

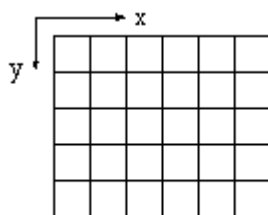
9. Digitální fotogrammetrie

Automatizace vyhodnocovacího procesu ve fotogrammetrii probíhá již od 50. let 20. století, kdy byly používány první elektronické korelátoři. Velkým skokem však bylo vytvoření digitálního obrazu a možnost jeho zpracování. Digitálního obrazu bylo nejprve využíváno při zpracování družicových snímků v dálkovém průzkumu Země. Za mezník je možné označit rok 1972, kdy byla vypuštěna družice ERTS-1 (později LANDSAT 1). S postupným zlepšováním kvality digitálního obrazu a s rozvojem metod jeho analýzy se od konce 80. let 20. století formuje digitální fotogrammetrie (**softcopy photogrammetry**). Její výhody jsou především tyto:

- Snadný a rychlý přenos dat
- Dokonalé kopírování snímků
- Nové možnosti geometrické a radiometrické transformace
- Možnosti odstranění šumu a předzpracování snímků
- Značný podíl automatizace, automatická detekce jevů

Použití digitálního obrazu ve fotogrammetrii však přináší i problémy:

- Omezená prostorová rozlišovací schopnost digitálního obrazu
- Velký objem dat
- Nákladné HW a SW vybavení



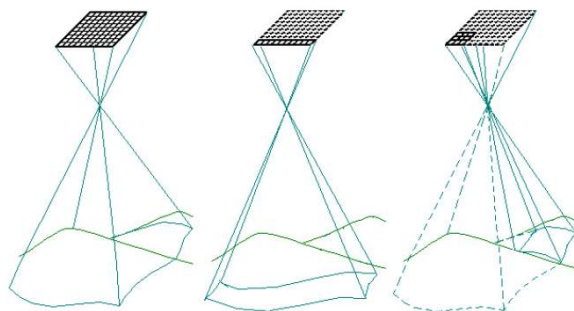
Obr. 9.1 Digitální obraz

Digitální obraz je obrazová informace převedená do číslicové podoby. Digitální obraz může jako digitální přímo vznikat – digitální kamera (CCD senzory) – **primární** digitální obraz a nebo může být vytvořen digitalizací fotografie – **sekundární** digitální obraz. Letecký snímek v analogové podobě lze z hlediska **geometrické** rozlišovací schopnosti považovat za informaci spojitou. Naproti tomu pro obraz prezentovaný v digitální podobě je nutné zvolit jistý obrazový prvek, který je dále nedělitelný. Z těchto obrazových elementů (pixelů) uspořádaných do matice o určitém počtu řádků a sloupců se skládá celý obraz. Každý obrazový prvek nese obrazovou informaci. Obrazová informace je zakódovaná radiometrická charakteristika – v případě leteckého snímku odrazivost povrchu. Obrazová informace má ve většině případů podobu 8-bitového čísla (tzv. DN hodnoty). DN hodnota je nejčastěji vizualizována v podobě odstínu šedi. Hloubka obrazu – tedy počet úrovní, do kterých je tento škálován – se označuje jako tzv. **radiometrické** rozlišení obrazu. DN hodnoty šedotónového (černobílého) digitálního obrazu s radiometrickým rozlišením 8-mi bitů nabývají hodnot v intervalu 0-255. Barevný obraz vzniká aditivním skládáním tří obrazů šedotónových. Má tedy hloubku obrazu 24 bitů a představuje třikrát větší objem dat.

Primární digitální obraz

Čidlo snímacího zařízení registruje přímo radiometrické veličiny u určité plošky jednoho obrazového prvku a zapisuje je. Jako čidel se využívá CCD prvky – mikroelektronické křemíkové čipy, převádějící elektromagnetické záření na paměťový signál. CCD bývají uspořádány ve formě **řádky**, kdy snímacím zařízením je tzv. skenující radiometr, používaný nejčastěji při družicovém snímání. Při leteckém snímání se využívá digitálních komor s CCD uspořádanými do **matice**. Primární digitální obraz vzniklý na řádce či matici křemíkových čipů se značně liší svými geometrickými vlastnostmi. Pro fotogrammetrii a pro

podrobné mapování ve velkých měřítcích se využívá především maticového uspořádání čipů.



Obr. 9.2 Primární digitální obraz vytvářený elektro-optickým skenerem s řádkou CCD a digitální komorou s maticí CCD

Vytváření klasické fotografie a snímání digitální kamerou či skenerem se liší také ve způsobech získávání stereoskopické dvojice. U digitální maticové kamery se k vytvoření stereodvojice využívá podélného překryvu, v případě skeneru se stereopár vytváří jedním z těchto uvedených způsobů:

- Náklon skeneru vpřed a vzad ve směru dráhy letu
- Náklon skeneru do boku, kolmo k dráze letu (SPOT)
- Využití překrytu území ze snímků ze dvou sousedních drah (málo vhodný způsob v důsledku špatného základového poměru)

Odlíšný způsob tvorby stereoskopické dvojice je u aktivních zařízení (RADARu). Je založen na vytváření obrazových záznamů ze dvou družic pracujících v tzv. tandemu (ERS) či z jedné družice s dvěma snímači oddělenými snímkovou základnou (SRTM).

Digitální kamery

Nejdříve se využívaly především v pozemní fotogrammetrii pro snímkování nehybných předmětů. V současnosti mají stále větší využití i při leteckém snímkování. Rozlišení matic CCD je srovnatelné s rozlišením kvalitních filmů – 150 čar/mm – tj. 7 mikrometrů. Velikost CCD dosahuje 10 až 3 mikrometry. Doposud většímu rozšíření CCD matic ve fotogrammetrii bránila vedle technických omezení také cena – srovnatelného výsledku bylo možné dosáhnout skenováním klasické fotografie. Je problém vyrobit rozsáhlou matici čidel a také je sestavit a urovnat s dostatečnou přesností a také zajistit jejich současné odečtení. Například na udržení formátu 23 x 23 cm je zapotřebí urovnat 500 milionů čidel.



Obr. 9.3 Digital Mapping Camera (Z/I Imaging)

Z/I Imaging – Intergraph a Zeiss – DMC – **Digital Mapping Camera** – příklad digitální komory s maticí CCD. Stavebnicová skladba, synchronně pracující proměnlivý počet

řadových kamer – panchromatické i multispektrální snímky. Tři paralelní kamery vytvářejí barevné syntézy. Po jejich stranách jsou dvě a dvě kamery pro tvorbu bezešvé mozaiky panchromatického záběru se stejným pokrytím jako multispektrální kamery. Díky skládání mozaiky je rozlišení dvakrát lepší jak u komory s jednou maticí detektorů.

LH Systems –digitální komora **ADS 40** – je založena na řádkovém principu – obsahuje tři řádkové skenery, které vytvářejí panchromatecké snímky ve třech konfiguracích a dále 4 snímky v multispektrálním režimu. 12 000 CCD v řádce poskytuje při zachování rozměru snímku 23 x 23 cm obraz s rozlišením 20 mikrometrů.



Obr. 9.4 Digitální komora ADS 40 (LH Systems)

Maticové kamery nejsou ovlivněny efektem smazu, ten působí u digitálních kamer řádkových. Jejich další výhodou je pořizování snímků s větším radiometrickým rozlišením (10-12 bitů) oproti 6-8 bitů skenerů řádkových. Z hlediska fotogrammetrie tak mají dvě přednosti:

- jsou vhodnější pro potlačení atmosférických vlivů
- jsou vhodnější pro aplikace algoritmů obrazové korelace (na snímcích s větší hloubkou obrazu je méně homogenních ploch, ve kterých obrazová korelace selhává).

Nevýhodou většiny současných maticových komor je, že při zachování dostatečné prostorové rozlišovací schopnosti poskytují snímky menšího formátu, z daleko menšího území – problémy mozaikování.

Přesnost určení polohy bodů na digitálním snímku se pohybuje v řádu 0,3 pixelu. Ke snadnému identifikování objektu je nutné, aby tento nebyl menší než 3x3 pixely.

Sekundární digitální obraz a digitalizace fotografie

V současné době ale stále převažuje skenování LMS pořízených klasickou fotografickou komorou – sekundární digitální obraz. Je to opět matice čísel – pixelů – diskretizace informace do čtverců určité velikosti. Běžně je 1 pixel roven 1 byte, tedy celková velikost obrazového souboru:

$$M = P \times L \times e \text{ [Mb]}$$

P – počet sloupců

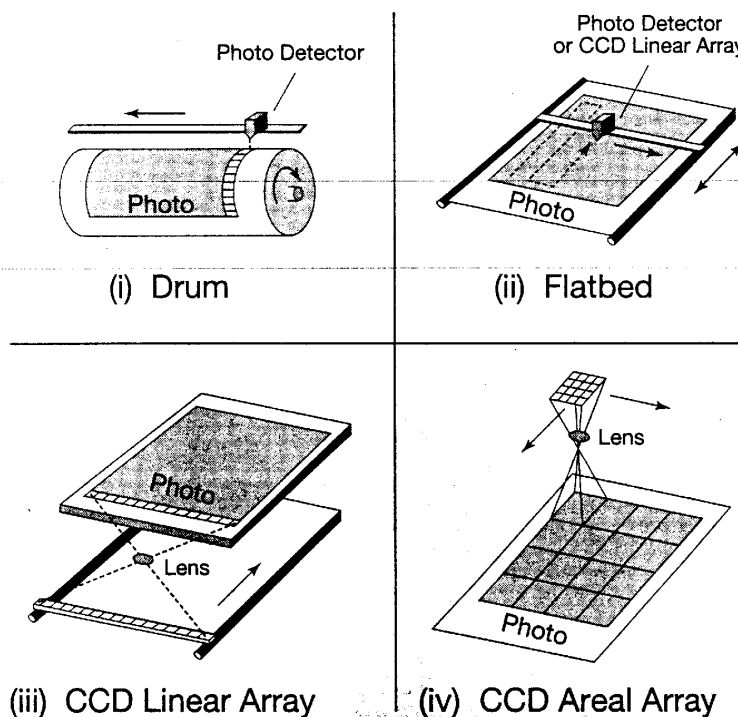
L – počet řádků

e – počet pásem

Vlastní skenování probíhá na speciálních skenerech. Celková přesnost skeneru se posuzuje z hlediska přesnosti **geometrické** a přesnosti **radiometrické**. Pro vlastní výsledek je důležitá také hustota skenování související s velikostí (rozměrem) pixelu. Hustota skenování se udává v DPI, ve fotogrammetrii častěji v mikrometrech. Zvyšování hustoty výrazně zvyšuje celkovou velikost souboru viz. tab. 9.1

Hustota skenování [DPI]	100	200	600	800	1000	2000	8500
Rozměr pixelu [μm]	254	127	42	32	25	13	3
Velikost souboru [MB]	0,82	3,2	30	51,8	84,6	324	5900

Při rozměru LMS 23 x 23 cm a hustotě skenování 200 DPI dostaneme matici 11 000 x 11 000 pixel, při 256 odstínech šedi je výsledný soubor 115 MB veliký, skenovaná barevná fotografie pak 345 MB.



Obr. 9.5. Základní typy skenerů: (i) válcový, stolový (ii), CCD linear array (řádkový) (iii), CCD areal array (maticový) (iv)

Při skenování barevné LMF je nutná separace na jednotlivé barevné složky (RGB) a výsledný soubor je potom 3 krát větší. Skenování probíhá nejčastěji z transparentních materiálů (diapozitiv, negativ) – méně podléhají změnám rozměrů jak papírový pozitiv. Vysoké rozlišení skeneru nesmí být dosahováno pouze softwarově (převzorkování - resampling). Skenery pro profesionální použití jsou velmi drahé (Carl Zeiss, Intergraph, Vexcel, Helava-Leica). Poměrně dobrých výsledků lze dosáhnout i při skenování běžnými skenery, jsou-li dobře kalibrovány

Fotografie musí být skenována tak, aby se ve výsledku objevily všechny rámové značky. Barevná digitální fotografie je skenována rozkladem (separací) na RGB – 3 průchodové (méně výhodné a méně přesné) i jednopřechodové. Běžné kvalitní skenery dosahují rozlišení 800-1600 DPI, vyššího rozlišení ale dosahují programově – prostým dělením či interpolací.

Profesionální skenery vynikají geometrickou přesností – možno skenovat od 1000-2000 DPI až 8500 DPI. Cena se pohybuje řádově v milionech, vyžaduje řídicí pracovní stanici – mnoho firem si skenování nechává provést. Na druhou stranu profesionální skener provádí řadu předzpracování a může také obsahovat SW pro aerotriangulaci či používat ho jako přesného stereokomparátoru. Přesnost řádově jednotky mikrometrů, lze ji zvýšit tzv. subpixelovou interpolací. Nejprve se provádí tzv. prescan – rychlé sejmutí celé předlohy z důvodů nastavení výřezu a posouzení kvality. Poté se nastaví parametry a vlastní skenování může trvat 5 až 30 minut. Soubor lze ukládat do zvoleného grafického formátu. Skener PhotoScan TD od Z/I Imaging umožňuje skenovat s rozlišením od 7 mikrometrů



Obr. 9.6 PhotoScan TD (Z/I Imaging)

Při skenování je nutné uvažovat jak stupeň digitalizace (hustotu), tak i přesnost skeneru. Je nutné vycházet z rozlišovací schopnosti fotografického materiálu. Skenování s příliš malou velikostí pixelu může mít za následek zkreslení dat vlivem šumu, při vytváření velkého pixelu se naopak ztrácí informace. Hustota skenování by se měla řídit účelem a použitím výsledků zpracování. Existuje totiž nelineární vztah mezi rozlišením fotografie vyjádřeným v lpr/mm a informačním obsahem. Zvyšování či snižování rozlišovací schopnosti faktorem 2 neznamená redukci či zvýšení možností interpretace stejným faktorem – spíše druhou odmocninou ze 2.

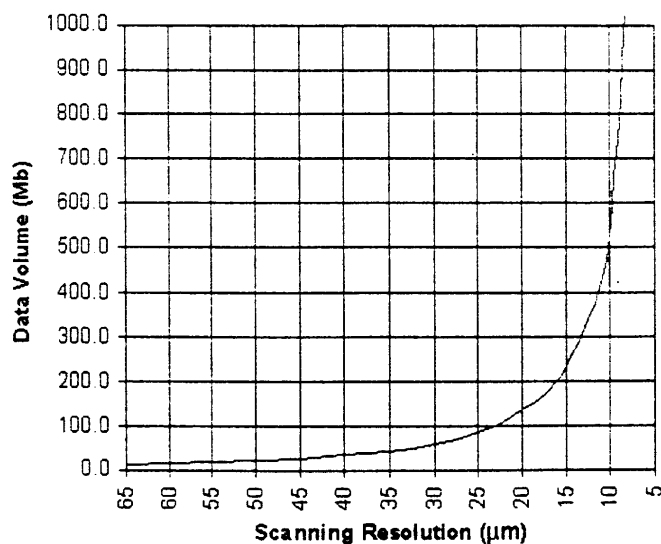
Pavelka (1998) uvádí, že snímek by měl být skenován podle následujícího vztahu:

$$DPI = \frac{2,54 \cdot k \cdot m_s}{\Delta x}$$

kde Δx je minimální přípustná chyba

m_s je měřítko snímku

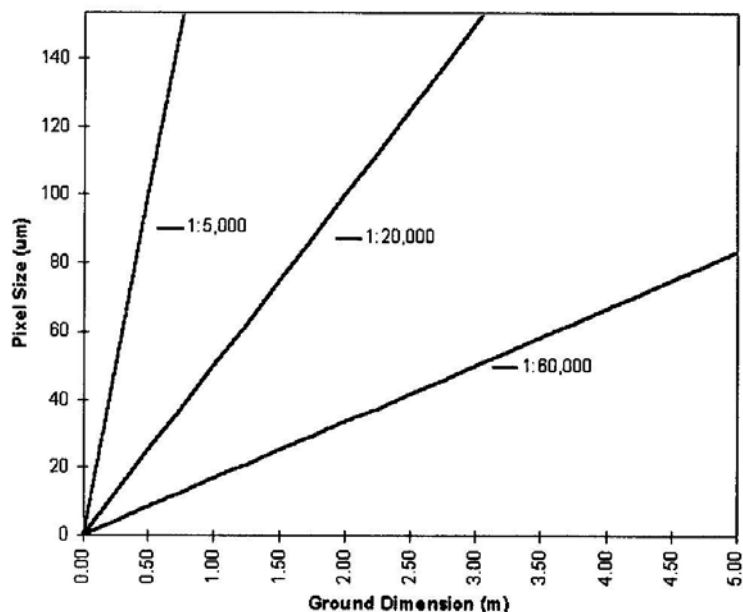
k je násobná konstanta (2-3) podle možností detekce vlčcovacích bodů.



Obr. 9.7. Vztah mezi hustotou skenování a velikostí souboru

Z obrázku 9.7 je zřejmé, že velikost výsledného souboru značně narůstá při hustotě skenování pod 25 mikrometrů. Letecké snímkování probíhá za značně rozdílných měřítek – ve výškách od 300 m do 20 km, Měřítko se při standardní ohniskové vzdálenosti $f = 150$ mm může měnit od 1 : 2000 do 1 : 135 000. Typické hodnoty skenování se pohybují od 250 mikrometrů (100 DPI) do 10 mikrometrů (2500 DPI). Velmi důležitým je vztah mezi hustotou

skenování v DPI či v mikrometrech a rozměrem pixelu na zemském povrchu. Pro měřítka 1 : 5 000, 1 : 20 000 a 1 : 60 000 je tento vztah prezentován na obr. 9.8.



Obr. 9. 8 Vztah mezi hustotou skenování a velikostí pixelu (na zemském povrchu v metrech) pro různá měřítka letecké fotografie

Speciální skenery (LEICA Geosystem a Z/I Imaging) – rozlišení, geometrická přesnost (cca ± 2 mikrometry), skenovaná plocha pro 23 x 23 snímky. Umožňují skenování jednotlivých snímků i filmových pásek až 150 m. Optické rozlišení skenerů je 7 mikrometrů, které lze digitálně agregovat do 14, 21, ..224 mikrometrů. ČB snímky mohou být skenovány s hloubkou 12 bitů, RGB jako 24 bitové,

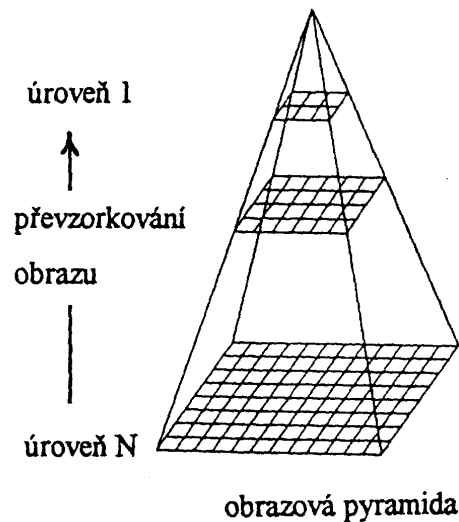
Rychlost skenování jednoho snímku se v závislosti na optické hustotě může pohybovat řádově v jednotkách minut. Specializované skenery mohou automaticky upravovat radiometrické vlastnosti snímků – např. úbytek světla k okrajům snímku, měřit rámové značky, upravovat jas a kontrast apod. Důležitým požadavkem je bezprašnost prostředí.

Formáty digitálního LMS, komprese dat

Standardem digitálních obrazových souborů stal formát TIFF. Jeho nevýhodou je, že existuje ve větším množství variant. Postupně se stále více prosazují kompresní formáty a algoritmy:

- LZW – komprese používaná v běžném formátu TIFF
- JPEG – algoritmus DCT - Fourierovy transformace – funkce jako složenina konečného počtu kosinových funkcí o různé amplitudě a frekvenci.
- JPEG2000 – možno využívat jako ztrátový i bezztrátový, dekomprese části obrazu podle různého měřítka, různě nastavitelný stupeň komprese pro různé části obrazu.
- ECW
- MrSID

Obrazové pyramidy



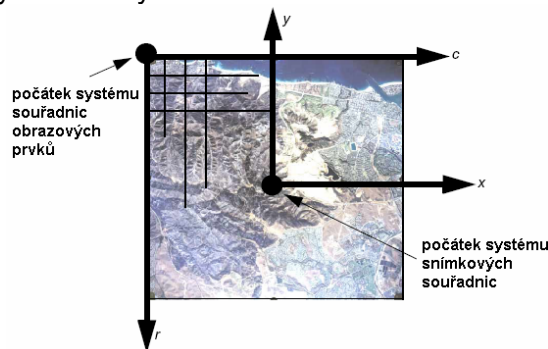
Obr. 9.9 Princip obrazové pyramidy

K lepší manipulaci s velkými objemy digitálních leteckých snímků slouží vedle kompresních algoritmů také tzv. obrazové pyramidy (obr. 9.9). Jedná se o převzorkování obrazu na několik úrovní menšího rozlišení, které jsou používány v přehledovém režimu (Overview). Použití obrazových pyramid dnes řeší i některé moderní kompresní algoritmy (JPEG2000). Obrázek je možné prezentovat v několika úrovních rozlišení. Nižší úrovně poskytují více detailu (více pixelů), vyšší úrovně naopak prezentují celou plochu snímku v přehledovém režimu. Jednotlivé úrovně obrazových pyramid se tvoří např. postupným shlazováním nízkopásmovými filtry či výběrem každého n -tého pixelu do dané úrovně. Metody vytváření obrazových pyramid se liší především v algoritmech převzorkování obrazu. Nejčastěji se používá metod založených na aplikaci Gaussova či binomického filtru.

Souřadnicové systémy a digitální snímek

Souřadnicový systém obrazových prvků (pixel c.s.) – jsou to souřadnice souboru se snímkem. Počátek je běžně definován v horním levém rohu, osa x je kladná doprava, osa y kladná dolů. Jednotkou je pixel. Poloha je dána řádkem a sloupcem.

Souřadnicový systém snímku (Image c.s.) – 2D systém souřadnic se středem ve středu snímku. Střed snímku je průsečík rámových značek. Někdy se ztotožňuje s hlavním bodem. Jednotkami jsou milimetry či mikrony.



Obr. 9.10 Souřadnicový systém obrazových prvků a snímkový souřadnicový systém

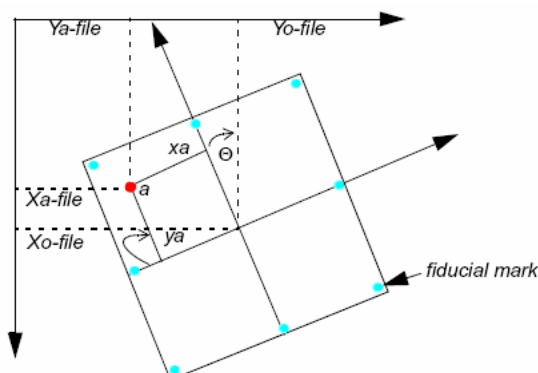
Prostorový souřadnicový systém snímku (Image space c.s.) – je shodný s předchozím systémem, pouze přidává osu z . Jeho počátkem je střed optické soustavy – perspektive

center (značí se L či O). Osy x a y jsou paralelní osám předchozího systému, osa z je osa optická. Hodnota z souřadnice v tomto systému je $-f$. Souřadnice tohoto systému popisují pozici uvnitř kamery a jednotkami jsou milimetry či mikrony.

Vztah mezi souborovými a snímkovými souřadnicemi digitálního snímku

Vnitřní orientace digitálního snímku

Pro vnitřní orientaci digitálního snímku musíme znát souřadnice rámových značek. Tyto můžeme odečíst v souřadném systému obrazových prvků (řádek, sloupec). Z něho je však musíme transformovat do prostorového systému snímkových souřadnic. Tato transformace se provádí tzv. **afinní transformací**.



Obr. 9.11 Afinní transformace

Určení prostorových snímkových souřadnic hlavního bodu ze souřadnic souborových spočívá v 2D afinní transformaci:

$$x = a_1 + a_2 X + a_3 Y$$

$$y = b_1 + b_2 X + b_3 Y$$

Snímkové souřadnice x , y získané ze souřadnic rámových značek kalibračního protokolu a souřadnice souborové X , Y (měřené jako řádek, sloupec) jsou použity k určení šesti koeficientů afinní transformace. Pomocí výše uvedených rovnic je potom možné určit polohu každé dvojice řádek, sloupec ve snímkových souřadnicích. Přesnost 2D afinní transformace se určuje pomocí RMS chyby. Ta určuje stupeň shody mezi souřadnicemi kalibrovaných a vypočtených rámových značek. Chyba může mimo jiné souviset s deformacemi filmu, nepřesnostmi při skenování, již neplatné kalibraci (zastaralé) apod.

Afinní transformace také dále definuje translaci mezi počátkem pixelového souřadného systému (x_{a-file}, y_{a-file}) a počátkem snímkového souřadného systému (x_{o-file}, y_{o-file}) . Afinní transformace řeší i rotaci snímkového souřadného systému o úhel Θ (theta), případný rozsah neortogonalit mezi osami x a y a také rozdílná měřítka ve směru x a y .