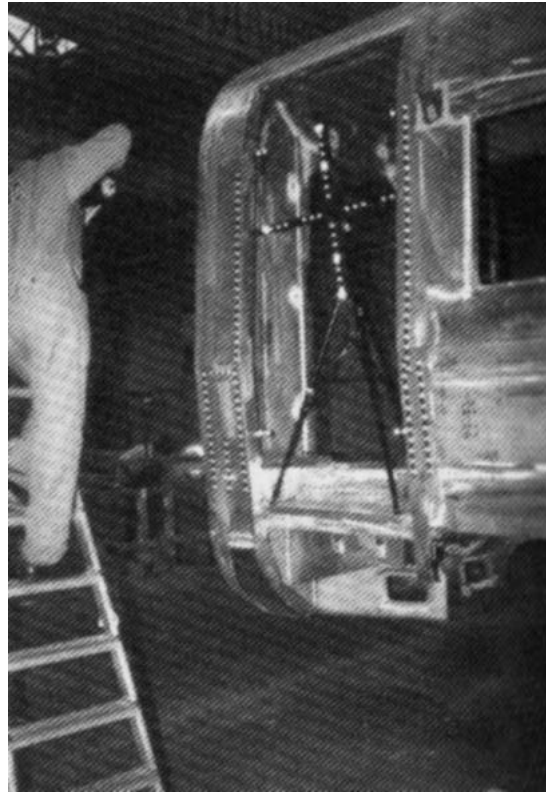


Obr. 3: Kalibrace pomocí olovnicových závěsů

1.1.2.4 Simultánní kalibrace

Pod pojmem simultánní kalibrace je myšlena kombinace kalibrace pomocí testovacího pole (snímkování známého bodového pole) s vlastním snímkováním objektu. Tento způsob lze využít například, pokud měřený objekt nemá žádnou vlastní strukturu nebo nejsou známy žádné geometrické informace, které by umožnily provést samokalibraci.

V nejjednodušším případě může být použit přenosný prostorový rám o známých rozměrech, který se postaví vedle měřeného objektu a nasnímkuje se spolu s objektem. Lokální souřadnicový systém testovacího pole může být rovněž použit pro definování souřadnicové soustavy objektové, čímž nejsou zapotřebí další vlíčovací body na objektu. Obr. 4 ukazuje použití tohoto typu testovacího tělesa při zavedení offline systémů pro měření železničních vagónů.



Obr. 4: On-the job kalibrace s přenosným testovacím tělesem

Simultánní kalibrace je způsob kalibrace, kdy jsou snímky používané pro kalibraci využity i pro vlastní vyhodnocení (rekonstrukci objektu). Testovací pole je součástí zaměřovaného objektu, jenž musí být nasnímkován za srovnatelných podmínek, které platí pro snímkování při kalibraci pomocí samotného testovacího pole (prostorová hloubka, snímky pootočené o 90° ve vlastní rovině, konvergentní snímky). Hlavní předností simultánní kalibrace je, že vnitřní orientace se určuje přímo pro časový okamžik snímkování měřeného objektu, což zaručuje ve srovnání s ostatními způsoby kalibrace nejvyšší přesnost při vyhodnocení objektu.

Pro simultánní kalibraci není nezbytné, aby byly známy souřadnice bodů testovacího pole. Pro určení prvků vnitřní orientace samostatně je třeba znát ze snímků jen základní informace, tedy snímkové souřadnice a podmínky pro protínání bodů měřených na více snímcích (spojovacích bodů⁴). Vlícovací body slouží pouze pro určení prvků vnější orientace (poloha stanoviska snímkování a rotace), tedy pro definování správného rozměru a polohy rekonstruovaného objektu v objektovém

prostoru. Pro určení správného měřítka je dostačující znát v objektovém prostoru jednu vzdálenost. Je-li simultánní kalibrace prováděna jen z fotogrammetrického pozorování hovoříme o tzv. *Samokalibraci* (Self-calibration).

Pokud zaměřovaný objekt nemá vlastní vhodnou konfiguraci pro simultánní kalibraci nebo pokud je používán vícekamerový online systém, musíme se vrátit zpět ke kalibraci pomocí testovacího pole nebo k On-the-job kalibraci.

1.2 KONFIGURACE SNÍMKŮ

Dále objasňovaná konfigurace snímků je vysvětlena především pro simultánní kalibraci pomocí paprskového vyrovnání svazků. Níže uvedené konfigurace testovacího pole a stanovisek kamer jsou možnosti vybrané z literatury, viz. (Wester- Ebbinghaus 1985). Jsou možné rovněž rozšířené a sloučené formy níže uvedených konfigurací a často se nelze sloučeným formám vyhnout. Ve fotogrammetrické praxi jsou vícesnímkové konfigurace standardem, zatímco kalibraci kamer s použitím jen jednoho snímku lze nalézt v mnoha oblastech robotiky a počítačového vidění (Computer Vision).

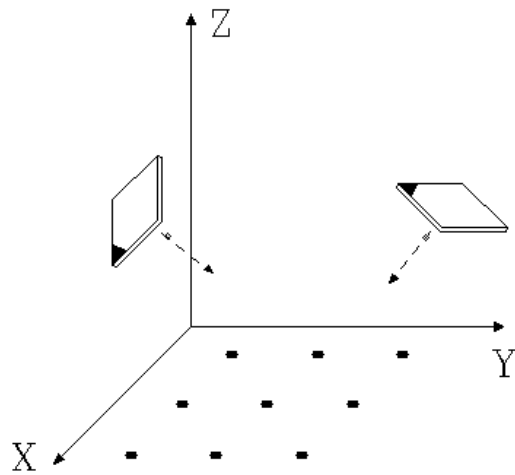
1.2.1 Kalibrace s použitím rovinného testovacího pole

Předpokládáme-li rovinné pole bodů (rovinné testovací pole, rovinný zaměřovaný objekt), pak je zapotřebí více šikmých snímků testovacího pole. Nejsou-li známy vlíčovací body, lze využít pro kalibraci i známých délek v objektovém prostoru (měřítka).

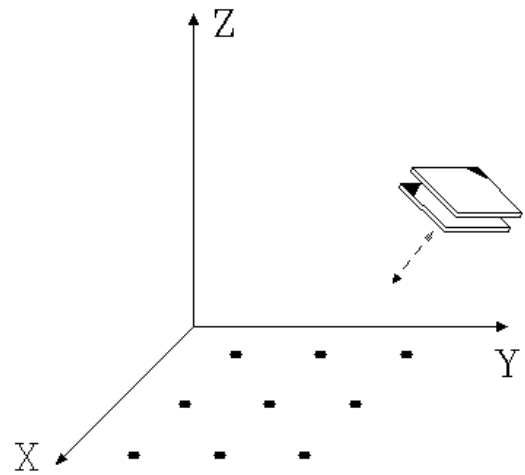
Obr. 5a a 5b znázorňují minimální uspořádání snímků při použití rovinného bodového pole s vlíčovacími body a kamery s neměnnými prvky vnitřní orientace, přičemž Obr. 5a zobrazuje konvergentní uspořádání se dvěma stanovisky fotografování, zatímco Obr. 5b se dvěma o 90° otočenými snímky pořízenými z jedinného stanoviska zajistí stejné perspektivní vztahy. Tato nejjednodušší uspořádání mají však přece jen geometricky slabou konfiguraci a měli bychom se jim v praxi vyvarovat.

Pokud nejsou k dispozici žádné vlíčovací body, roste počet nutných snímků. Na Obr. 5c je znázorněna konfigurace se čtyřmi skloněnými konvergentními snímky, což je v tomto případě minimální uspořádání, zatímco na Obr. 5d je vylepšená konfigurace s osmi snímky, které vedou k příznivějšímu protnutí a vyšší redundanci (vyššímu počtu nadbytečných parametrů) a lepšímu využití obrazového formátu (hodnověrnější určení parametrů zkraslení).

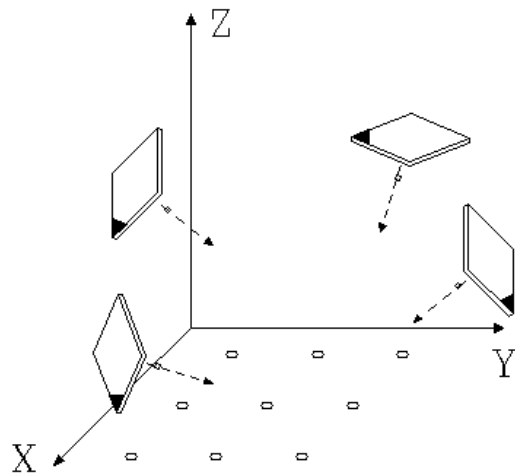
⁴ Spojovací body – body o známých snímkových a neznámých objektových (geodetických) souřadnicích



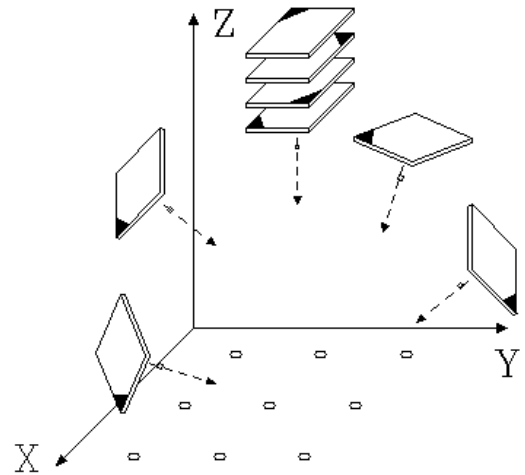
a) Testovací pole s vlíčovacími body - konfigurace se dvěma snímky z různých stanovisek



b) Testovací pole s vlíčovacími body – konfigurace se dvěma snímky z jediného stanoviska otočenými o 90°



c) Testovací pole se spojovacími body - konfigurace se čtyřmi stanovisky kamery



d) Testovací pole se spojovacími body – konfigurace s osmi snímky otočenými o 90°



Spojovací bod

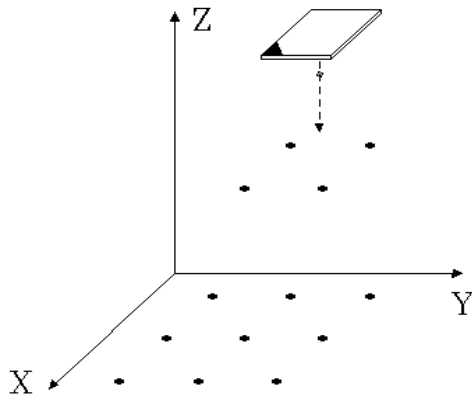


Vlíčovací bod

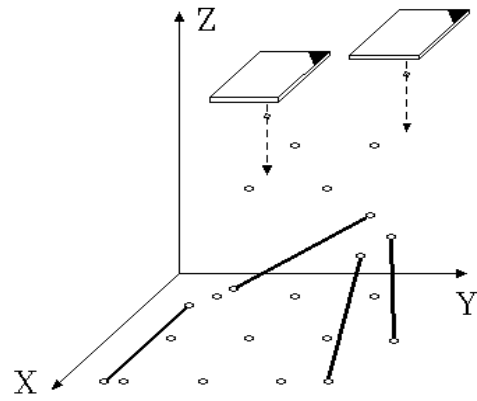
Obr. 5: Konfigurace pro kalibraci pomocí rovinného testovacího pole (Wester-Ebbinghaus 1983,1985)

1.2.2 Kalibrace s použitím prostorového testovacího pole

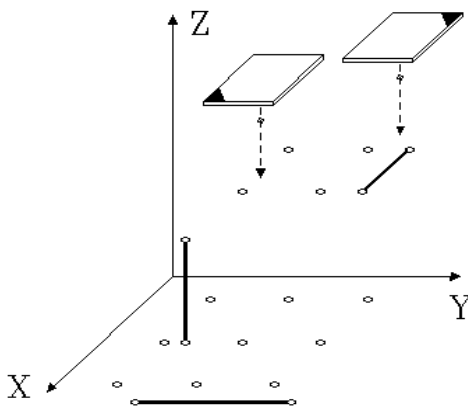
Simultánní kalibrace kamery je spolehlivější, pokud je objekt prostorově členitější. Prostorová testovací pole vycházejí často z rovinné konfigurace a vzniknou pouhým vytažením do prostoru, pokud to umožňuje konkrétní zadání.



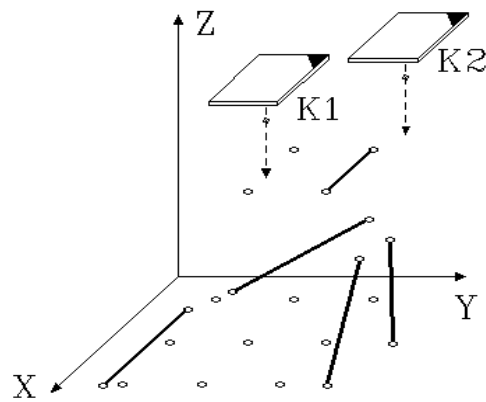
a) Prostorové testovací pole s vřícovacími body – konfigurace s jedním snímkem



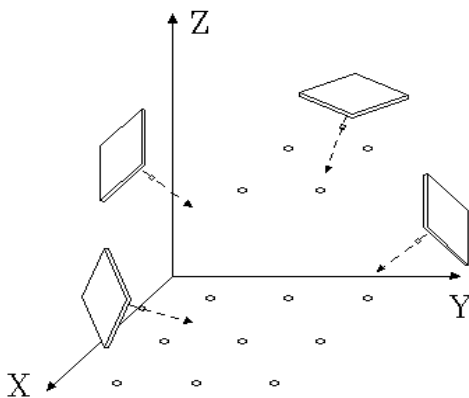
b) Prostorové testovací pole se spojovacími body a 4 známými délkami – konfigurace se dvěma snímky bez vzájemné rotace



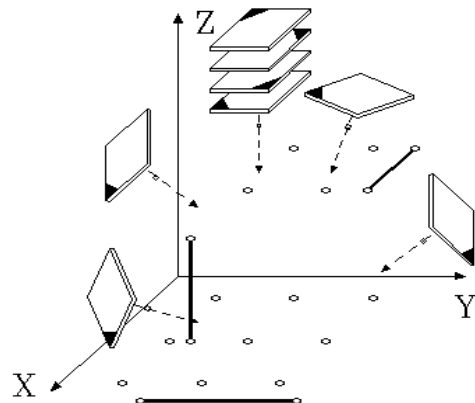
c) Prostorové testovací pole se spojovacími body a 3 známými délkami – konfigurace se dvěma vzájemně natočenými snímky



d) Prostorové testovací pole se spojovacími body a 5 známými délkami – konfigurace se dvěma vzájemně natočenými snímky při použití dvou různých kamer



e) Prostorové testovací pole se spojovacími body bez známých délek – konfigurace s libovolně otočenými snímky



f) Prostorové testovací pole se spojovacími body a 3 známými délkami – konfigurace s 8 vzájemně natočenými snímky

○ Spojovací bod ● Vřícovací bod ————— Známá délka

Obr. 6: Konfigurace pro kalibraci pomocí prostorového testovacího pole (Wester-Ebbinghaus 1983,1985)

Na Obr. 6a je znázorněn případ jednosnímkové kalibrace pomocí známého prostorového testovacího pole. Dle Obr. 6b je zřejmé, že vlíčovací body nejsou nezbytně nutné, pokud jsou v prostoru k dispozici známé délky, jak říká studie v literatuře „Wester-Ebbinghaus 1983,1985“. Počet nutných délek lze redukovat, použijí-li se dva vzájemně pootočené snímky, viz.Obr. 6c. Obr. 6d znázorňuje minimální konfiguraci pro systém dvou různých kamer (kamery mají různé prvky vnitřní orientace), což je případ, který se může vyskytovat např. u dvoukamerového online systému. Vzájemné pootočení snímků ve své rovině není nutné, pokud existují alespoň čtyři šikmé snímky prostorového bodového pole, viz.Obr. 6e. Konečně Obr. 6f znázorňuje nejnákladnější avšak nejspolehlivější konfiguraci snímků v tomto případě s osmi snímky, které jsou vzájemně pootočeny.

1.2.3 Problémy při kalibraci

Praktické problémy při určování prvků vnitřní orientace nastávají především v následujících případech:

- ***Korelace mezi parametry:***

Je-li prováděna simultánní kalibrace a prvky vnitřní orientace počítány současně při výpočtu paprskového vyrovnání svazků, pak dochází zpravidla k nežádoucí korelaci mezi parametry. Stupeň korelace mezi jednotlivými parametry lze určit pomocí kovarianční matice. Vysoké hodnoty korelačních koeficientů svědčí o lineární závislosti mezi parametry a měli by být odstraněny. Korelace nastupuje často mezi následujícími parametry:

Konstanta komory, hlavní snímkový bod a prvky vnější orientace

A_1, A_2 popř. A_3 - parametry radiální distorze

Souřadnice hlavního snímkového bodu x_0' a parametr C_1 popř. y_0' a C_2

Korelace mezi parametry hraje bezvýznamnou roli, pokud se rekonstrukce objektu a kalibrace provádějí současně, jako je tomu např. při paprskovém vyrovnání svazků se simultánní kalibrací. Existují statistické testy, které dokáží odhalit na první pohled nepostřehnutelné závislosti (korelaci) mezi jednotlivými parametry. Pokud jsou jednotlivé korelované prvky vnitřní orientace z výpočtů vynechány, nereprezentují již vybraný matematický model kamery. Kalibruje-li se kamera pevně instalovaného online systému externě v odlišné konfiguraci snímků, může použití těchto dat v cílovém systému vést k chybám modelu.

V zásadě vede kalibrace pomocí prostorového pole k nízké korelaci a spolehlivému určení prvků vnitřní orientace.

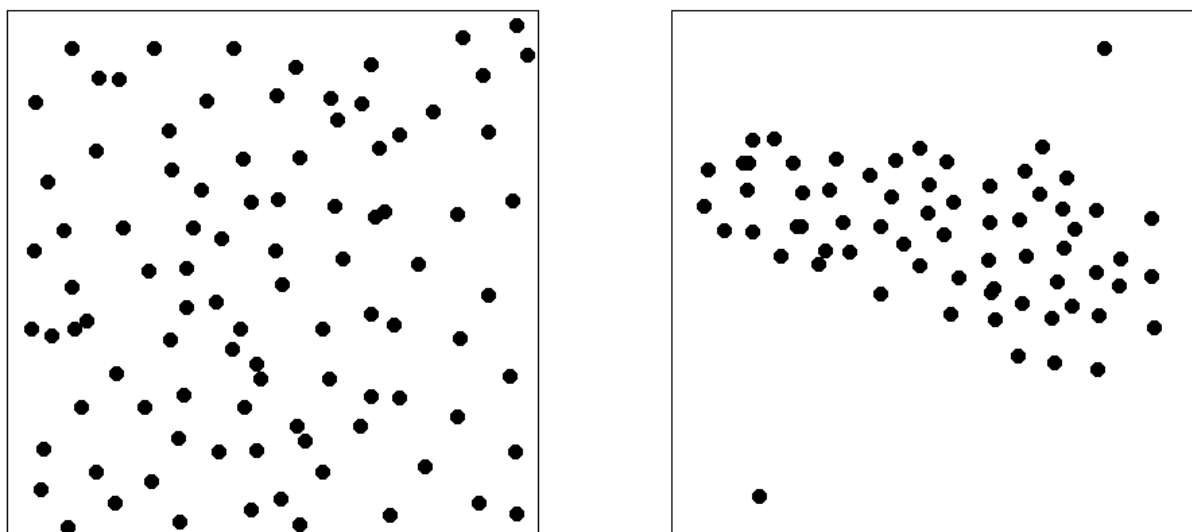
- ***Žádné snímky otočené ve vlastní rovině:***

Snímky otočené ve vlastní rovině (kolem osy záběru) jsou nutné pro správné určení polohy hlavního snímkového bodu a eventuelně parametrů afinity, jestliže na testovacím poli nejsou vhodně

rozmístěné vřícovací body nebo pokud se snímky neprotínají pod vhodným úhlem. Neexistují-li vzájemně otočené snímky, pak je poloha hlavního snímkového bodu silně korelována s polohovými hodnotami prvků vnější orientace.

- ***Nedostatečné pokrytí snímků:***

Série snímků pro kalibraci kamery by měla obsahovat snímky, které jsou pokryty v celé ploše (až do okrajů). Jen tak je možné určit hodnoty zkreslení, které budou pro daný formát dostatečně reprezentativní (viz.Obr. 7).



Obr. 7: Správné (vlevo) a nedostačující (vpravo) rozmístění bodů na snímku

- ***Použití objektivů s velkým zkreslením:***

Pokud je na okrajích snímku velké zkreslení, jako je tomu u širokoúhlých a zvláště širokoúhlých objektivů, je model pro vyjádření distorze často nedostatečný, a pak jsou objektové souřadnice bodů na okrajích snímků určeny s menší přesností. Tento problém se stupňuje, je-li pokrytí bodů na snímku nedostatečné.

- ***Špatná stabilita parametrů kamery***

Určení vnitřní orientace se stává nejistým, pokud se parametry kamery snímek od snímku mění, např.kvůli špatné stabilitě obrazových senzorů v těle kamery. V tomto případě musí být zavedena každá změna do vyrovnání přidáním dalších neznámých parametrů pro každý snímek, čímž se zvyšují nároky na minimální počet snímků. Často ovšem umožňuje konfigurace snímků zavedení jen několika kamer současně.

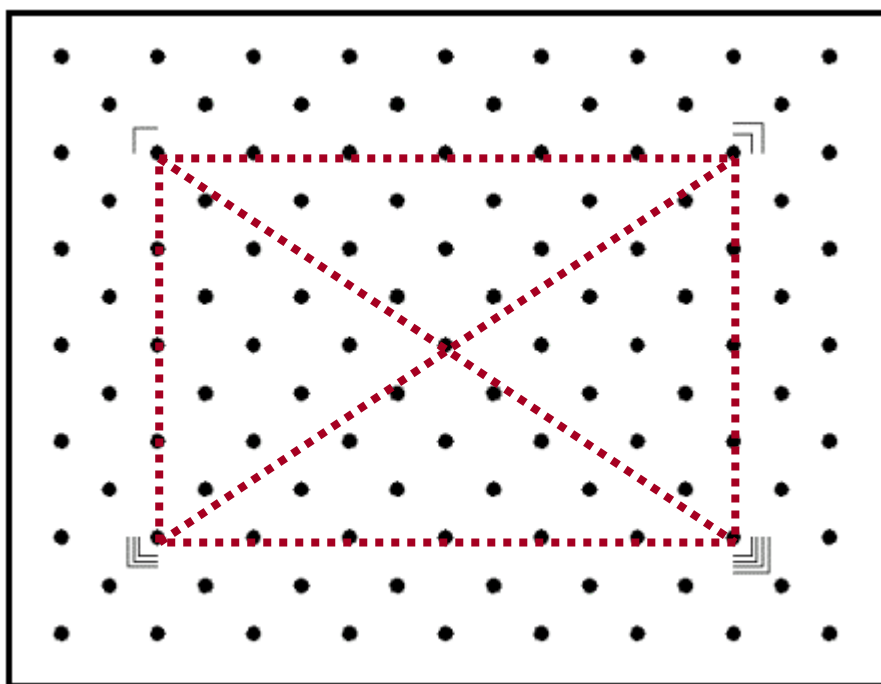
- *Žádné informace ve směru osy záběru*

Pokud nejsou známy žádné parametry ve směru osy záběru, jako je tomu např. v případě rovinného testovacího pole, nemusí být konstanta komory a rozměry snímku určeny jednoznačně. Již jedna známá délka ležící ve směru osy záběru stačí k tomu, aby bylo možné určit konstantu komory (např. při šikmých snímcích rovinného testovacího pole).

1.3 POSTUP KALIBRACE DIGITÁLNÍHO FOTOAPARÁTU POMOCÍ TESTOVACÍHO POLE

1.3.1 Zadání

Proveďte kalibraci digitálního fotoaparátu Olympus Camedia 2500 L pomocí rovinného testovacího pole (viz.Obr. 8). Vzdálenost fotografování zvolte s ohledem na rozměr testovacího pole a úhel záběru tak, aby byla dodržena podmínka vhodného pokrytí snímků.



Obr. 8: Použité testovací pole

1.3.2 Příprava 2D testovacího pole

Testovací pole vytiskněte. Vytisknuté testovací pole připevněte na podlahu tak, aby bylo během snímkování v neměnné poloze.

1.3.3 Změřit vzdálenosti mezi čtyřmi body v okrajích testovacího pole

Proměřte všechny vzdálenosti mezi čtyřmi označenými body na testovacím poli (středě kruhových bodů). Jedna vzdálenost (nejlépe úhlopříčka) bude následně použita pro určení měřítka modelu.

1.3.4 Připravit digitální kameru ke snímkování

Zapněte fotografický přístroj a zkontrolujte stav baterií, neboť během snímkování nesmíte fotoaparát vypnout (riziko změny hodnot prvků vnitřní orientace). Při snímkování nepoužívejte ZOOM, vypněte, je-li to možné, auto focus a nastavte manuální zaostření na danou vzdálenost. Nastavte maximální rozlišení snímků. Zvolte konfiguraci snímkování viz. Obr. 5c nebo Obr. 5d, popřípadě rozšířenou o další čtyři šikmé snímky s důrazem na dostatečné pokrytí snímků a vhodnou konfiguraci pro protnutí. Důležité je snímkovat snímky otočené ve vlastní rovině, tedy okolo osy záběru o 90° (pro fixaci polohy hlavního snímkového bodu).

1.3.5 Vlastní snímkování

1.3.5.1 Problematika určení f a formátu u digitálních fotoaparátů

U digitálních fotoaparátů není znám rozměr snímku jako je tomu u analogových fotoaparátů. Jediná hodnota, která zhruba vypovídá o fyzické metrické velikosti snímku, je velikost senzoru. V technických parametrech je uvedena hodnota např. $2/3''$, což znamená úhlopříčku senzoru. To však nelze považovat za skutečnou úhlopříčku výsledného snímku, neboť počet aktivních pixelů je nižší než absolutní počet pixelů v senzoru. Jedinou možností, jak se dozvědět přesnější informace, je získat podrobnou technickou dokumentaci pro daném fotoaparátu použitý senzor, to však je téměř nemožné. Mnoho prodejců tyto informace neposkytuje a často ani nevědí, jaký typ senzoru je použit v konkrétním přístroji, neboť pro běžné prodejce je to nepotřebná informace. Pro fotogrammetra je však tato informace nutná. Jak se tedy obejít bez ní. Jediným východiskem je zvolit si přibližnou hodnotu velikosti snímku buď v závislosti na deklarovaném ohnisku (např. 7.1mm ekvivalent 28mm u kinofilmu) při znalosti úhlu záběru nebo si zvolit vlastní libovolný rozměr snímku (při zachování poměrů stran dle rozlišení a předpokladu, že pixel je čtvercový). I to je možné, neboť teoreticky je jedno, jaké měřítko je zvoleno pro obrazový prostor, tedy pro prostor uvnitř fotografického přístroje, neboť tato skutečnost neovlivní hodnoty v objektovém prostoru. Výše uvedená problematika bude zohledněna v dalším postupu kalibrace. Pro tuto úlohu bude pevně stanovena ohnisková vzdálenost a k němu následně dopočten rozměr snímku.

1.3.5.2 Určení přibližných prvků vnitřní orientace

Nejprve je zapotřebí určit přibližné hodnoty prvků vnitřní orientace. Především konstanty komory a formátu snímku. Přibližná poloha hlavního snímkového bodu se volí shodná se středem snímku ($x'=y'=0$ mm) a přibližné parametry zkreslení se volí nulové. Pro přibližné určení prvků vnitřní orientace (zde je myšlena především konstanta komory a obrazový formát) existuje několik

možných postupů. Na tomto místě pohovoříme o jednom z nich, který bude použit pro zpracování úlohy kalibrace pomocí testovacího pole v programu Photomodeler.

Nejprve je třeba na kolmou stěnu připevnit list papíru o libovolné velikosti (A4, A3, ...), na němž budou známy alespoň jedna vodorovná a jedna svislá délka (měly by ležet uprostřed snímku). Ideální by bylo použít list papíru o rozměrech stejných, jaké bude mít použité testovací pole. Do vhodné vzdálenosti od stěny umístíme stativ s digitálním fotoaparátem tak, aby osa záběru byla přibližně kolmá ke stěně a list papíru zabíral na snímku co možná největší plochu. Nastavíme parametry fotoaparátu stejné, jaké budou následně použity pro kalibraci. Nejvhodnější je snímkovat list papíru těsně před vlastní kalibrací, aby byly zajištěny stejné podmínky při snímkování jak při určování přibližných hodnot, tak při vlastní kalibraci. Známe-li délku vyznačenou na listu papíru ve skutečnosti a vzdálenost od objektu, pak lze vypočítat úhel záběru. Z něho se pak vypočte konstanta komory při daném rozměru snímku nebo formát při dané konstantě komory.

Po nasnímání listu papíru provedeme snímkování vlastního testovacího pole. Případně lze pro zjištění přibližných hodnot prvků vnitřní orientace použít snímek testovacího pole snímkaný kolmo na testovací pole. Nutné je jen dostatečně přesně znát vzdálenost od testovacího pole.

1.3.6 Převod snímků do počítače

Po nasnímání převedeme snímky testovacího pole do počítače, a to buď pomocí speciálního adaptéru, který umožňuje čtení paměťové karty (SM) v disketové mechanice, nebo pomocí kabelu, který propojí fotoaparát s počítačem. Snímky nakopírujeme do předem připraveného adresáře.

1.3.7 Postup kalibrace v programu Photomodeler

Program Photomodeler je software vyvinutý kanadskou firmou EOS Systems Inc. Software umožňuje vyrovnat skupinu konvergentních snímků (pracuje na principu paprskového vyrovnání svazků) a následně vytvořit rovinný či prostorový model objektů na snímcích zachycených. Rovněž lze provést kalibraci předdefinovaného rovinného testovacího pole ve speciálním modulu Calibrator, který je dodáván společně s programem Photomodeler. V rámci cvičení bude používán pouze program Photomodeler samotný, a to i pro kalibraci, aby bylo možné provádět automatickou identifikaci středu bodu testovacího pole na jednotlivých snímcích. Pole vytvořené pro potřeby cvičení je odlišné od standardního testovacího pole dodávaného spolu s vlastním programem, proto nelze použít pro kalibraci program Calibrator.

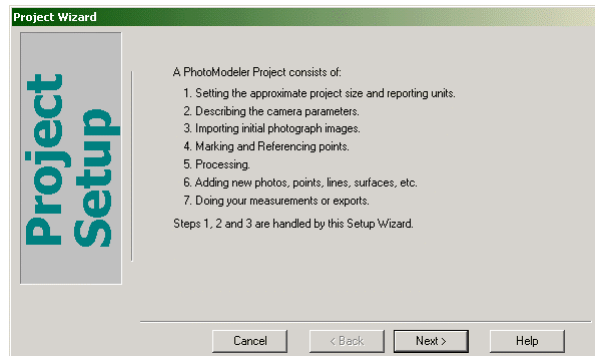
Vlastní postup v programu Photomodeler (popsáno pro verzi 4g):

1.3.7.1 Založit nový projekt

Spustit program Photomodeler a v roletovém menu *File* vybrat volbu *New File*. Otevře se *Project Wizard*.

1.3.7.2 Nastavit přibližný rozměr projektu a definovat jednotky

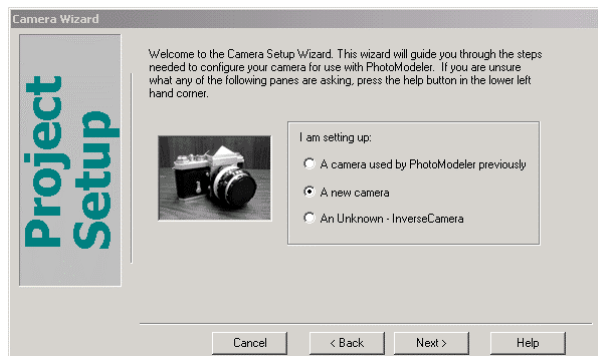
V *Project Wizard* nastavit jednotky a přibližný rozměr měřeného objektu.



Obr. 9: Project Wizard

1.3.7.3 Zadání přibližných parametrů kamery

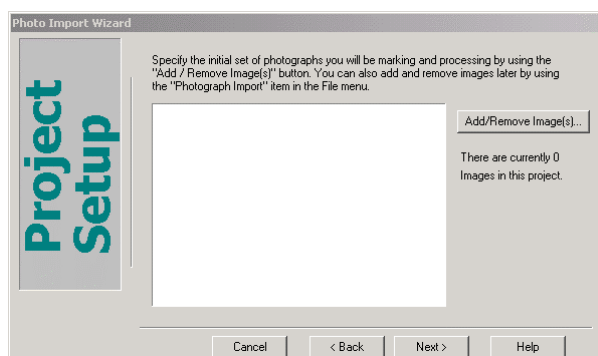
Dalším krokem je zadání přibližných parametrů použitého fotografického přístroje v *Project Wizard* (typ fotoaparátu, rozlišení pořizovaných snímků a přibližné prvky vnitřní orientace).



Obr. 10: Camera Wizard

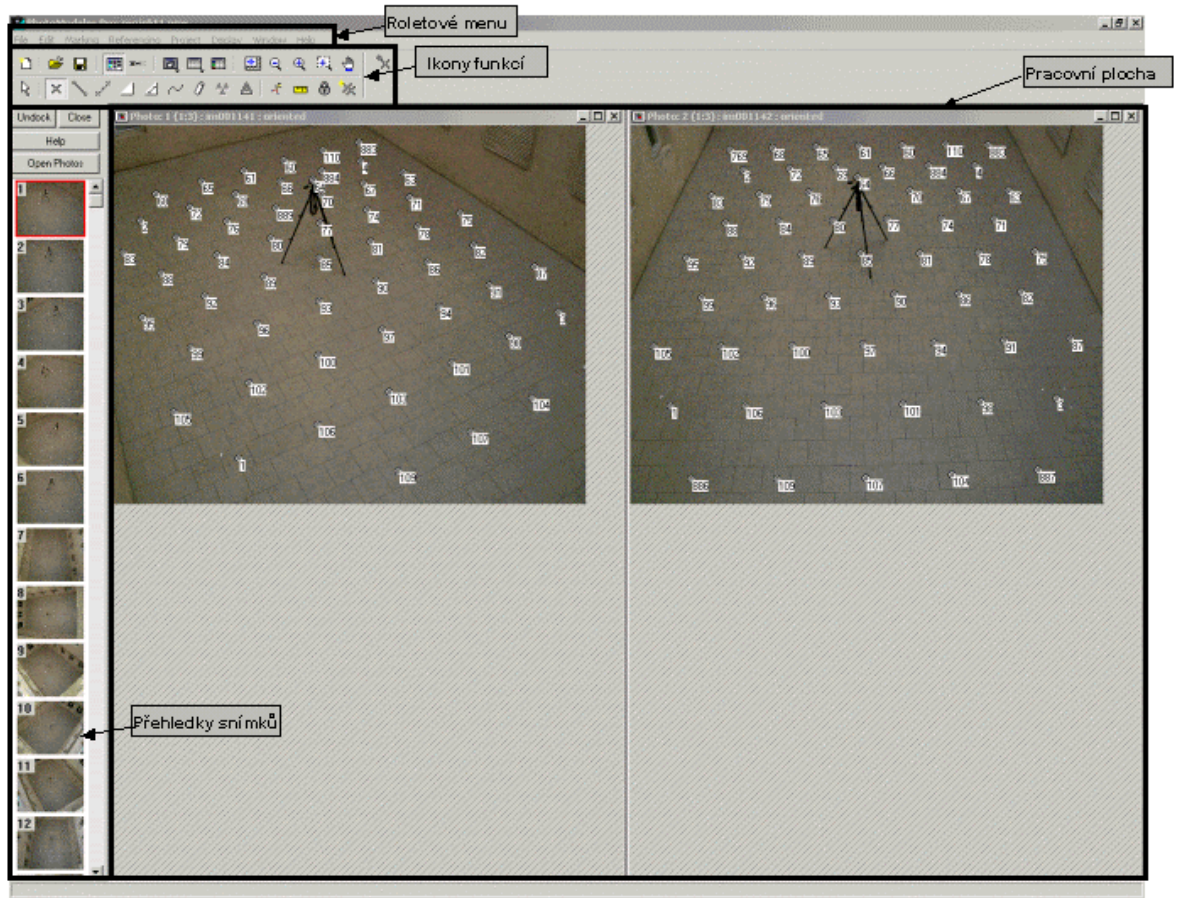
1.3.7.4 Načtení snímků a vytvoření přehledů

Ve okně *Photo Import Wizard* se definují snímky, které budou použity pro zpracování v programu Photomodeler, stisknutím tlačítka *Add/Remove Image(s)*. Je třeba vylistovat správný adresář, označit, převést požadované snímky do projektu a zadat cestu ke snímkům. Založení nového projektu se na závěr potvrdí stisknutím tlačítka *Finished*.



Obr. 11: Photo Import Wizard

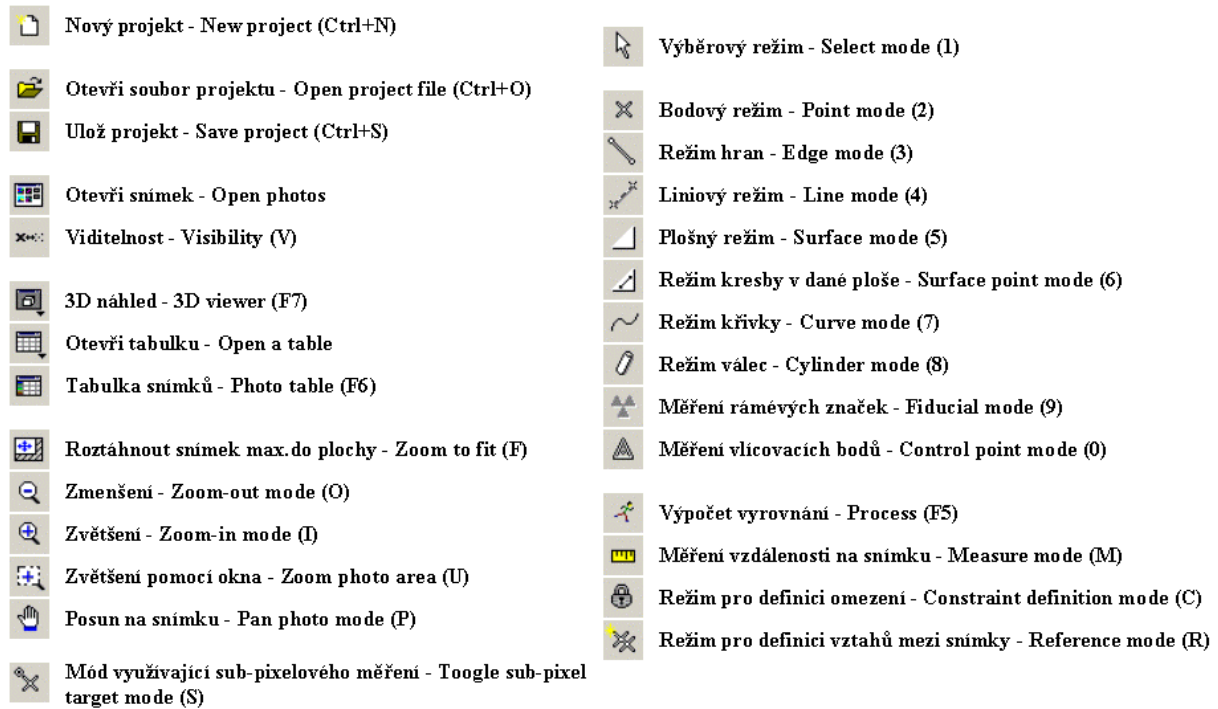
1.3.7.5 Prostředí programu Photomodeler



Obr. 12: Prostředí programu Photomodeler verze 4g

Prostředí programu lze rozdělit v podstatě na:

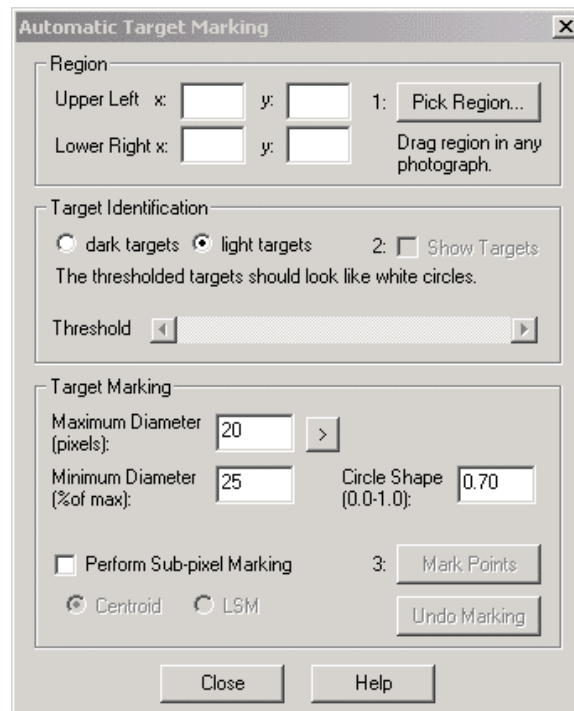
- Roletové menu – *File, Edit, Marking, Referencing, Project, Display, Windows, Help*
- Nástrojovou lištu (viz.Obr. 13) – obsahuje ikony funkcí pro práci se souborem, pro ovládání obrazu (Zoom, Pan), pro práci s tabulkami, pro měření na snímcích atd.
- Přehledky snímků – kliknutím na tlačítko *Open photos* nebo dvojkliknutím na přehledku snímku se otevře snímek v pracovní ploše
- Pracovní plochu – zde se zobrazují okna jednotlivých snímků případně pomocné tabulky pro ovládání a nastavení programu.



Obr. 13: Popis ikon v panelu nástrojů

1.3.7.6 Měření bodů testovacího pole na snímcích – funkce *Automatic Target Marking* (každý snímek samostatně)

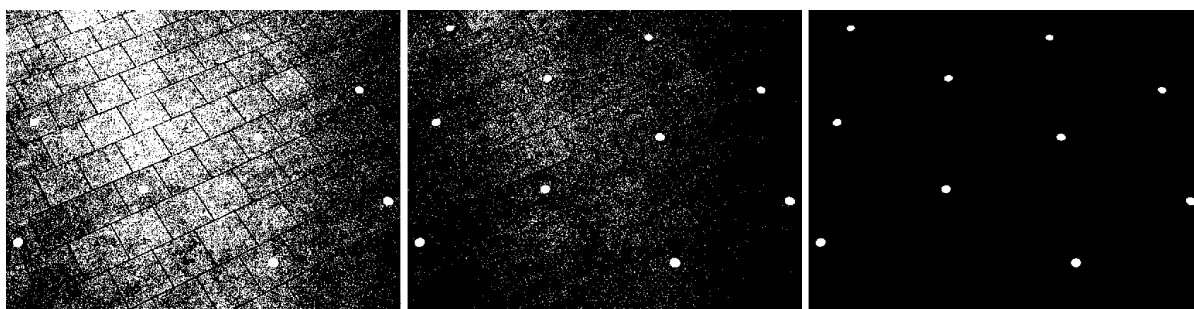
Dvojkliknutím na přehledku snímku v levé části okna programu Photomodeler se otevře snímek. Spojovací a vřícovací body lze měřit buď manuálně případně s využitím sub-pixelového režimu nebo automaticky pomocí výše uvedené funkce *Automatic Target Marking* (viz.Obr. 14.)

Obr. 14: Komunikační okno funkce *Automatic target marking*

Automaticky lze měřit pouze body, které jsou vůči pozadí dostatečně kontrastní a jejichž tvar je konvexní (určuje se těžiště) nikoli křížky, proto testovací pole vytvořené pro kalibraci obsahuje černé kruhové body na bílém pozadí.

Funkce *Automatic Target Marking* funguje následovně:

- Označí se oblast na snímku, v níž budou body vyhledávány (*Pick Region*).
- Dále se označí v části nazvané *Target Identification*, zda se jedná o tmavý bod na světlém podkladě či naopak. Následně se zaškrtně políčko *Show Target*. Snímek se zobrazí v režimu black and white a program ukáže, kde na snímku našel kontrastní plochy. Pomocí hodnot *Threshold* (práh) lze upravit poměr bílé a černé plochy, aby snímek vystihoval co nejlépe body testovacího pole (viz.Obr. 15).



Obr. 15: Tři různá nastavení funkce *Threshold* – prahování na snímku

- V části *Target marking* se definuje maximální a minimální průměr bodu, obrys a metoda pro sub-pixelové měření, jež může být použita pro přesnější vyhledávání bodů. Metoda *Centroid* je rychlejší ale méně přesná než metoda *LSM* (Least-Squares Matching - MNC).
- Na závěr se spustí tlačítkem *Mark Points* automatické vyhledávání bodů na snímku a funkce se ukončí stisknutím tlačítka *Close*.

1.3.7.7 Referencování odpovídajících si bodů na snímcích

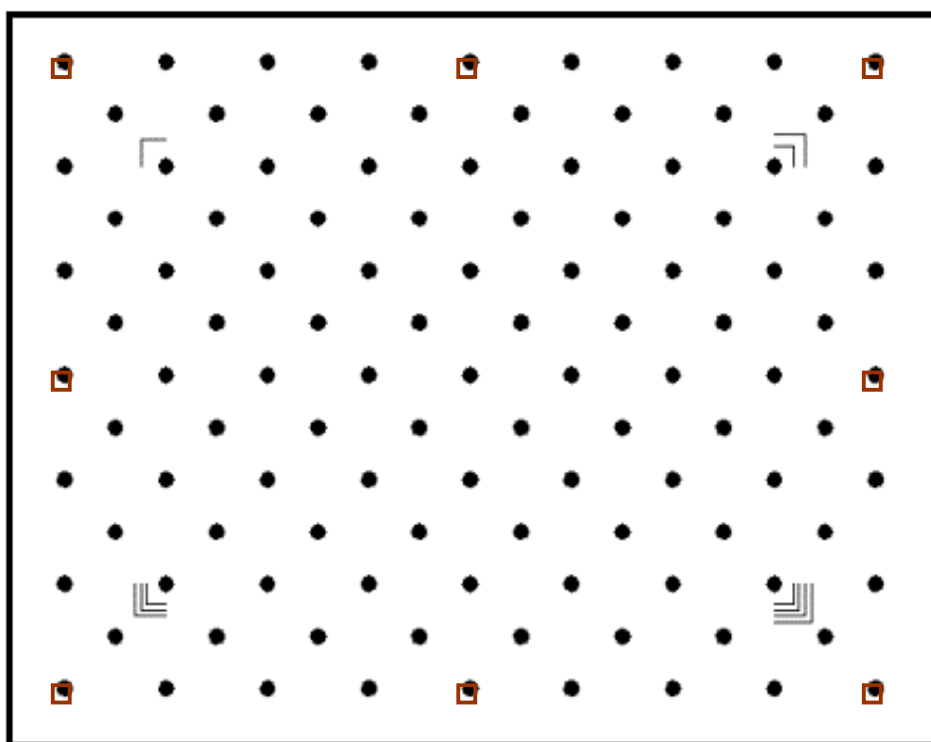
Měří-li se body na snímku automaticky pomocí výše uvedeného postupu funkcí *Automatic Target Marking* nebo zcela manuálně, případně manuálně s použitím sub-pixelového módu, je při měření na dalším snímku číslování bodů kontinuální, tedy tentýž bod na dvou snímcích má různé číslo. Proto musí následovat tzv.referencování, tzn.určení vzájemného vztahu odpovídajících si bodů na různých snímcích. Vzájemný vztah je dán nějakým společným identifikátorem. Tímto identifikátorem je číslo bodu. Referencování bodů má ve výsledku po výpočtu vyrovnání za následek rovněž určení vzájemného vztahu mezi jednotlivými snímky. Pro určení vzájemného vztahu těchto bodů na různých snímcích slouží funkce *Reference mode* nebo *Automatic Referencing*. Pro použití funkce *Automatic Referencing* je nutno mít snímky předem zorientované. Proto musí být v této fázi použita funkce *Reference mode* (viz.Obr. 12 poslední ikona v druhém řádku).

Pro referencování je třeba mít v pracovní ploše otevřené dva snímky, jeden vzorový, z něhož bude vždy vybrán konkrétní bod pro referencování a druhý snímek, na němž budou identifikovány body odpovídající bodům z prvního snímku, které převzou číslo bodu z prvního snímku.

V podstatě se jedná o označení odpovídajících si bodů na různých snímcích. Podrobný popis funkce viz. manuál programu Photomodeler.

Doporučení pro urychlení referencování:

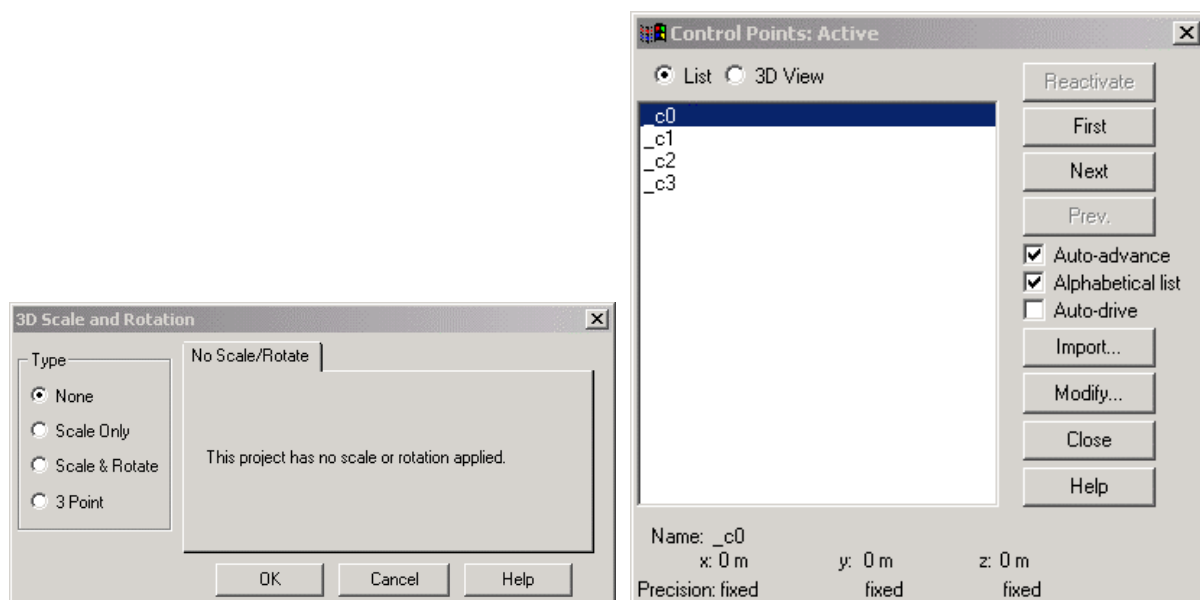
- Na všech snímcích změřit pomocí funkce *Automatic Target Marking* veškeré body.
- Vybrat si jeden snímek jako vzorový, vůči němuž budou body na ostatních snímcích referencovány.
- Pak přistoupit k referencování. Referencovat na každém snímku jen cca 8 bodů po obvodě testovacího pole (viz. Obr. 16).
- Tyto body následně manuálně referencovat k bodům na vzorovém snímku.
- Provést výpočet – *Process*. Tím jsou všechny snímky zorientovány.
- Po té je třeba referencovat ostatní body na snímcích. Výhodou tohoto postupu je to, že při referencování dalších bodů na snímcích kurzor již sám skočí na přibližnou polohu referencovaného bodu a stačí jen správnou polohu potvrdit levým tlačítkem myši. Referencování se tak výrazně urychlí.



Obr. 16: Návrh rozmístění osmi bodů pro referencování

1.3.7.8 Definice skutečné polohy a rozměru objektu v prostoru

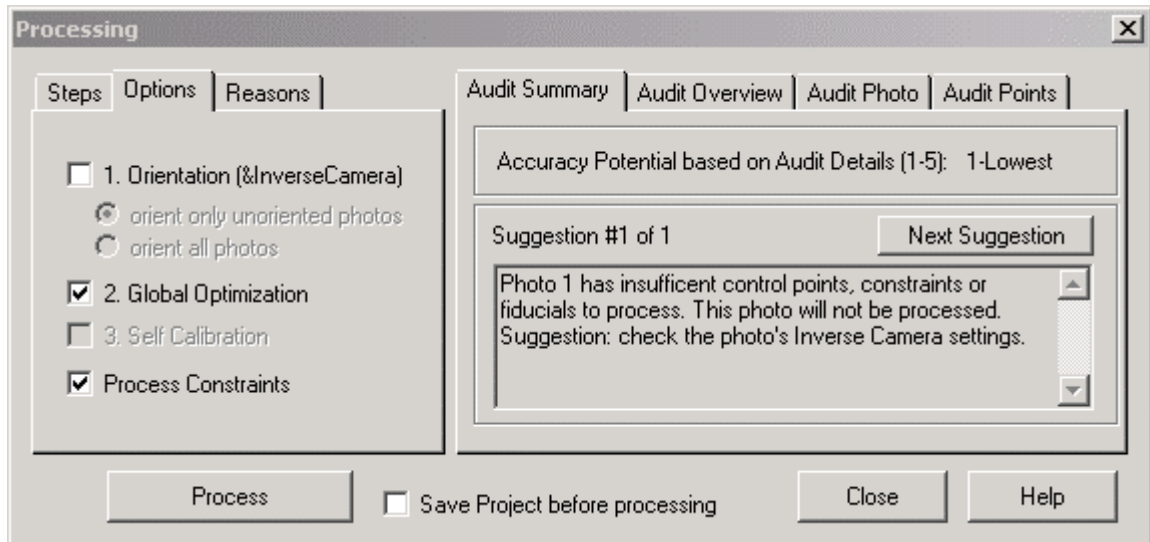
Dalším krokem, ještě před výpočtem vyrovnání svazku snímků, je definice skutečné polohy a rozměru objektu zobrazeného na snímcích v prostoru. Doposud jsme pracovali na snímcích bez znalosti prostorových vztahů ve skutečnosti, tedy jen relativně. Pro určení absolutního rozměru zaměřeného objektu v prostoru, je třeba znát minimálně jednu vzdálenost v objektovém prostoru. Stačí tedy definovat pouze jednu vzdálenost mezi dvěma body. Program Photodeler umožňuje pracovat i bez absolutní orientace jen v modelovém prostoru (využitelné v případě, kdy není nutné znát absolutní rozměr). Další možností je definice jedné vzdálenosti a dvou rotací, což umožní, aby např. vodorovná plocha byla skutečně vodorovná. Třetí možností v pořadí je definice souřadnic třech vlíčovacích bodů. V tomto případě je jednoznačně určena rovněž orientace objektu v prostoru. Výše uvedené možnosti lze zadat pomocí funkce v roletovém menu *Project – Scale/Rotate* (viz. Obr. 17). Další možností je měření vlíčovacích bodů pomocí funkce *Mark Control Points* (viz. Obr. 17). Zde lze manuálně zadat souřadnice vlíčovacích bodů nebo provést import souřadnic z textového souboru, který musí být v následujícím tvaru: na jednom řádku - číslo bodu a souřadnice bodu v pořadí X,Y, Z.



Obr. 17: Definice skutečného rozměru – měřítko, popř. rotace a souřadnice vlíčovacích bodů

1.3.7.9 Výpočet vyrovnání I.

Pokud je dokončeno referencování a známy absolutní vztahy, je možné přistoupit k výpočtu vyrovnání skupiny snímků. K tomu slouží v programu Photodeler funkce *Project - Process* reprezentovaná ikonou s běžcem, popř. horkou klávesou *F5*. V levé části dialogového okna (viz. Obr. 18) je možné nastavit, zda budou orientovány všechny snímky nebo pouze snímky, které nejsou dosud orientované, případně je-li dostatek nadbytečných veličin, lze provést i výpočet kalibrace. To je však vhodné provádět až po orientaci všech snímků a kontrole hrubých chyb. V pravé části jsou informace o kvalitě protnutí snímků, o počtu zorientovaných snímků, o počtu bodů na snímcích... V dolní části okna lze před vlastním výpočtem uložit projekt, to pro případ, že by během výpočtu nastaly nějaké problémy.

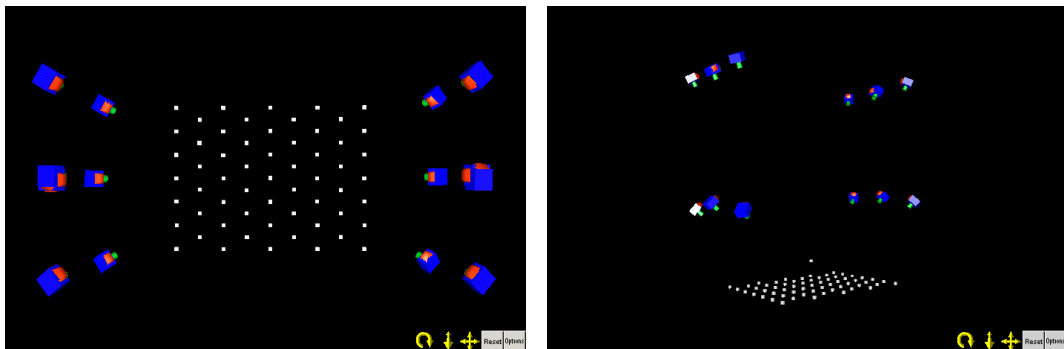


Obr. 18: Dialogové okno pro výpočet vyrovnání snímků

1.3.7.10 Kontrola správnosti dat – odhalení hrubých chyb

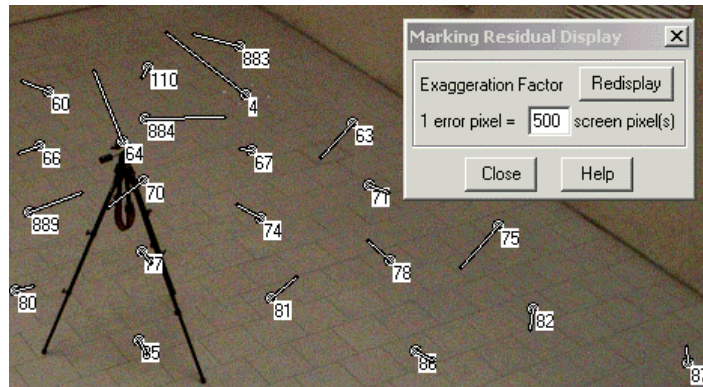
Po výpočtu vyrovnání je vhodné provést kontrolu kvality. K tomu lze využít několik nástrojů programu Photomodeler:

- **3D Viewer** – pro náhled na prostorový model bodů objektu a polohu stanovišek fotografování



Obr. 19: 3D Viewer – pohled shora a šikmý pohled na rovinné testovací pole

- **Marking Residual Display** – v roletovém menu *Marking*, slouží pro vizualizaci chyby v poloze mezi měřeným a vypočteným bodem na snímku



Obr. 20: Zobrazení chyb v poměru 1 chybový pixel = 500 bodů na obrazovce

- **Visibility** – tato funkce má dvě záložky (Marked, Projected), jedna zobrazuje měřenou polohu daného bodu a druhá vypočteného.



Obr. 21: Ukázka identifikace chyby pomocí funkce Visibility – bod 64

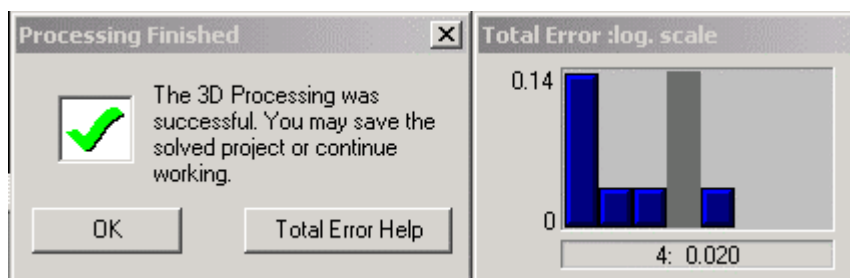
- **Point Table** – pomocí ikony *Open a Table* lze vylistovat tabulku bodů, která obsahuje informace o všech bodech v projektu. Velmi užitečné pro odhalení hrubých chyb jsou informace ve sloupcích s názvem *Largest Residual* a *Image Largest Residual*, kde lze nalézt body s největší chybou a snímek, na němž je daný bod změřen nejhůře. Kliknutím na název sloupce lze informace v daném sloupci seřadit vzestupně či sestupně, což zprehlední vyhledávání chyb.

Id	RMS Residual (pixels)	Largest Residual (pixels)	Photo Largest Residual
64	1.923227	7.057284	1
90	0.254939	0.851816	5
4	0.207460	0.590302	3
93	0.154558	0.479519	4
884	0.090138	0.211379	1
3	0.087114	0.208223	2

Obr. 22: Ukázka odhalení chyby pomocí tabulky bodů – bod 64

1.3.7.11 Výpočet vyrovnání II.

Po odhalení hrubých chyb lze provést vlastní kalibraci. Je vhodné nejprve ještě jednou provést vyrovnání všech snímků najednou. O kvalitě výpočtu svědčí rovněž hodnota *Total Error* (čím nižší, tím lépe). Ideální hodnota parametru *Total Error* je pro výše popisovanou úlohu v setinách.

Obr. 23: Závěr výpočtu vyrovnání – *Total Error*: 0.020, počet iterací: 4

Pro další informace o kvalitě výpočtu slouží *Post processing report*, který se ukládá do textového souboru s příponou RPT pouze, je-li v roletovém menu *File* v položce *Preferences* v záložce *Process* zaškrtnuto *Write the post processing deviation and correlation report*. Ve stejné záložce lze nastavit parametry pro výpočet jako je počet iterací, které parametry mají být vypočteny při kalibraci, jaký druh kalibrace provést, zda *full field Calibration* (bude vypočte jedna kamera pro všechny snímky) nebo *Self-Calibration* (každý snímek jiná kamera)...

Pro úlohu kalibrace je třeba nastavit "*calibration in one camera projects is a full field calibration*" a dále zaškrtnout výpočet hlavního snímkového bodu, distorzí a buď konstantu komory nebo rozměr snímku. Pro účely cvičení bude zaškrtnut rozměr snímku. Z toho vyplývá, že kalibrace bude vycházet z pevně zadané konstanty komory (hodnota uvedená na objektivu) a v závislosti na dané konstantě budou vypočteny ostatní prvky vnitřní orientace. Po nastavení v záložce *Preferences* lze přistoupit k vlastní kalibraci. Spustí se výpočet (např.F5), zaškrtně se řádek *Full Field Calibration* a spustí výpočet.

1.3.7.12 Uložení hodnot výpočtu - *Export Point Table, Photo Table a Text file a sejmout 3D View*

Po výpočtu kalibrace bude proveden export tabulky bodů a tabulky snímků pro možnost dalšího zpracování informací mimo program Photomodeler. Export je prováděn do textových souborů z jednotlivých tabulek stisknutím tlačítka *Export*. Pro přehlednost je vhodné uložit 3D View jako obrázek a vložit jej do technické zprávy.

1.3.8 Technická zpráva

Závěrem celého procesu kalibrace bude technická zpráva, která bude obsahovat následující náležitosti:

- Název, zpracovatel, datum
- Zadání
- Pomůcky
- Postup kalibrace – stručně
- Vstupní hodnoty pro výpočet – hodnoty prvků vnitřní orientace - viz.*Project - Information - Cameras* (před výpočtem kalibrace)
- Výsledky kalibrace – hodnoty prvků vnitřní orientace a přesnost (viz.*Project - Information - Cameras* (po výpočtu kalibrace) a *Post Processing Report*), 3D View (izometrický pohled na testovací pole)
- Závěr a zhodnocení
- Předávané dokumenty – to co je výsledkem (CD, tisky, zpráva...) – v této úloze budou předány: výtisk technické zprávy, do určeného adresáře na počítači LFGM uložit projekt s výsledky kalibrace (technická zpráva *.doc, snímky, přehledky snímků, projekt - *.pmr, exportované tabulky – pointtable.txt, phototable.txt, post processing report *.rpt a jako obrázek sejmuté 3D View).
- Podpis vyhotovitele

1.4 SOUHRNNÝ PŘEHLED DÍLČÍCH KROKŮ PRACOVNÍHO POSTUPU V ÚLOZE KALIBRACE

	Příprava 2D testovacího pole	
	Změření vzdálenosti mezi body testovacího pole	
	Příprava digitální kamery ke snímkování	
	Snímkování – pro určení přibližných prvků vnitřní orientace	
	Snímkování testovacího pole	
	Převod snímků do počítače	
	Založení nového projektu - New project (Ctrl+N)	
	Nastavení přibližného rozměru projektu a definice jednotek	
	Zadání přibližných parametrů kamery	
	Načtení snímků do projektu	
	Měření bodů testovacího pole na snímcích	
	Referencování odpovídajících si bodů na snímcích	
	Definice skutečné polohy a rozměru objektu v prostoru	
	Výpočet vyrovnání I. – bez výpočtu kalibrace	
	Kontrola správnosti dat – odhalení hrubých chyb	
	Výpočet vyrovnání II. – s kalibrací	
	Uložení projektu, export tabulek a náhledů	
↓	Technická zpráva	↓

Obr. 24: Pracovní postup

1.5 DOPLŇUJÍCÍ LITERATURA

1.	Manuál programu Photomodeler	
2.	Luhmann, T. (2000): <i>Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen, Methoden und Anwendungen</i> . Wichmann Verlag, Heidelberg, ISBN 3-87907-321-X.	
	• 1. Kalibrace digitálních fotoaparátů 1	
1.1	Přehled kalibračních technik	1
1.1.1	Pojem kalibrace	1
1.1.2	Kalibrační metody	1
1.1.2.1	Laboratorní kalibrace	2
1.1.2.2	Kalibrace pomocí testovacího pole	2
1.1.2.3	Kalibrace na olovnicové závěsy	4
1.1.2.4	Simultánní kalibrace	4
1.2	Konfigurace snímků	6
1.2.1	Kalibrace s použitím rovinného testovacího pole	6
1.2.2	Kalibrace s použitím prostorového testovacího pole	7
1.2.3	Problémy při kalibraci	9
1.3	Postup kalibrace digitálního fotoaparátu pomocí testovacího pole	11
1.3.1	Zadání	11
1.3.2	Příprava 2D testovacího pole	11
1.3.3	Změřit vzdálenosti mezi čtyřmi body v okrajích testovacího pole	12
1.3.4	Připravit digitální kameru ke snímkování	12
1.3.5	Vlastní snímkování	12
1.3.5.1	Problematika určení f a formátu u digitálních fotoaparátů	12
1.3.5.2	Určení přibližných prvků vnitřní orientace	12
1.3.6	Převod snímků do počítače	13
1.3.7	Postup kalibrace v programu Photomodeler	13
1.3.7.1	Založit nový projekt	13
1.3.7.2	Nastavit přibližný rozměr projektu a definovat jednotky	13
1.3.7.3	Zadat přibližné parametry kamery	14
1.3.7.4	Načtení snímků a vytvoření přehledek	14
1.3.7.5	Prostředí programu Photomodeler	15
1.3.7.6	Měření bodů testovacího pole na snímcích – funkce <i>Automatic Target Marking</i> (každý snímek samostatně)	16
1.3.7.7	Referencování odpovídajících si bodů na snímcích	17
1.3.7.8	Definice skutečné polohy a rozměru objektu v prostoru	19
1.3.7.9	Výpočet vyrovnání I.	19
1.3.7.10	Kontrola správnosti dat – odhalení hrubých chyb	20
1.3.7.11	Výpočet vyrovnání II.	22
1.3.7.12	Uložení hodnot výpočtu - <i>Export Point Table, Photo Table a Text file a sejmout 3D View</i>	23
1.3.8	Technická zpráva	23
1.4	Souhrnný přehled dílčích kroků pracovního postupu v úloze kalibrace	24
1.5	Doplňující literatura	25

Abstract: Article is focused on test field camera calibration process for digital cameras. First overview of calibration technology is described. Secondly rules of images configuration is mentioned. Next technology of calibration in programm Photomodeler is described in detail step by step the same way how it is used in lectures of Photogrammetry at CTU in Prague. This article shouldn't be detailed manual, there are shown main principles with particular examples and it should be used by students as guide for calibration process.