

Ověřená technologie georeferencování glóbů

Jan Havrlant,
Klára Ambrožová, Milan Talich, Ondřej Böhm

Realizováno z programového projektu DF11P01OVV021:
Program aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity
financovaného MK ČR v rámci projektu

„Kartografické zdroje jako kulturní dědictví. Výzkum nových metodik
a technologií digitalizace, zpřístupnění a využití starých map, plánů, atlasů
a glóbů.“

Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i.
červenec 2015

Obsah

1	Předmět ověřené technologie	3
2	Struktura ověřené technologie.....	4
3	Pořízení digitálních dat.....	5
3.1.	Kalibrace fotoaparátu	5
3.2.	Příprava na snímkování	6
3.3.	Získávání digitálních dat s pomocí digitalizačního zařízení.....	7
4	Sběr vlíčovacích bodů	9
4.1.	Získávání a kontrola vlíčovacích bodů pomocí korelace	9
4.2.	Rozmístění vlíčovacích bodů.....	11
5	Tvorba digitálního modelu	12
5.1.	Výpočet prvků vnější orientace	12
5.2.	Komplexní vyrovnání	15
6	Vizualizace	18
6.1.	Převod snímků do ekvidistantního válcového zobrazení	18
6.2.	Úprava obrazu glóbu	19
6.3.	Zpřístupnění glóbu.....	20
7	Ověření technologie vytvořením digitálního modelu glóbu	21
8	Závěr	24
9	Seznam použitých zdrojů	25

1 Předmět ověřené technologie

Tato technologie se zabývá postupem tvorby georeferencovaného digitálního obrazu starých glóbů, ve vysoké kvalitě, vhodné pro detailní studium. Cílem je vytvořit takový přesně georeferencovaný digitální model, který bude věrně kopírovat originál, to znamená, aby byl stejně čitelný jako originál nebo i lépe, a to díky prohlížení v počítači s možností přiblížení. Přesná georeference pak umožní porovnávání digitalizovaného starého glóbu se současným stavem nebo s jinými starými glóby. Lze tak nejen pohodlně sledovat postupné poznávání naší Země či nebeské oblohy u hvězdných glóbů, ale i hodnotit přesnost práce starých kartografů. Stejně tak umožní přesná georeference využít digitalizovaný starý glóbus jako každou jinou georeferencovanou mapu, například jej poskytovat formou webové mapové služby (WMS) pro využití v jakémkoliv GIS.

Protože vytváření takto kvalitního modelu je velice pracné oproti digitalizaci starých map nebo atlasů, je v současnosti jen pár projektů pokoušejících se vytvářet digitální modely glóbů. Navíc jejich výsledky mohou sloužit maximálně pro náhled daného glóbu, ale kvality digitální kopie, na které jsou čitelné všechny texty, většinou nedosahují.

Tato technologie vychází z Metodiky georeferencování glóbů [11].

2 Struktura ověřené technologie

Technologie je rozdělena do několika hlavních oblastí, kterými jsou:

- pořízení digitálních dat: uvedení podmínek nutných k získání kvalitních digitálních dat s použitím digitalizačního zařízení,
- sběr vlíčovacích bodů: popis sběru vlíčovacích bodů, množství bodů, konfigurace,
- zpracování vlíčovacích bodů: kontrola vlíčovacích bodů pomocí korelace, získávání nových vlíčovacích bodů pomocí korelace,
- složení digitálního modelu ze zdrojových snímků s pomocí komplexního vyrovnaní,
- finální úprava rastrového obrazu,
- vizualizace: popis zpracování georeferencovaných digitálních dat vedoucí k vytvoření virtuálního modelu glóbu,
- zpřístupnění: představení možnosti online zpřístupnění virtuálních glóbů odborné i laické veřejnosti.

3 Pořízení digitálních dat

V této kapitole bude ve stručnosti shrnuto získávání digitálních dat pro účely georeferencování glóbů. Aby bylo možné vytvořit kvalitní digitální model glóbu, je jednou z nejdůležitějších podmínek získat kvalitní zdrojové snímky daného glóbu. Pokud takové snímky nemáme, odrazí se to zákonitě i na výsledném digitálním modelu.

Pro snímkování glóbu je vhodné použít kvalitní fotoaparát např. digitální zrcadlovku s vysokým rozlišením snímků. Před vlastním použitím digitálního fotoaparátu neboli komory je potřeba znát základní parametry označované jako prvky vnitřní orientace, které nám podávají informaci o vlastnostech použitého fotoaparátu a jsou také potřeba pro další výpočty. Jelikož se v případě digitální zrcadlovky jedná o tzv. neměřickou komoru, u které tyto parametry neznáme, je potřeba je nejdříve určit. Pro určení prvků vnitřní orientace nebo ověření stávajících parametrů slouží technika nazvaná geometrická kalibrace.

3.1. Kalibrace fotoaparátu

Základními prvky vnitřní orientace jsou:

- Konstanta komory = Vzdálenost hlavního snímkového bodu od středu promítání (středu výstupní pupily) v obrazovém prostoru.
- Poloha hlavního snímkového bodu = Průsečík roviny snímku s paprskem procházejícím středem promítání v obrazovém prostoru (středem výstupní pupily) a kolmým na rovinu snímku.
- Průběh distorze (zkreslení) objektivu = Souhrn zbytkových vad objektivu projevující se posunem obrazu bodu od jeho správné polohy v rovině snímku. Distorze je obecně dvojího typu, a to tangenciální a radiální. Radiální distorzí se označuje posun bodu na snímku o radiální vzdálenost. Tangenciální distorze je dána nepřesnou centrací čoček objektivu, jejíž vliv je u dnešních kvalitních objektivů zanedbatelný, proto se tato složka distorze v dalších výpočtech neuvažuje.

Kalibrační postupy, které lze v případě neměřických komor použít jsou následující:

- kalibrace pomocí testovacího pole
- kalibrace na olovnicové závěsy
- simultánní kalibrace

Nejvhodnějším a také nejpoužívanějším postupem je kalibrace pomocí testovacího pole. Při této kalibraci dochází k snímkování testovacího pole s vyznačenými body z několika stanovisek, tak aby pole pokrývalo dostatečnou plochu na snímcích a aby výsledné snímky byly konvergentní. Body vyznačené na testovacím poli jsou buď body, jejichž souřadnice byly měřeny v objektovém prostoru a jejichž souřadnice jsou tedy známy, nebo jsou známy vzdálenosti mezi několika body testovacího pole. Optimální konfigurací snímků v případě této kalibrace je osm snímků, z toho čtyři s osou záběru kolmou na testovací pole a vzájemně pootočené ve vlastní rovině o 90° a dále čtyři snímky šikmé rovněž pootočené o 90°. Během snímkování je potřeba dodržet základní pravidlo, kterým je nevypínat a nepřestřovat fotoaparát.

Vybrané prvky vnitřní orientace se následně vypočtou současně s vyrovnanými souřadnicemi testovacího pole a prvky vnější orientace metodou protínání paprskových svazků z měřených snímkových a známých objektových souřadnic. Důležité je také znát v předmětovém prostoru

alespoň jednu informaci o měřítku ve směru osy záběru, aby bylo možné určit konstantu komory.

Pokud používáme u fotoaparátu objektiv s proměnlivou ohniskovou vzdáleností (zoom), je potřeba určit konstantu komory před začátkem snímkování globu a nastavení objektivu už dále neměnit.

3.2. Příprava na snímkování

Pro potřeby snímkování je potřeba zajistit temnou místnost nejlépe bez oken, čímž se vyloučí nežádoucí venkovní osvětlení snímaného objektu. Pokud tuto místnost není možné zajistit lze použít zatemňovací stan, který vytváří zatemněný prostor o rozměrech alespoň 3x3 m. Pro nasvícení objektu je vhodné použít profesionální fotografické studiové osvětlení se studeným světlem a difuzní mřížkou. Osvětlení umístíme do vhodné vzdálenosti od snímaného objektu. Všechny tyto faktory mají totiž vliv na výslednou kvalitu snímků a rovnoměrné osvětlení je velmi důležité pro docílení barevného souladu jednotlivých snímků. Díky tomuto barevnému souladu je ve výsledku možné vytvořit model, na kterém budou jen minimálně patrná místa styků jednotlivých snímků. Pokud se tato podmínka nepodaří splnit, je potřeba použít barevné vyrovnaní snímku, aby na výsledném digitálním glóbu nebyly vidět rušivé barevné přechody, viz obrázek 1. Důležitá je opravdu pečlivá kontrola, protože tato chyba nemusí být na první pohled patrná.

Dalším velkým problémem je, že většina starých glóbů má lesklý povrch, takže při nesprávném nasvícení mohou být na snímku nežádoucí odlesky. Důležité je, aby se odlesky nevyskytovaly ve středové oblasti snímku, která je použita pro výsledný digitální model. Pro sběr vlíčovacích bodů, v překrývajících se oblastech, odlesky až tolik nevadí.



Obr. 1: Příklad modelu globu s chybným nastavením osvětlení

Před vlastním snímkováním je dále potřeba ručně nastavit parametry fotoaparátu, jelikož snímkování je prováděno v plně manuálním režimu fotoaparátu. Pro správné nastavení fotoaparátu a osvětlení je pořízeno několik zkušebních snímků. Podle nich je následně nastavena hodnota clonového čísla a rychlost uzávěrky, aby byla dosažena co nejvyšší hloubka ostrosti. ISO je nastaveno na co nejnížší hodnotu, kvůli redukci šumu a potřeba je

také správné nastavení vyvážení bílé. Snímkování probíhá s vypnutým bleskem a kvalita snímků je nastavena na nejvyšší hodnotu.

Při snímkování je nutné zajistit neměnnou pozici glóbu, současně však musí být glóbu umožněno rotovat kolem svých os. Stejně tak pozice fotoaparátu vůči glóbu musí být zafixována. Splnění těchto podmínek umožňuje speciální digitalizační zařízení.

3.3. Získávání digitálních dat s pomocí digitalizačního zařízení

Pro potřeby digitalizace glóbů je vhodné použít speciální digitalizační zařízení, které umožňuje šetrnou, bezpečnou a přesnou digitalizaci glóbů. Toto zařízení by mělo umožnit jednoduché otáčení glóbu při zachování konstantní vzdálenosti od fotoaparátu, což je důležité při následných výpočtech. Jak takové digitalizační zařízení může vypadat lze vidět na obrázku 2.

Před usazením glóbu do zařízení je potřeba toto zařízení přizpůsobit jeho velikosti. Důležité je také usazení fotoaparátu. Fotoaparát musí být umístěn ve vhodné vzdálenosti od snímaného povrchu a optická osa fotoaparátu musí mířit do středu glóbu a být kolmá k jeho povrchu.



Obr. 2: Digitalizační zařízení pro snímání glóbů

Před začátkem snímkování je nutné určit jak velké oblasti glóbu je potřeba snímkovat, přičemž je zapotřebí dodržet několik podmínek:

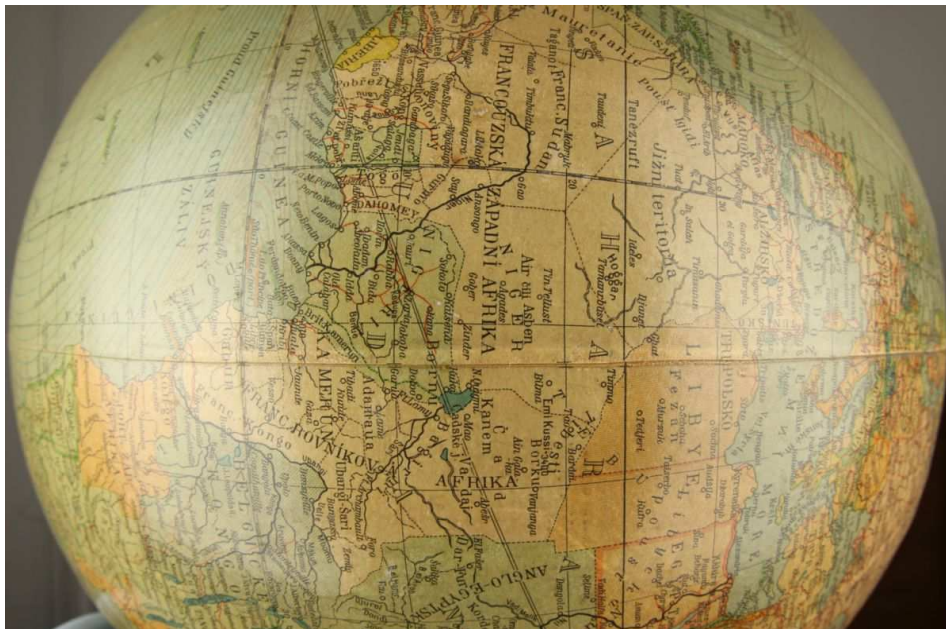
- snímky musí mít dostatečný překryt (alespoň 60% a více), aby mohlo být provedeno komplexní vyrovnaní,
- snímky musí mít dostatečné rozlišení, aby byla zachována čitelnost i toho nejmenšího textu.

Podle těchto podmínek se určí, jak velké oblasti je potřeba snímkovat.

Aby byl zachován určitý přehled o tom, které části glóbu jsou už nasnímané, je dobré pojmenovat každý snímek hodnotou zeměpisné šířky a délky v průsečíku který je např. v levém horním rohu snímku.

Snímkování probíhá po jednotlivých poledníkových pásích. V závislosti na velikosti glóbu se určí velikost snímané oblasti. U menších glóbů se glóbus rozdělí na části podle poledníků a rovnoběžek po 20° a tyto části jsou postupně nasnímány. Na větších globech se mohou snímkovat oblasti až velikosti 5°x5°. Tyto hodnoty platí pro oblasti kolem rovníku. Směrem k pólům se tyto oblasti adekvátně zvětšují.

Tímto způsobem se nasnímá cca 150 - 2 500 snímků v závislosti na velikosti glóbu.



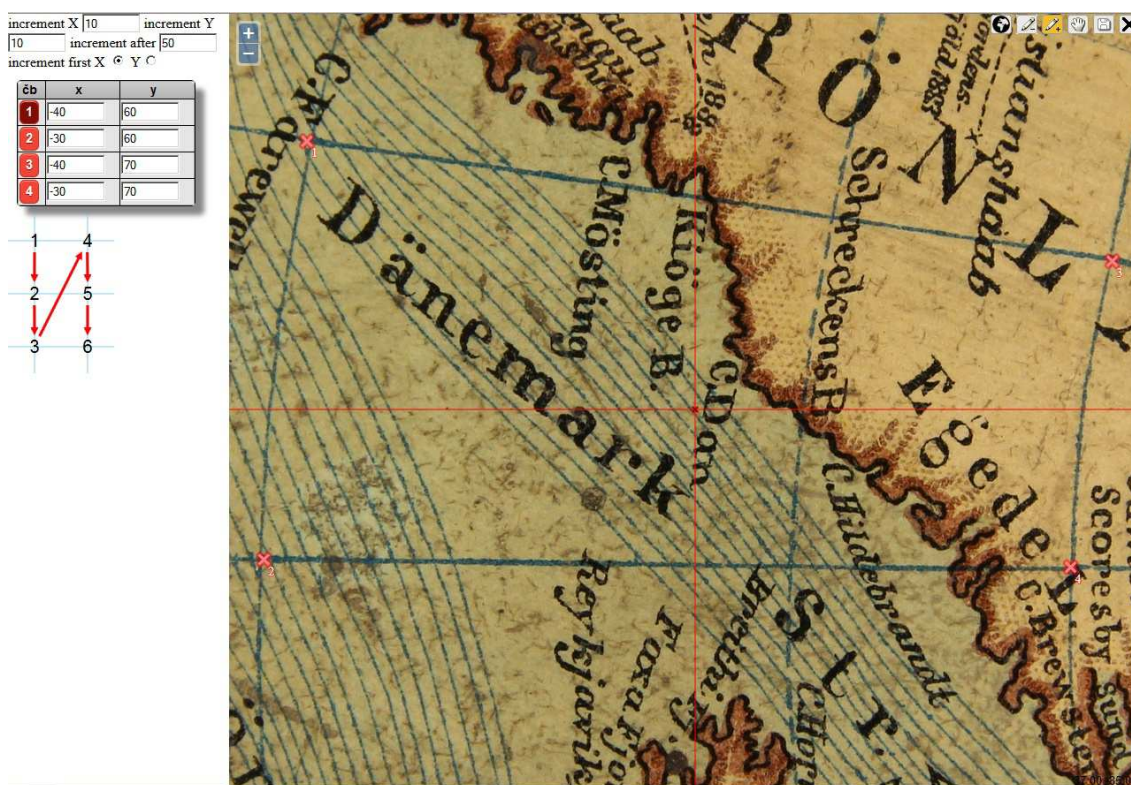
Obr. 3: Pořízený snímek

4 Sběr vlíčovacích bodů

Vlíčovací body plní dvojí funkci. Za prvé jsou použity ke georeferencování digitálního modelu a za druhé slouží ke zpracování jednotlivých snímků pomocí průsekové fotogrammetrie. Na každém snímku musí být minimálně 4 vlíčovací body, které se nachází i na dalších snímcích. Důležité je také rovnoměrné rozmístění vlíčovacích bodů na snímku, aby byla zajištěna numerická stabilita výpočtu. Dále je potřeba znát alespoň přibližné zeměpisné souřadnice vlíčovacích bodů. Proto je nejlepší jako vlíčovací body použít průsečíky zeměpisné sítě, ale není to nezbytně nutné, existují také glóby bez zeměpisné sítě.

Sběrem vlíčovacích bodů získáme ke každému snímku vždy dvojici souřadnic a to snímkové a zeměpisné.

Pro sběr vlíčovacích bodů je dobré použít vhodný program, který umožňuje ukládat body definované uživatelem. Tato práce je poměrně časově náročná, protože je takto potřeba nasbírat i několik tisíc bodů a zároveň je potřeba, aby byly vlíčovací body, se stejnými zeměpisnými souřadnicemi, na jednotlivých snímcích určeny přesně ve stejném místě.



Obr. 4: Příklad programu pro sběr vlíčovacích bodů

4.1. Získávání a kontrola vlíčovacích bodů pomocí korelace

Aby se získávání vlíčovacích bodů zjednodušilo je možné pro jejich hledání použít obrazovou korelaci. Princip spočívá v tom, že se každý průsečík zeměpisné sítě ručně označí pouze na jednom snímku a na ostatních se potom najde pomocí korelace. Tím se omezí množství ruční práce na přibližně čtvrtinu.

Pro korelaci se použije Pearsonova korelačního koeficientu (4.1). Nejdříve se určí dostatečně velké čtvercové okolí hledaného bodu na vzorovém snímku (vzor) a poté se hledá tento vzor na ostatních snímcích (cíl)

$$r_{i,j} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (4.1)$$

kde

n ... počet pixelů vzoru

x_i ... barevná hodnota vzoru v i -tém pixelu

y_i ... barevná hodnota cíle v i -tém pixelu

Zde nastává problém, protože vzor i cíl si musí být dostatečně podobné, to znamená že, musí být stejně natočené a mít stejné měřítko. To ale u zdrojových snímků není zajištěno. Tento problém se dá vyřešit zjištěním přibližných prvků vnější orientace každého snímku. Postup viz kapitola 5.1. Pomocí těchto parametrů získáme přímý vztah mezi souřadnicemi snímku a zeměpisnými souřadnicemi. Pokud známe tento vztah, můžeme vzorový i cílový snímek transformovat do stejného kartografického zobrazení a zde korelaci provést.

Jako jedno z možných zobrazení vhodných pro korelaci můžeme použít azimutální zobrazení v obecné poloze konkrétně gnomonickou projekci:

$$\sin U = \cos c \cdot \sin U_0 + \frac{y \cdot \sin c \cdot \cos U_0}{\varrho}$$

$$V = V_0 + \arctan \left(\frac{x \cdot \sin c}{\varrho \cdot \cos U_0 \cdot \cos c - y \cdot \sin U_0 \cdot \sin c} \right) \quad (4.2)$$

kde

$$\tan c = \varrho$$

$$\varrho = \sqrt{(x^2 + y^2)}$$

x, y ... souřadnice v azimutálním zobrazení

U_0, V_0 ... zeměpisné souřadnice kartografického pólu ležícího ve středu zobrazovaného území.

Inverzní transformační rovnice jsou

$$x = \frac{\cos U \cdot \sin(V - V_0)}{c}$$

$$y = \frac{\cos U_0 \cdot \sin U - \sin U_0 \cdot \cos U \cdot \cos(V - V_0)}{c} \quad (4.3)$$

kde

$$c = \sin U_0 \cdot \sin U + \cos U_0 \cdot \cos U \cdot \cos(V - V_0)$$

Jako kartografický pól zvolíme hledaný průsečík zeměpisné sítě.

Aby nebyla korelace příliš výpočetně náročná, je dobré převést všechny snímky z barevného prostoru RGB do stupňů šedi a provádět korelaci pouze na černobílých snímcích.

Korelace může nabývat hodnot $\langle -1, 1 \rangle$. Vzor posouváme po cílovém snímku a hledáme maximum korelačního koeficientu. Hodnota blíží se jedné signalizuje, že vzor a cíl jsou shodné. Pokud maximum je menší než 0.7, nemáme už dostatečnou jistotu, že jsme na snímku našli hledaný průsečík a je dobré výsledek vizuálně zkontrolovat.

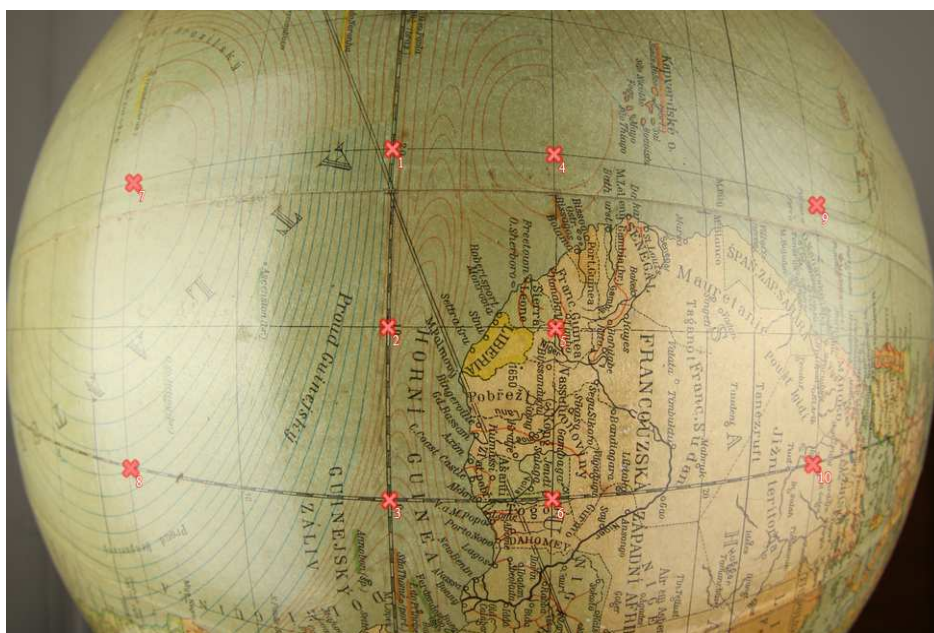
Pomocí korelace lze vlíčovací body nejen hledat, ale také kontrolovat, případně zpřesňovat. Kontrola se provádí tak, že se vezme dvojice snímků, na kterých se vlíčovací bod nachází, a vypočte se v tomto bodě korelační koeficient. Podle velikosti korelačního koeficientu se poté rozhodne, zda se oba snímky v tomto bodě shodují nebo ne. Při zpřesnění bodů se vezme vlíčovací bod na jednom snímku jako pevný a na ostatních snímcích kde se také vyskytuje jako určovaný. Postupuje se podobně, jako u hledání nových bodů pouze se zúží hledání na blízké okolí bodu.

4.2. Rozmístění vlíčovacích bodů

Aby bylo možné provést komplexní vyrovnání, je potřeba zajistit rovnoměrné rozmístění vlíčovacích bodů na snímku. Při nesplnění této podmínky může být výpočet nestabilní.

Z každého snímku se většinou použije pro tvorbu digitálního modelu pouze určitá malá zájmová oblast umístěná ve středu snímku a ohraničená zeměpisnými poledníky a rovnoběžkami. Je tedy nutné, aby průsečíky těchto hraničních poledníků a rovnoběžek byly vlíčovacími body. Tato oblast je ale příliš malá a proto je potřeba definovat i další vlíčovací body, aby byly rovnoměrně rozmístěny na celém snímku.

Optimálně se jeví 4 - 8 bodů na hranici zájmového území a dále další 2 - 4 body na okrajích snímku viz obrázek 5. Všechny body jsou umístěny, pokud to jde, na průsečících zeměpisné sítě a to hlavně kvůli jednoduššímu zjišťování jejich zeměpisných souřadnic.



Obr. 5: Optimální rozmístění bodů na snímku

5 Tvorba digitálního modelu

5.1. Výpočet prvků vnější orientace

K vytvoření digitálního modelu glóbu, je zapotřebí získat pro každý snímek jeho prvky vnější orientace, pomocí kterých potom získáme přímý matematický vztah mezi snímkovými souřadnicemi x, y a zeměpisnými souřadnicemi U, V .

Prvky vnější orientace jsou 3 úhly rotace snímku ω, φ, κ a dále prostorové souřadnice středu vstupní pupily X_0, Y_0, Z_0 (projekčního centra), který je na obrázku 6 označen jako O . Střed souřadnicové soustavy je umístěn do středu glóbu.

Při výpočtech předpokládáme, že globus je ideální koule o poloměru r_g .

Nejdříve je potřeba získat přibližné hodnoty prvků vnější orientace. Ty získáme ve dvou krocích. Nejprve je určíme pomocí přibližné zeměpisné šířky a délky středu snímku, kterou zjistíme odečtením ze zeměpisné sítě. Z nich vypočteme přibližnou matici rotace podle vztahu (5.1). Pozn.: tato matice rotace platí, pouze pokud fotíme globus o 90° otočený, tedy s východem nahoře.

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \sin V_S \sin U_S & \cos V_S & \sin V_S \cos U_S \\ -\cos V_S \sin U_S & \sin V_S & -\cos V_S \cos U_S \\ -\cos U_S & 0 & \sin U_S \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

kde

U_S ... zeměpisná šířka středu snímku

V_S ... zeměpisná délka středu snímku

Pomocí této matice (5.1) vypočteme 3 přibližné úhly rotace snímku:

$$\begin{aligned} \tan \omega &= \frac{s_{2,3}}{s_{3,3}} \\ \sin \varphi &= s_{1,3} \\ \tan \kappa &= \frac{-s_{1,2}}{s_{1,1}} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Prostorové souřadnice středu vstupní pupily (projekčního centra) X_0, Y_0, Z_0 vypočítáme podle vzorce

$$\begin{aligned} X_0 &= r_F \cdot \cos U_S \cdot \sin V_S \\ Y_0 &= -r_F \cdot \cos U_S \cdot \cos V_S \\ Z_0 &= r_F \cdot \sin U_S \end{aligned} \quad (5.3)$$

kde

r_F ... přibližná vzdálenost projekčního centra fotoaparátu od středu glóbu.

V druhém kroku vypočteme zpřesněné prvky vnější orientace vyrovnaním pomocí metody nejmenších čtverců z vlíčovacích bodů na snímku. Protože máme 6 neznámých, potřebujeme alespoň 3 body na snímku.

Prvotní vztah je dán následujícími rovnicemi

$$\begin{aligned} x_i^0 &= x_o + f \frac{r_{1,1}(X_i - X_0) + r_{2,1}(Y_i - Y_0) + r_{3,1}(Z_i - Z_0)}{r_{1,3}(X_i - X_0) + r_{2,3}(Y_i - Y_0) + r_{3,3}(Z_i - Z_0)} \\ y_i^0 &= y_o + f \frac{r_{1,2}(X_i - X_0) + r_{2,2}(Y_i - Y_0) + r_{3,2}(Z_i - Z_0)}{r_{1,3}(X_i - X_0) + r_{2,3}(Y_i - Y_0) + r_{3,3}(Z_i - Z_0)} \end{aligned} \quad (5.4)$$

kde

$x_i^0, y_i^0 \dots$ přibližné souřadnice vlíčovacích bodů na snímku,

$i = 1, \dots, n$, kde $n \dots$ počet vlíčovacích bodů na snímku,

$f \dots$ konstanta komory,

$X_0, Y_0, Z_0 \dots$ souřadnice projekčního centra,

$x_o, y_o \dots$ souřadnice hlavního snímkového bodu na snímku,

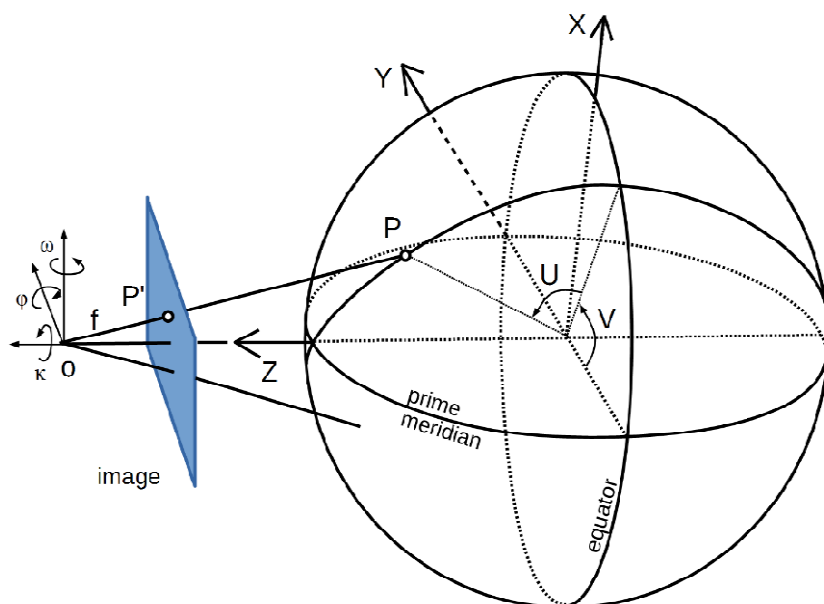
$r_{i,j}$ jsou prvky matice rotace $\mathbf{R}$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos\kappa\cos\varphi & \cos\kappa\sin\varphi\sin\omega + \sin\kappa\cos\omega & -\cos\kappa\sin\varphi\cos\omega + \sin\kappa\sin\omega \\ -\sin\kappa\cos\varphi & -\sin\kappa\sin\varphi\sin\omega + \cos\kappa\cos\omega & \sin\kappa\sin\varphi\cos\omega + \cos\kappa\sin\omega \\ \sin\varphi & -\cos\varphi\sin\omega & \cos\varphi\cos\omega \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

$X_i, Y_i, Z_i \dots$ prostorové souřadnice vlíčovacích bodů na glóbu vypočtené ze zeměpisných souřadnic

$$\begin{aligned} X_i &= r_g \cdot \cos U_i \cdot \sin V_i \\ Y_i &= -r_g \cdot \cos U_i \cdot \cos V_i \\ Z_i &= r_g \cdot \sin U_i \end{aligned} \quad (5.6)$$

$r_g \dots$ poloměr glóbu



Obr. 6: Schéma snímkování glóbu

Rovnice oprav je

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{l}$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_{x_1} \\ v_{y_1} \\ \vdots \\ v_{x_n} \\ v_{y_n} \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ \omega \\ \varphi \\ \kappa \end{bmatrix} \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_{x_1} \\ l_{y_1} \\ \vdots \\ l_{x_n} \\ l_{y_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_1^0 \\ y_1 - y_1^0 \\ \vdots \\ x_n - x_n^0 \\ y_n - y_n^0 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$x, y \dots$ vyrovnané souřadnice vlíčovacích bodů na snímku,
 $x^0, y^0 \dots$ přibližné („měřené“) souřadnice vlíčovacích bodů na snímku vypočtené z rovnice (5.4) z přibližných hodnot prvků vnější orientace a prostorových souřadnic vlíčovacích bodů na glóbu.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1^0}{\partial X_0} & \frac{\partial x_1^0}{\partial Y_0} & \frac{\partial x_1^0}{\partial Z_0} & \frac{\partial x_1^0}{\partial \omega} & \frac{\partial x_1^0}{\partial \varphi} & \frac{\partial x_1^0}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial y_1^0}{\partial X_0} & \frac{\partial y_1^0}{\partial Y_0} & \frac{\partial y_1^0}{\partial Z_0} & \frac{\partial y_1^0}{\partial \omega} & \frac{\partial y_1^0}{\partial \varphi} & \frac{\partial y_1^0}{\partial \kappa} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial x_n^0}{\partial X_0} & \frac{\partial x_n^0}{\partial Y_0} & \frac{\partial x_n^0}{\partial Z_0} & \frac{\partial x_n^0}{\partial \omega} & \frac{\partial x_n^0}{\partial \varphi} & \frac{\partial x_n^0}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial y_n^0}{\partial X_0} & \frac{\partial y_n^0}{\partial Y_0} & \frac{\partial y_n^0}{\partial Z_0} & \frac{\partial y_n^0}{\partial \omega} & \frac{\partial y_n^0}{\partial \varphi} & \frac{\partial y_n^0}{\partial \kappa} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$n \dots$ počet vlíčovacích bodů na snímku

V matici $\mathbf{A}$ jsou jednotlivé parciální derivace rovnice (5.4) podle neznámých prvků vnější orientace.

Řešení dostaneme ve tvaru:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l} \quad (5.9)$$

Výpočet provádíme iterativně, dokud opravy nejsou dostatečně malé, což je nutné pro snížení chyby z linearizace rovnic oprav při vyrovnání MNČ.

Jestliže jsou na snímku pouze 2 vlíčovací body, nebo mají body špatnou konfiguraci, můžeme přidat ještě 3 podmínky a to zafixovat vzdálenost fotoaparátu od středu glóbu a dále, že optická osa fotoaparátu míří do středu glóbu.

$$\begin{aligned} X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2 - r_F^2 &= 0 \\ x_o + f \left(r_{1,1}(X - X_0) + r_{2,1}(Y - Y_0) + r_{3,1}(Z - Z_0) \right) &= 0 \\ y_o + f \left(r_{1,2}(X - X_0) + r_{2,2}(Y - Y_0) + r_{3,2}(Z - Z_0) \right) &= 0 \end{aligned} \quad (5.10)$$

Výpočet se potom řeší jako zprostředkující vyrovnání s podmínkami.

5.2. Komplexní vyrovnání

Pokud jsou prvky vnější orientace dostatečně přesně vypočtené, může se přejít ke komplexnímu vyrovnání celého glóbu. Při tomto vyrovnání se opět berou jako neznámé prvky vnější orientace, navíc se jako neznámé berou zeměpisné souřadnice vlíčovacích bodů na glóbu. Jako neznámé můžeme přidat také prvky vnitřní orientace komory.

Do výrazu (5.4) se dosadí rovnice (5.6) a řeší se vyrovnání pomocí metody nejmenších čtverců.

Rovnice oprav je

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{l}$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_{x_1} \\ v_{y_1} \\ \vdots \\ v_{x_n} \\ v_{y_n} \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} X_0^1 \\ Y_0^1 \\ Z_0^1 \\ \omega^1 \\ \varphi^1 \\ \kappa^1 \\ \vdots \\ X_0^m \\ Y_0^m \\ Z_0^m \\ \omega^m \\ \varphi^m \\ \kappa^m \\ U^1 \\ V^1 \\ \vdots \\ U^p \\ V^p \end{bmatrix} \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_{x_1} \\ l_{y_1} \\ \vdots \\ l_{x_n} \\ l_{y_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_1^0 \\ y_1 - y_1^0 \\ \vdots \\ x_n - x_n^0 \\ y_n - y_n^0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$\mathbf{A}_1^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial X_0^1} & \frac{\partial y_1}{\partial X_0^1} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial X_0^1} & \frac{\partial y_n}{\partial X_0^1} \\ \frac{\partial x_1}{\partial Y_0^1} & \frac{\partial y_1}{\partial Y_0^1} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial Y_0^1} & \frac{\partial y_n}{\partial Y_0^1} \\ \frac{\partial x_1}{\partial Z_0^1} & \frac{\partial y_1}{\partial Z_0^1} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial Z_0^1} & \frac{\partial y_n}{\partial Z_0^1} \\ \frac{\partial x_1}{\partial \omega^1} & \frac{\partial y_1}{\partial \omega^1} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial \omega^1} & \frac{\partial y_n}{\partial \omega^1} \\ \frac{\partial x_1}{\partial \varphi^1} & \frac{\partial y_1}{\partial \varphi^1} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial \varphi^1} & \frac{\partial y_n}{\partial \varphi^1} \\ \frac{\partial x_1}{\partial \kappa^1} & \frac{\partial y_1}{\partial \kappa^1} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial \kappa^1} & \frac{\partial y_n}{\partial \kappa^1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial x_1}{\partial X_0^m} & \frac{\partial y_1}{\partial X_0^m} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial X_0^m} & \frac{\partial y_n}{\partial X_0^m} \\ \frac{\partial x_1}{\partial Y_0^m} & \frac{\partial y_1}{\partial Y_0^m} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial Y_0^m} & \frac{\partial y_n}{\partial Y_0^m} \\ \frac{\partial x_1}{\partial Z_0^m} & \frac{\partial y_1}{\partial Z_0^m} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial Z_0^m} & \frac{\partial y_n}{\partial Z_0^m} \\ \frac{\partial x_1}{\partial \omega^m} & \frac{\partial y_1}{\partial \omega^m} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial \omega^m} & \frac{\partial y_n}{\partial \omega^m} \\ \frac{\partial x_1}{\partial \varphi^m} & \frac{\partial y_1}{\partial \varphi^m} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial \varphi^m} & \frac{\partial y_n}{\partial \varphi^m} \\ \frac{\partial x_1}{\partial \kappa^m} & \frac{\partial y_1}{\partial \kappa^m} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial \kappa^m} & \frac{\partial y_n}{\partial \kappa^m} \end{bmatrix}
\quad
\mathbf{A}_2^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial U^1} & \frac{\partial y_1}{\partial U^1} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial U^1} & \frac{\partial y_n}{\partial U^1} \\ \frac{\partial x_1}{\partial V^1} & \frac{\partial y_1}{\partial V^1} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial V^1} & \frac{\partial y_n}{\partial V^1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial x_1}{\partial U^p} & \frac{\partial y_1}{\partial U^p} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial U^p} & \frac{\partial y_n}{\partial U^p} \\ \frac{\partial x_1}{\partial V^p} & \frac{\partial y_1}{\partial V^p} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial V^p} & \frac{\partial y_n}{\partial V^p} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \quad \mathbf{A}_2] \quad (5.12)$$

- n ... celkový počet vlíčovacích bodů na všech snímcích,
 m ... celkový počet snímků,
 p ... počet vlíčovacích bodů na glóbu.

Matice $\mathbf{A}$ se skládá z parciálních derivací podle prvků vnější orientace a dále podle zeměpisných souřadnic vlíčovacích bodů. Výpočet opět probíhá iterativně. Pokud nejsou přibližné hodnoty neznámých parametrů dostatečně přesné, nebo je na snímcích špatná konfigurace vlíčovacích bodů tak výpočet nekonverguje k řešení.

Aby byl výpočet stabilní, je vhodné vybrat některé vlíčovací body jako pevné a jejich zeměpisné souřadnice nevyrovnávat.

Matice $\mathbf{A}$ má $2n$ řádků a $6m+2p$ sloupců, je tedy velice rozsáhlá. Aby byl výpočet rychlejší, je vhodné použít některé metody pro řešení lineárních rovnic s řídkými maticemi, protože v matici $\mathbf{A}$ je mnoho prvků nulových.

Vyrovnáním se získají přesné hodnoty prvků vnější orientace každého snímku, které se dosadí do výrazu (5.4) a tím se získá přímá transformace mezi zeměpisnými a snímkovými souřadnicemi.

Inverzní transformace vede k řešení kvadratické rovnice

$$aZ^2 + bZ + c = 0 \quad (5.13)$$

kde koeficienty rovnice jsou

$$\begin{aligned} a &= g^2 + h^2 + 1 \\ b &= 2jg + 2kh \\ c &= j^2 + k^2 - r_g^2 \end{aligned} \quad (5.14)$$

kde

$$\begin{aligned} g &= \frac{r_{1,1}(X-X_0)+r_{1,2}(Y-Y_0)-r_{1,3}f}{r_{3,1}(X-X_0)+r_{3,2}(Y-Y_0)-r_{3,3}f} \\ h &= \frac{r_{2,1}(X-X_0)+r_{2,2}(Y-Y_0)-r_{2,3}f}{r_{3,1}(X-X_0)+r_{3,2}(Y-Y_0)-r_{3,3}f} \\ j &= X_0 - Z_0g \\ k &= Y_0 - Z_0h \end{aligned} \quad (5.15)$$

Prostorové souřadnice na glóbu vypočteme

$$\begin{aligned} Z_{1,2} &= \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} \\ X_{1,2} &= X_0 + (Z_{1,2} - Z_0)g \\ Y_{1,2} &= Y_0 + (Z_{1,2} - Z_0)h \end{aligned} \quad (5.16)$$

kde

D ... diskriminant kvadratické rovnice.

Z nich poté vypočteme zeměpisné souřadnice

$$\begin{aligned} \tan U &= \frac{Z_{1,2}}{\sqrt{X_{1,1}^2 + Y_{1,2}^2}} \\ \tan V &= \frac{X_{1,2}}{-Y_{1,2}} \end{aligned} \quad (5.17)$$

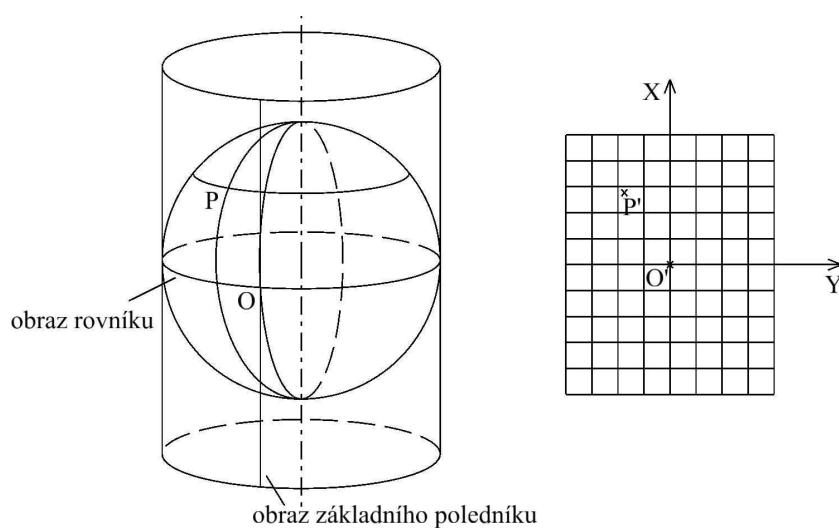
Tímto byl získán transformační vztah umožňující každému obrazovému bodu na každém snímku určit jeho odpovídající zeměpisné souřadnice. Ty je možné dále transformovat do vhodně zvoleného kartografického zobrazení k následné vizualizaci.

6 Vizualizace

Pro vytvoření bezešvého digitálního modelu glóbu se snímky přímo transformují do ekvidistantního válcového zobrazení a vytváří se jeden velký obraz. Tento obraz se dále zpracovává, což vede k vytvoření virtuálního modelu glóbu.

6.1. Převod snímků do ekvidistantního válcového zobrazení

U ekvidistantního válcového zobrazení dochází k převedení zobrazení povrchu glóbu na plášť válce, který se poté rozvine do roviny. Zobrazovací válec u použitého zobrazení je v normální poloze, což znamená, že osa válce je totožná s osou rotace glóbu. Obrazem zeměpisné sítě je tedy soustava vzájemně ortogonálních přímků, kdy obrazy poledníků a rovnoběžek jsou od sebe stejně vzdálené.



Obr. 7: Ekvidistanční válcové zobrazení v normální poloze

Transformaci snímků do ekvidistantního válcového zobrazení je nutno provést z důvodu následné vizualizace modelu v aplikaci Google Earth, která pracuje se snímky v podobě čtyřúhelníků. Tyto čtyřúhelníky jsou do aplikace umisťovány na základě zeměpisných souřadnic severní, jižní, východní a západní hrany čtyřúhelníka.

Aby byla provedena transformace všech obrazových bodů do ekvidistantního válcového zobrazení, transformují se snímkové souřadnice pixelů, pomocí již známých prvků vnější orientace, na zeměpisné U_j , V_j a dále se dosadí do zobrazovacích rovnic ekvidistantního válcového zobrazení.

$$X_j = R \cdot U_j$$

$$Y_j = R \cdot V_j$$

kde

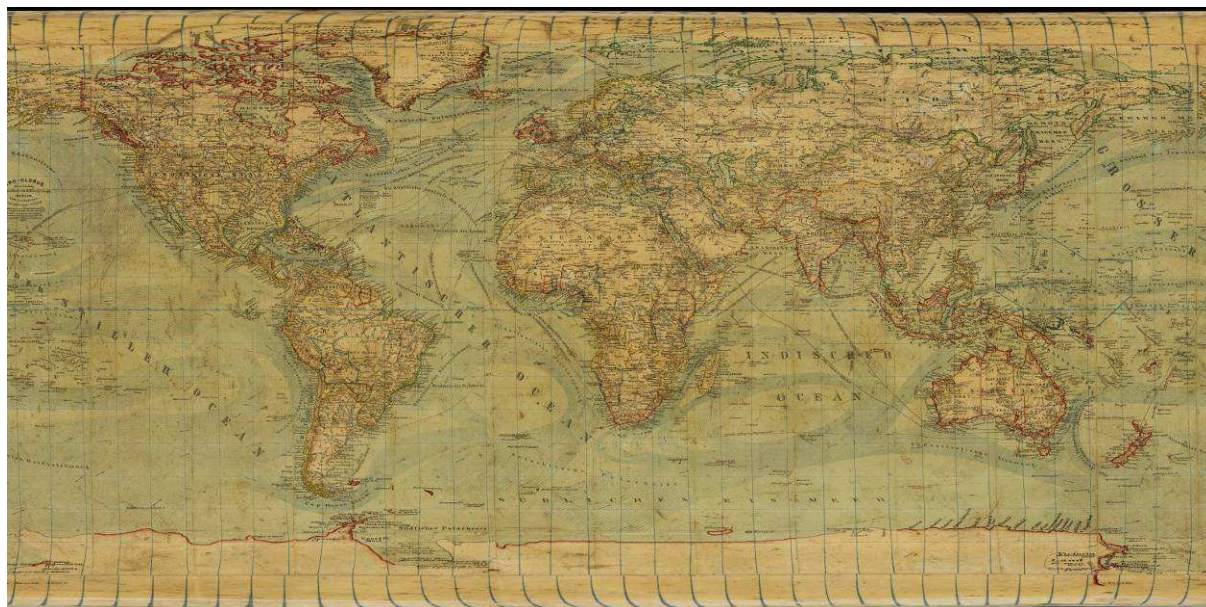
R ... poloměr Země,

U_j , V_j ... zeměpisné souřadnice obrazových bodů,

X_j , Y_j ... pravouhlé souřadnice obrazových bodů v rovině ekvidistantního válcového zobrazení.

Při transformaci snímků do válcového zobrazení se musí pamatovat na to, že u mnoha starých glóbů prochází nultý poledník přibližně ostrovem Ferro nebo jeho okolím a proto je potřeba výsledný obraz posunout o cca $17,5^\circ$ aby byl správně georeferencován. Přitom ze zkušenosti je zřejmé, že co jednotlivý glóbus to trochu jiná hodnota tohoto posunu.

Na obrázku 8 je vidět výsledný obraz glóbu ve válcovém zobrazení. Na pólech lze pozorovat mírné zdeformování poledníků, které je způsobeno vyrovnáním vlíčovacích bodů na glóbu umocněné roztažením pólů ve válcovém zobrazení (kartografickým zkreslením) při kterém i nepatrná chyba se mnohonásobí. Tento nedostatek se dá částečně odstranit vhodnou volbou pevných bodů při vyrovnání, ale také může signalizovat špatnou konfiguraci vlíčovacích bodů na snímcích.



Obr. 8: Transformovaný obraz glóbu

6.2. Úprava obrazu glóbu

I přes sebelepší zadání vlíčovacích bodů se může občas stát, že je na výsledném modelu patrné napojení jednotlivých snímků projevující se jako nepatrný posun obrazu. Je to dáno většinou tím, že glóbus není ideální koule nebo se papír s kresbou od glóbu odlepí, případně to mohou způsobovat další vlivy.

Pokud nechceme, aby tyto přechody byly patrné, jsou v zásadě dvě možnosti.

- První možností je na styku dvou snímků zadat řadu vlíčovacích bodů, které určí jak velká přesně je odchylka na styku a poté pomocí dotransformace tuto chybu odstranit. Nutné je ale, získat velké množství vlíčovacích bodů, a pokud nebudou dostatečně přesné, tak tento problém úplně neodstraní.
- Druhá možnost je mezi jednotlivými snímky použít plynulý přechod, kdy se sousední snímky v místě styku prolínají. Tato metoda je jednodušší, ale pokud je odchylka větší, tak dojde k určitému rozmazání v místě přechodu.

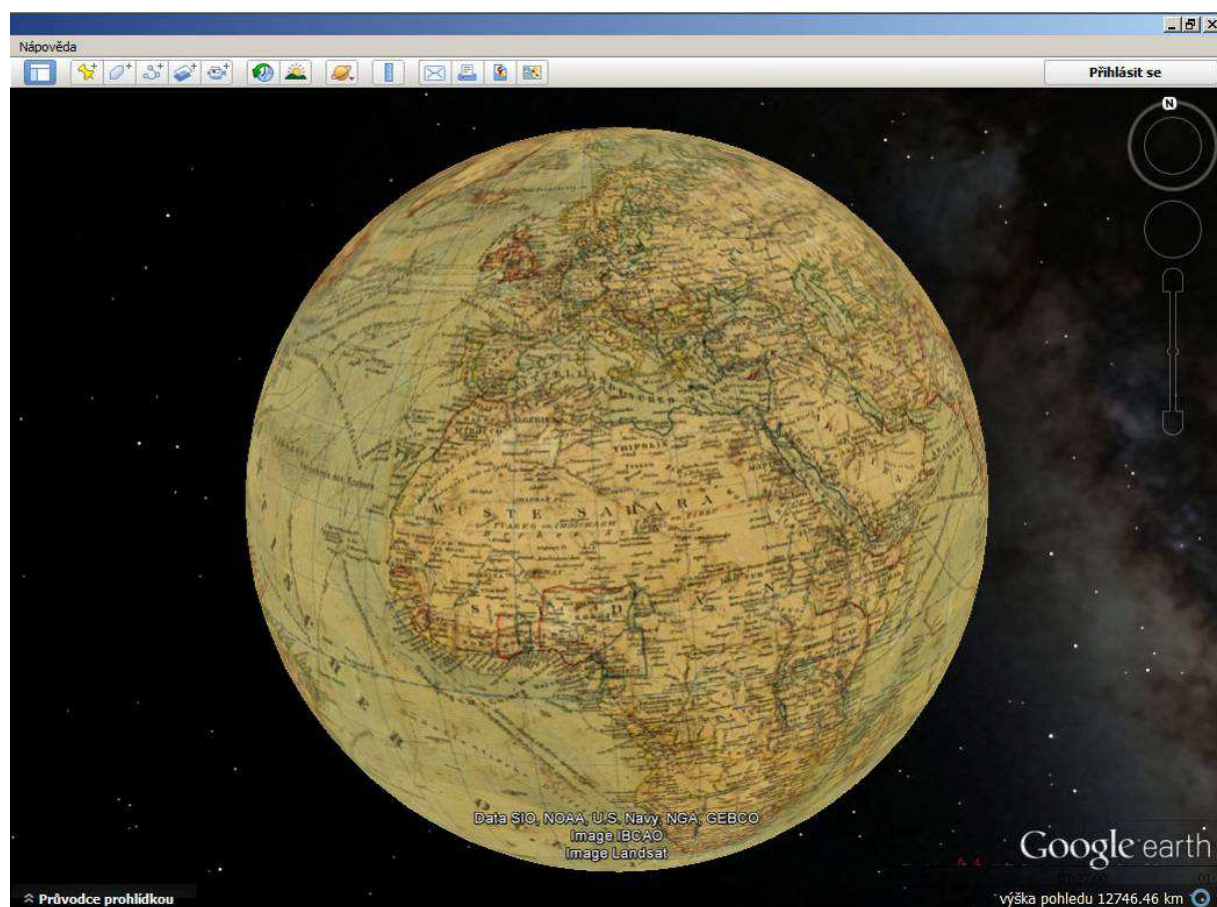
6.3. Zpřístupnění glóbu

Zpřístupnění digitálních kopií snímaných glóbů je logickým vyústěním celého procesu digitalizace. Tuto část celého procesu nejvíce ocení koncový uživatel.

Zpřístupnění virtuálních modelů glóbů široké veřejnosti je v současné době nejlépe realizovat prostřednictvím aplikace Google Earth nebo pluginu Google Earth pro webové prohlížeče, který je kompatibilní se všemi hlavními platformami a je poskytován bezplatně stejně jako aplikace Google Earth. Oba umožňují zobrazení 3D modelu Země. K modelu pak lze připojovat vlastní vrstvy pomocí API poskytovaného společností Google. Další možností zpřístupnění virtuálních modelů glóbů je prostřednictvím JavaScript knihovny Cesium.

Problémem při zpřístupňování glóbů je značná velikost výsledného modelu, který může při prohlížení na internetu způsobovat časové prodlevy, než se celý model glóbu zobrazí. Je tedy výhodné před vlastní vizualizací vytvořit také náhledy s menším rozlišením, které urychlí zpracovávání obrazových dat webovou aplikací. Snímky jsou tedy rozděleny na menší části tzv. dlaždice, které jsou vytvářeny pro různé úrovně zvětšení obrazu obvykle tak, že jedna dlaždice na určité úrovni přiblížení odpovídá čtyřem dlaždicím na úrovni následující.

Z takto zpracovaných snímků je vytvořena vrstva v datovém formátu KML (Keyhole Markup Language), který umožní zobrazit model glóbu v aplikaci Google Earth. Výsledným produktem celého zpracování pořízených snímků jsou tedy dlaždice pokrývající celou plochu glóbu a KML soubor, který popisuje polohu těchto dlaždic ve virtuálním modelu.



Obr. 9: Digitální model glóbu

7 Ověření technologie vytvořením digitálního modelu glóbu

Pro ověření výše popsané technologie byl vytvořen digitální model zemského glóbu Josefa Jüttnera a Franze Lettanyho, který je součástí sbírky Královské kanonie premonstrátů na Strahově a je vystaven v Teologickém sále Strahovské knihovny. Jedná se o glóbus z roku 1822 o průměru 32 cm, který je upevněn v dřevěném, čtyřnohém podstavci zhotoveném v empírovém slohu.

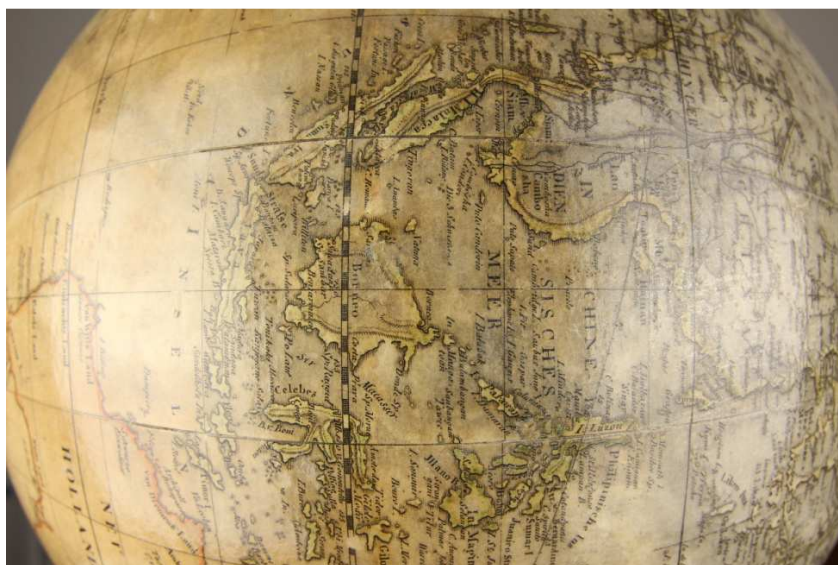


Obr. 10: Zemský glóbus Josefa Jüttnera a Franze Lettanyho

Glóbus byl převezen na dobu nezbytně nutnou pro jeho nasnímání do Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického v.v.i., kde byla následně provedena i jeho kompletní digitalizace. Z důvodu umístění do digitalizačního zařízení bylo potřeba vyjmout glóbovou kouli z dřevěného stojanu, v němž byla upevněna. Toto vyjmutí bylo odborně provedeno restaurátorkou sbírky Královské kanonie premonstrátů na Strahově.

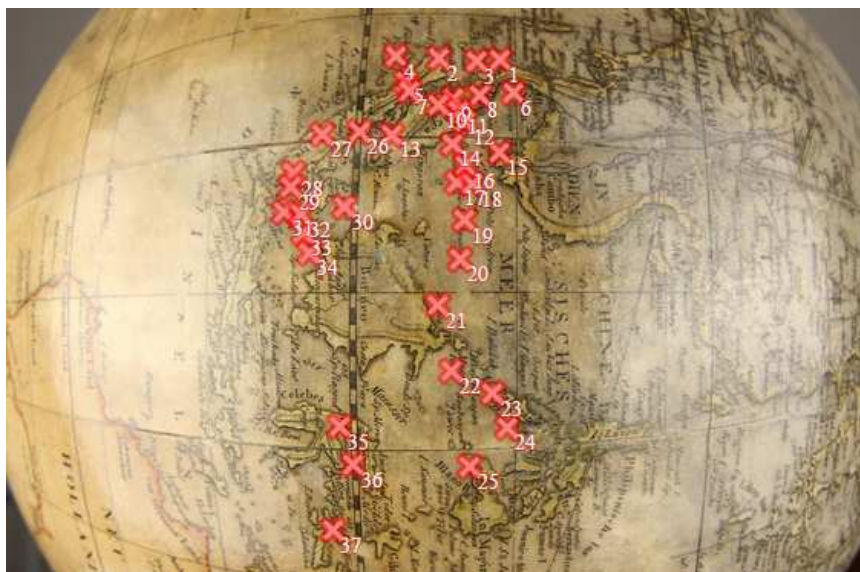
Na následujících obrázcích bude demonstrován postup digitalizace tohoto glóbu po jednotlivých krocích.

Krok 1: Snímkování glóbu po oblastech 20° zeměpisné délky x 10° zeměpisné šířky vymezených probíhající zeměpisnou sítí.



Obr. 11: Pořízený snímek

Krok 2: Určení vlíčovacích bodů.



Obr. 12: Určené vlíčovací body na snímku

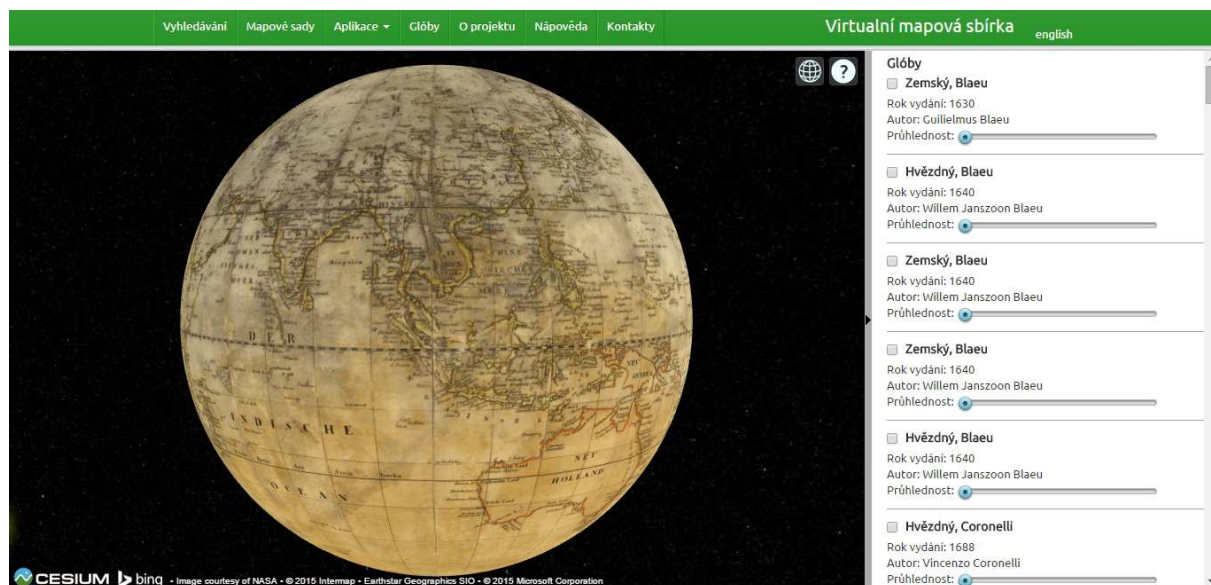
Krok 3: Vytvoření transformovaného obrazu glóbu.



Obr. 13: Transformovaný obraz glóbu

Krok 4: Vytvoření digitálního modelu glóbu a jeho zpřístupnění na webových stránkách Virtuální mapové sbírky Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického v.v.i..

Výsledný digitální model se nachází na adrese: <http://chartae-antiquae.cz/cs/globes/34521>



Obr. 14: Digitální model glóbu

8 Závěr

Výše popsaným postupem vytvoření digitálního modelu zemského glóbu Josefa Jüttnera a Franze Lettanyho, byla ověřena funkčnost vyvinuté technologie georeferencování glóbů. Technologie byla ověřena na glóbu ze sbírky Královské kanonie premonstrátů na Strahově, se kterou byla uzavřena ve smyslu ustanovení § 11 odst. 1 písm. a) zákona č. 130/2002 Sb., o podpoře výzkumu, experimentálního vývoje a inovací z veřejných prostředků a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o podpoře výzkumu a vývoje), smlouva o využití výsledků, viz Příloha 1.

9 Seznam použitých zdrojů

- [1] AMBROŽOVÁ, K. Digitální glóby. In *Sborník příspěvků 1. ročníku studentské konference „Digitální technologie v geoinformatice a kartografii.“*, Praha, 2011.
- [2] AMBROŽOVÁ, K.; TALICH M. Digitization of old globes. In *8th International Workshop Digital Approaches to Cartographic Heritage*, Rome, Italy, 2013.
- [3] AMBROŽOVÁ K., TALICH M.: Metoda digitalizace starých glóbů. In: *Sborník referátů z vědecké konference „Historické mapy“*, 24. 10. 2013, Bratislava, Katedra mapování a pozemkových úprav, SvF STU, 2013, str. 7 - 16, ISBN 978-80-89060-22-1, Dostupné z: <http://naki.vugtk.cz/media/doc/publikace/HM_2013_Ambrozova_Talich.pdf>
- [4] AMBROŽOVÁ, K.; TALICH M., BÖHM O.: *Metodika digitalizace glóbů*. Zdiby: VÚGTK, v.v.i., 2013, 20 s. Dostupné z: <http://naki.vugtk.cz/media/doc/metodika-digitalizace_globu.pdf>.
- [5] ANTOŠ, F. Cartographic sources as a cultural heritage. In *Symposium on „Discovery, Exploration, Cartography“*, Budapest, Hungary, 2012.
- [6] BUCHAR, P. *Matematická kartografie*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. 197 s. ISBN 978-80-01-03765-2.
- [7] CUBR, L. Dlouhodobá ochrana digitálních dokumentů. In *KTD: Česká terminologická databáze knihovnictví a informační vědy* [online]. Praha: Národní knihovna ČR, 2003 [cit. 2013-10-11]. Dostupné z: <http://aleph.nkp.cz/F/?func=direct&doc_number=000014623&local_base=KTD>.
- [8] GEDE, M. Publishing globes on the Internet. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. 2009, vol. 4, no. 1, s. 141-148. ISSN 1217-8977.
- [9] GEDE, M. The use of the Nelder-Mead Method in estimating projection parameters for globe photographs. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. 2010, vol. 45, no. 1, s. 17-23. ISSN 1217-8977.
- [10] GEDE, M.; MÁRTON, M. Globes on the Web – The Technical Background and the First Items of the Virtual Globes Museum. In GARTNER, G.; ORTAG, F., eds. *Cartography in Central and Eastern Europe*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2009, s. 279-290. ISBN 3-642-03293-1.
- [11] HAVRLANT, J.; AMBROŽOVÁ, K.; TALICH, M., BÖHM, O.: *Metodika georeferencování glóbů*. Zdiby: VÚGTK, v.v.i., 2014, 25 s. Dostupné z: <http://naki.vugtk.cz/media/doc/metodika_georeferencovani_globu.pdf>.
- [12] PAVELKA, K. *Fotogrammetrie 1*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2009. 200 s. ISBN 978-80-01-04249-6.
- [13] PAVELKA, K. *Fotogrammetrie 2*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2011. 163 s. ISBN 978-80-01-04719-4.
- [14] SNYDER, J. P. *Map Projection – A Working Manual*. U.S. Geological Survey Professional Paper: 1395. Washington, 1987, s. 173-176.